

Aus dem Institut für Physiologie
Direktor: Herr Prof. Dr. med. A. Deußen

**Untersuchungen zum besseren Verständnis des Einflusses von
O₂-angereicherter Luft auf kardiopulmonale Parameter und
kognitive Funktionen bei Gerätetauchern**

Eine experimentelle Studie

D i s s e r t a t i o n s s c h r i f t

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Medizin

Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt

der Medizinischen Fakultät Carl Gustav Carus

der Technischen Universität Dresden

von

Anne-Kathrin Brebeck
aus Pforzheim

Dresden 2016

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der mündlichen Prüfung: (Verteidigungstermin)

gez.: _____
Vorsitzender der Promotionskommission

*Und wenn ich wüsste, dass morgen die Welt untergeht;
ich würde heute noch ein Apfelbäumchen pflanzen*

*Martin Luther
1483-1546*

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	7
1.1. Atemgase	8
1.1.1. Schädigung durch Sauerstoff	8
1.1.1.1. Sauerstoff-Radikale	9
1.1.1.2. Paul Bert-Effekt	10
1.1.1.3. Lorrain Smith-Effekt.....	12
1.1.1.4. Vegetatives Nervensystem (Herzfrequenz, Hämodynamik)	12
1.1.2. Schädigung durch Stickstoff	13
1.1.2.1. Dekompressionserkrankung.....	14
1.1.2.2. Stickstoffnarkose	16
1.1.3. Therapieansätze durch Sauerstoff.....	17
1.2. Ziel der Studie	18
2. Teilnehmer, Materialien und Methodik	19
2.1. Teilnehmer	19
2.1.1. Rekrutierung.....	19
2.1.2. Ein- und Ausschlusskriterien.....	21
2.1.3. Soziodemografische Daten.....	21
2.2. Materialien	22
2.2.1. SUBEX air28	22
2.2.2. Doppel-Verblindung der Atemgase und Randomisierung	22
2.3. Tauchgang	24
2.3.1. Ort, Umgebungsbedingungen und Zeitraum	24
2.3.2. Tauchgebiet - El Quadim Bay	25
2.3.3. Tauchroute	26
2.4. Datenerfassung und Zeitmanagement	27
2.4.1. Lungenfunktion (statische und dynamische Spirometrie)	28
2.4.2. Blasen-Detektion (Doppler-Ultraschall)	32

2.4.3.	Kognitive Leistung (Gedächtnis- und Aufmerksamkeitstest)	37
2.4.4.	Vegetative Modulation der Herzfrequenz	40
2.5.	Statistik	42
3.	Ergebnisse	43
3.1.	Soziodemografische Daten	43
3.2.	Tauchgruppenvergleich	45
3.3.	Lungenfunktion (statische und dynamische Spirometrie).....	46
3.3.1.	Oxygen Tolerance Units, Units of Pulmonary Toxicity Dose	46
3.3.2.	Spirometrie vor dem Tauchgang	48
3.3.3.	Spirometrie nach dem Tauchgang.....	49
3.3.4.	Atemgaseffekte auf die Lungenfunktion vor und nach Tauchgang.....	52
3.3.5.	Einflussfaktor Rauchen.....	53
3.4.	Blasen-Detektion (Doppler-Ultraschall).....	54
3.4.1.	Allgemeine Blasenauswertung	54
3.4.2.	Auswertung der Scores	59
3.4.3.	Einflussfaktor Geschlecht auf die Blasen-Bildung.....	62
3.5.	Kognitive Leistung (Gedächtnis- und Aufmerksamkeitstest).....	64
3.5.1.	VLMT	64
3.5.2.	ZVT	66
3.5.3.	Einflussfaktoren auf die kognitive Leistung	68
3.6.	Vegetative Modulation der Herzfrequenz.....	69
3.6.1.	Herzfrequenz während des Tauchganges	70
3.6.2.	Einflussfaktoren auf die Herzfrequenz während des Tauchganges.....	71
4.	Diskussion	74
4.1.	Einflussfaktoren.....	74
4.2.	Soziodemografische Daten und Tauchgruppenvergleiche.....	75
4.2.1.	Lungenfunktion (statische und dynamische Spirometrie).....	76
4.2.2.	Blasen-Detektion (Doppler-Ultraschall).....	78

4.2.3.	Kognitive Leistung (Gedächtnis- und Aufmerksamkeitstest)	83
4.2.4.	Vegetative Modulation der Herzfrequenz.....	86
5.	Zusammenfassung.....	89
5.1.	Summary	91
6.	Literatur.....	93
7.	Erklärungen zur Eröffnung des Promotionsverfahrens.....	105
7.1.	Erklärungen laut Anlage 1 zur Promotionsordnung.....	105
7.2.	Erklärungen laut Anlage 2 zur Promotionsordnung.....	106
8.	Anhang.....	107
8.1.	Beteiligte.....	107
8.2.	Kongressbeiträge und Seminare	108
8.3.	Abstracts	109
8.3.1.	Recreational SCUBA-diving with enriched air nitrox: pulmonary injury?	109
8.3.2.	Study for better understanding the effects of O ₂ -enriched air on bubble formation in recreational divers	109
8.3.3.	Cognitive performance during SCUBA-diving using O ₂ -enriched air	110
8.3.4.	Heart rate during recreational SCUBA-diving	111
8.4.	Veröffentlichungen	112
8.5.	Beiträge in Zeitschriften.....	112
8.6.	Danksagung	113

1. EINLEITUNG

Taucher werden von dem Reiz des in der Tiefe verborgenen Unbekannten angezogen. Dabei ermöglicht die Nutzung von Druckluftgeräten dem Menschen eine erhebliche Erweiterung des Aktionsradius und hierdurch vielzählige Einblicke und Eindrücke in eine verborgene Welt. Heutzutage wollen Taucher immer tiefer, immer länger, immer komfortabler, gleichzeitig aber mit weniger gesundheitlichen Risiken behaftet 'ins dunkle Blaue' abtauchen. Dieser sich ständig wachsender Beliebtheit erfreuende Sport hat eine enorme Maschinerie an Kommerz aber auch an Forschung und Entwicklung in Gang gesetzt. Dabei werden u.a. immer mehr Atemgasgemische kreiert, welche den unterschiedlichen Anforderungen gerecht werden sollen.

Luft ist das günstigste, älteste, am besten erforschte und am meisten verwendete Standardgasgemisch. Zusehends wird Luft jedoch von neueren Gasgemischen mit einem angereicherten Sauerstoff-Anteil verdrängt. Diese modernen Gemische, die nur Sauerstoff und Stickstoff enthalten, fallen unter den Sammelbegriff Nitrox (SUBEX, 2006). Ein weiteres Atemgasgemisch enthält zusätzlich Helium. Dieses Gemisch hält seit einigen Jahren als Trimix Einzug in das technische Tauchen (auch Technical Diving).

Um mit Nitrox und anderen Gemischen in Urlaubsgebieten tauchen zu dürfen, bedarf es weltweit Zusatzqualifikationen, die das Ablegen spezieller Prüfungstauchgänge und eine schriftliche Prüfung über das erlangte Wissen beinhaltet. Zertifizierungskurse werden von fast allen Tauchsportvereinen und Organisationen entgeltlich angeboten (z.B. Professional Association of Diving Instructors (PADI), Scuba Schools International (SSI), Confédération Mondiale des Activités Subaquatiques (CMAS)).

Die Begründung für die Sauerstoff-Anreicherung des Atemgases basiert auf der Überlegung, dass ein mit der Tauchtiefe ansteigender Stickstoff-Partialdruck (pN_2) eine narkotische Wirkung entfalten kann (Jennings, 1969; Bennett, 1969). Ab einer Tiefe von 30 m kann bei einem Volumenanteil von 79 % Stickstoff im Gasgemisch ein pN_2 von mehr als 3 bar erreicht werden. In der Folge kann sich im Einzelfall eine Stickstoffnarkose entwickeln (Lettnin, 1994; Braun et al., 2005). Daraus resultiert die Vorstellung, dass eine Verminderung des Stickstoffanteils im Gasgemisch den pN_2 in dem Maße reduziert, dass das Risiko einer Narkose oder das Auftreten von Tiefenrauschsymptomen gesenkt werden. Durch die Abnahme der narkotischen Wirkung des N_2 bei gleichzeitiger Verbesserung des O_2 -Angebots könnten außerdem die kognitiven Leistungen während des Tauchganges im Vergleich zur Druckluft verbessert werden (Behnke et al., 1935; Baddeley et al., 1968). Es ist bis heute aber nicht ausreichend geklärt, ob diese Erhöhung des Sauerstoffanteiles einen uneingeschränkten praktischen Nutzen bietet, oder ob sie mit gesundheitlichen Nachteilen für den Taucher verbunden ist.

1.1. Atemgase

Die Atemluft oder atmosphärische Luft setzt sich aus folgenden Gasanteilen zusammen. Die größte Fraktion ist Stickstoff (N_2 : 78,08 %) gefolgt von Sauerstoff (O_2 : 20,95 %) und Kohlendioxid (CO_2 : 0,03%). Weitere Gasfraktionen stellen z.B. die Edelgase Argon (Ar: 0,93 %) und Helium (He: 0,00053 %). Wegen der geringen Anteile spielen diese unter physiologischen und normobaren Bedingungen für den Gasaustausch eine untergeordnete Rolle, allerdings können unter erhöhtem Umgebungsdruck (z.B. beim Tauchen) funktionell relevante Partialdrücke erreicht werden (Lettnin, 1994).

1.1.1. Schädigung durch Sauerstoff

Sauerstoff (O_2) ist für den menschlichen Organismus essentiell. In der mitochondrialen Elektronentransportkette wird er nahezu vollständig unter Verbrauch von Reduktionsäquivalenten ($NADH + H^+$, $FADH_2$) in Oxidationswasser (H_2O) überführt. In diesem bipolaren Aggregatzustand ist er biologisch inert. Ein geringer Anteil des O_2 (man schätzt zwischen 1 und 3 %) wird jedoch im Rahmen der Zellatmung als Superoxid-Anion (O_2^-) frei gesetzt (Pohl, 2010). Die mitochondriale Atmungskette stellt quantitativ die Hauptquelle für die Sauerstoffradikalbildung dar. Weitere Quellen sind die NADPH-Oxidasen verschiedener Zelltypen und die Xanthin-Oxidase (Löffler, 2005).

Während eine geringe Konzentration von Superoxid-Anionen physiologisch durchaus relevant ist, wird üblicherweise ein Anstieg der Konzentration durch die katalytische Wirkung der Superoxiddismutase (SOD) verhindert. Dieses Enzym fördert die Bildung von Wasserstoffsuperoxid (H_2O_2), welches seinerseits durch das Enzym Katalase in H_2O und O_2 überführt wird. Zunahme des O_2 -Partialdrucks führt daher grundsätzlich zu einer gesteigerten Superoxid-Anionenbildung aus der mitochondrialen Atmung. Ein Teil dieser Superoxid-Anionen wird in Gegenwart von Metallionen (z.B. Eisenionen) in das besonders reaktionsfreudige Hydroxyl-Radikal (OH^\cdot) überführt (Fenton-Reaktion), wodurch Membranlipid-, Protein- und Desoxyribonukleinsäure-Oxidationen und Schäden an Proteoglykanen und Hyaluronsäure ausgelöst werden (Löffler, 2005; Pohl, 2010).

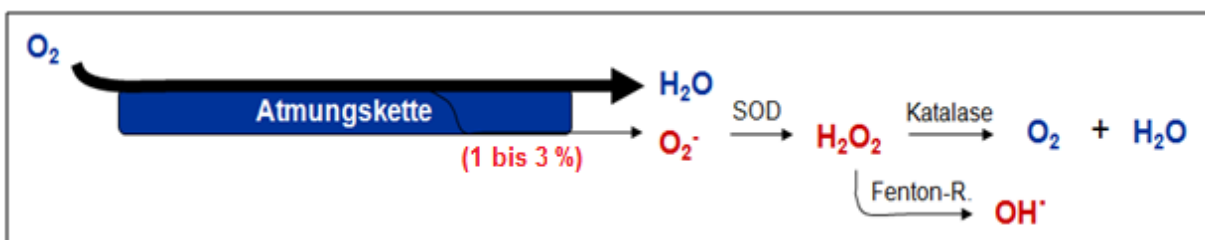


Abb. 1: Bei dem Verbrauch von Sauerstoff entstehen Wasser (H_2O) und Superoxid-Anionen (O_2^-). Über die Superoxiddismutase (SOD) wird daraufhin Wasserstoffsuperoxid (H_2O_2) gebildet welches durch die Katalase in H_2O und O_2 überführt wird oder über die Fenton-Reaktion Hydroxylradikale (OH^\cdot) entstehen lässt.

Oxidativer Stress bezeichnet ein gestörtes Gleichgewicht zwischen der Bildung von Sauerstoffradikalen und antioxidativen Schutzmechanismen der Zellen. Werden Zellen mit hyperbarem Sauerstoff (HBO) belastet, sind sie vermehrtem oxidativem Stress ausgesetzt, und es entstehen vermehrt Sauerstoffradikale (ROS: reactive oxygen species) (Narkowicz et al., 1993; Kot et al., 2003; Finne et al., 2008). Im Speziellen sind dabei das Hydroperoxid-Anion ($O_2^{\cdot-}$), Hydroxyl-Radikal ($HO\cdot$), Hydroperoxyl-Radikal ($HOO\cdot$), Peroxyl-Radikal ($ROO\cdot$), Alkoxy-Radikal ($RO\cdot$), Wasserstoffperoxyd (H_2O_2), Hydroperoxyd ($ROOH$), Ozon (O_3), Hypochlorit-Anion (OCl^-) und der Singulett-Sauerstoff (1O_2) zu nennen.

1.1.1.1. Sauerstoff-Radikale

Ein schädigender Effekt der vermehrten Konzentration an ROS besteht in der Lipidperoxidation und einer daraus resultierenden möglichen Zellmembranschädigung (Janero, 1990; Pelaia et al., 1995) oder Modifikation von Lipiden, die Signalstoffwirkung haben (Löffler, 2005). Außerdem treten Proteinoxidationen auf, wodurch z.B. Enzymwirkungen verändert werden oder integrale Membranproteine modifiziert werden (z.B. Ionenkanäle, Transporter, Ionenpumpen, Membranrezeptoren). Ein weiterer schädigender Effekt der ROS ist die Schädigung des Erbgutes durch Strangbrüche und Modifikationen von Basen an der Desoxyribonukleinsäure (DNS) (Löffler, 2005). Durch die Interaktion mit Sauerstoffradikalen entstehen auch metabolisch stabile Kleinmoleküle, über deren Nachweis in Körperflüssigkeiten oxidativer Stress quantifiziert werden kann.

Nach Hyperoxie-Exposition lassen sich z.B. erhöhte Konzentrationen an reaktiven O_2 -Metaboliten, Malondialdehyden (Benedetti et al., 2004) und Thiobarbitursäure (Thiobarbituric acid reactive substances; TBARS) im Blut nachweisen (Bearden et al., 1999). Hydroxybenzoate, Dihydroxybenzoate (DHB) und TBARS können auch im Urin mittels Hochdruck-Flüssigkeits-Chromatographie (HPLC) und elektrochemischer UV-Detektion nachgewiesen werden (Gronow et al., 2005). Zum Schutz vor ROS werden z.B. die Superoxiddismutase (SOD) und Katalase (CAT), Glutathion Peroxidase (GSH-Px) und viele weitere Antioxidantien (z.B. L-Ascorbinsäure [Vitamin C], α -Tocopherol [Vitamin E] und β -Carotin [Provitamin A]) benötigt, und von den Zellen z.T. auch verbraucht, um potentiell gefährliche ROS zu eliminieren und damit oxidativen Stress abzubauen (Siems et al., 1998; Bearden et al., 1999; Kot et al., 2003; Benedetti et al., 2004; Löffler, 2005; Bader et al., 2007).

Unter oxidativem Stress, wie er z.B. bei Zunahme des pO_2 auftreten kann, treten irreversible Schäden mit einer erhöhten osmotischen Fragilität der Blutkörperchen auf (Bearden et al., 1999). Auch ließ sich bei gesteigertem oxidativen Stress eine endotheliale Dysfunktion an den Arterien feststellen (Obad et al., 2010), wodurch eine Gefäßengstellung und eine Blutdrucksteigerung begünstigt werden.

Obleich die Radikalkettenreaktionen lange Zeit unbekannt waren, wurden bereits sehr früh pathologische Wirkungen im Zusammenhang mit gesteigerten Sauerstoffpartialdrücken bekannt. Diese Wirkungen betrafen insbesondere zwei unterschiedliche Organsysteme: das ZNS und die Lunge. Diese Wirkungen werden nach ihren Erstbeschreibern als Paul Bert-Effekt (1878) und Lorrain Smith-Effekt (1889) bezeichnet.

1.1.1.2. Paul Bert-Effekt

In Abhängigkeit von der Höhe des Sauerstoffpartialdruckes (pO_2) und der Expositionsdauer treten neurotoxische und meist reversible ZNS-Funktionsstörungen auf. Typische Bedingungen sind Partialdrücke ab 1,8 bar und Expositionszeiten länger als eine halbe Stunde (Lettnin, 1994). Die O_2 -Toxizität auf das ZNS ruft Symptome wie Lichtblitze, Tunnelblick, Tinnitus, Verwirrtheit, Erschöpfung, Übelkeit und Erbrechen hervor.

In der schwersten Komplikation können Krampfanfälle (Leitch, 1984; Muth & Radermacher, 2006) wie bei der Epilepsie auftreten (Donald, 1992). Ungünstige Umstände – starke körperliche Belastung, Dehydratation, Kälte, Hypoglykämie und Hyperkapnie – begünstigen das Eintreten der toxischen Effekte (Muth & Radermacher, 2006). Histopathologisch ähneln diese Hyperoxie-bedingten Strukturveränderungen denjenigen nach einer Bestrahlung (Schröder & Schneider-Bichel, 2010).

Das Risiko für das Auftreten dieser Toxizitäts-Symptome ist individuell verschieden. Aus diesem Grund wird bei Berufs- und Marinetauchern die O_2 -Verträglichkeitsgrenze durch einen Sauerstofftoleranztest geprüft. Dabei ist der Taucher in der Druckkammer reinem O_2 bei 2,8 bar über 30 min ausgesetzt. Während des Tests treten typischerweise Abnahmen der systolischen und diastolischen zerebralen Blutfluss-Geschwindigkeit (CBFV) auf (Koch et al., 2013). Diese werden wahrscheinlich über eine Elimination des vasodilatierenden Stickstoffmonoxids vermittelt. Man interpretiert dies als einen Mechanismus, über den das Gehirn vor einem ansteigenden pO_2 – und damit vor einem erhöhten oxidativen Stress – geschützt wird. Wird jedoch die O_2 -Toleranzgrenze erreicht, so steigt die CBFV vor dem Beginn eines Krampfanfalles typischerweise wieder an (Visser et al., 1996; Koch et al., 2008). Diese Durchblutungssteigerung ist möglicherweise Ausdruck einer frühzeitig lokal erhöhten neuronal-metabolischen Aktivierung. Zu diesem Zeitpunkt wird der Expositionstest abgebrochen. Geschieht dies nicht, tritt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ein Krampfanfall auf.

Viele dieser Symptome erwähnte Paul Bert bereits, und daher werden diese Symptome in der neuen Literatur als Paul Bert-Effekt zusammengefasst (Lettnin, 1994; Thalmann, 2007; Schröder & Schneider-Bichel, 2010). Einen Überblick über häufige Symptome gibt Tab. 1.

Tab. 1: Symptome der ZNS-Sauerstofftoxizität

Donald	Leitch	Butler and Thalmann		
1947	1984	1984	1986	1986
Convulsion	Convulsion	Light – Headedness	Nausea	Muscle twitching
Twitching of lips	Unconsciousness	Convulsion	Muscle twitching	Dizziness
Vertigo	Cyanosis	Tinnitus	Dizziness	Blurred vision
Nausea	Limb shaking	Apprehension	Tinnitus	Dysphoria
Respiratory Disturbances	Dizziness	Dysphoria	Dysphoria	Convulsion
Twitching of parts other than lips	Strenuous breathing	Blurred vision	Confusion	Aphasiaia
Sensations of abnormality	Auditory aura	Tunnel vision	Convulsion	Dyspnea
Visual Disturbances	Breathing disturbance	Disorientation	Decreased auditory Acuity	Paresthesias
Acoustic Hallucinations	Nausea	Lethargy	Aphasia	Nausea
Paraesthesiae	Dissociation	Dysphasia	Tingling	Lightheadedness
	Apnoea	Aphasia	Numbness	Air hunger
	Loud cry/groan	Eye twitching	Choking sensation	Tinnitus
	Malaise	Nystagmus	Amnesia	Confusion
	Headache/pulsation	Incoordination	Muscular rigidity	Muscular rigidity
	Apprehension		Lightheadedness	Irritability
	Amnesia		Poor concentration	Hypoacusis
	Facial twitch		Visual disturbances	Hyperacusis
	Lip tremor		Decreased mental alertness	Poor concetration
	Disorientation		Increased respiratory rate	Tunnel vision
N=388	N=35	N=28	N=33	N=59

Die Effekte sind in absteigender Reihenfolge ihrer Häufigkeit präsentiert. Die Daten wurden entnommen bei Donald, 1947; Leitch, 1984; Butler & Thalmann, 1984; Butler, 1986; Butler & Thalmann, 1986.

1.1.1.3. Lorrain Smith-Effekt

Die O₂-Toxizität an der Lunge wurde 1889 erstmals von Lorrain Smith beschrieben und später als Lorrain Smith-Effekt bezeichnet. Smith erforschte die schädigende O₂-Auswirkung auf die Lungenalveolen und den Surfactant, welche durch eine längere Exposition gegenüber hyperbarem Sauerstoff hervorgerufen wurde. Die Symptome beginnen mit Übelkeit, Müdigkeit, Schwindelgefühl, Orientierungs- und Leistungsschwäche, niedriger Atemfrequenz, erhöhtem Atemwiderstand, Lungenschmerzen und Engegefühl in der Brustgegend. Besonders gefährdet sind daher Taucher, die Nitrox-Gemische mit einem hohen O₂-Anteil verwenden (Smith et al., 1899; Anonymus, 1931; Clark & Lambertsen, 1970; Muth & Radermacher, 2006; Gienow & Gienow, 2010).

Die Toxizität des Sauerstoffs gegenüber dem Lungengewebe, äußert sich infolge der geringeren antioxidativen Abwehr, der Anfälligkeit für Infektionen und Entzündungen und der vermehrten ROS-Bildung besonders deutlich an der noch nicht ausgereiften Lunge (Saugstad, 2003). Zum Beispiel bei Frühgeborenen geht die maschinelle, O₂-angereicherte CPAP-Beatmung mit einem deutlichen Risiko, eine klassische broncho-pulmonale Dysplasie (BPD) zu entwickeln, einher (Kramer et al., 2010; Saugstad, 2010). Spätfolgen einer Sauerstoffbeatmung sind ein hyperreagibles Bronchialsystem, Asthma bronchiale und eine eingeschränkte Lungenfunktion (Muntau, 2009).

Es stellte sich daher grundsätzlich die Frage, ob eine Erhöhung des O₂-Gehaltes im Atemgas um einige Prozent die Lungenfunktion eines Gerätetauchers aufgrund der potentiell toxischen O₂-Eigenschaften beeinträchtigen kann. Die Beantwortung der Frage ist relevant, weil im Gegensatz zur ZNS-Toxizität die pulmonalen Schäden über die Zeit akkumulieren (Carraway & Piantadosi, 1999; Shykoff, 2008).

1.1.1.4. Vegetatives Nervensystem (Hämodynamik, Herzfrequenz)

Das vegetative Nervensystem (VNS) hat u.a. regulatorische Wirkungen auf die Haut und die Gefäße. Die Einflüsse des VNS sind daher oft über eine Frequenzspektrenanalyse mit Hilfe der Herzfrequenz-Variabilität untersucht worden, welche während eines Tauchganges nicht unbeeinflusst bleibt. Ob diese Beeinflussungen von schädigenden Nachwirkungen begleitet sind, bleibt bisher ungeklärt.

Hämodynamik und Herzfrequenz. Immersion und Submersion des Menschen in Wasser sind schon lange Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Das Blutvolumen wird hierbei wegen des Schwerkraftverlustes umverteilt und führt zu einem Anstieg des zentralen Blutvolumens (Arborelius et al., 1972; Risch et al., 1987a; Christie et al., 1990; Gabrielsen et

al., 1993). Zudem führt eine Kaltwasser-Immersion durch periphere Vasokonstriktion zu Erhöhung des intrathorakalen Blutvolumens (Bonde-Petersen et al., 1992).

Eine Immersion in Wasser bewirkt eine Erhöhung der Herzfüllung, des Schlagvolumens und des Herzzeitvolumens (Gauer, 1975; Miwa et al., 1996; Shiraishi et al., 2002). Diese regulatorischen Veränderungen legen nahe, dass vasomotorische und kardiale sympathische Aktivitäten unterdrückt werden und dass die parasympathische Aktivität erhöht wird (Lafay et al., 1997; Miwa et al., 1997; Neubauer et al., 2001; Molénat et al., 2004; Chouchou et al., 2009).

Unter hyperbarer Hyperoxie reduziert sich im Druckkammerversuch die Vorlast, ohne eine Reflextachykardie auszulösen, die linksventrikuläre Nachlast (mit verringerter Ejektionsfraktion) wird erhöht und die systolische Leistung vermindert (Neubauer et al., 2001; Molénat et al., 2004). Die verminderte Herzfrequenz wird dabei als Effekt einer erhöhten parasympathischen Aktivität des autonomen Nervensystems bei normobarer und hyperbarer Hyperoxie angesehen (Lund et al., 1999; Lund et al., 2000; Barbosa et al., 2010).

Die Zentralisation des Blutvolumens unter hyperbaren Bedingungen führt sowohl bei Immersion (Norsk et al., 1985) als auch im Druckkammerversuch (Miyamoto et al., 1991) zu einer verringerten Konzentration an Arginin-Vasopressin (AVP; ADH) im Blut, und zu einer Erhöhung des atrialen natriuretischen Peptids (ANP; ANF) und dadurch zu beschleunigter Diurese (Miyamoto et al., 1991). Zudem treten eine Reduktion des Plasmavolumens (PV) während eines Tauchganges und eine Hämokonzentration mit erhöhter Viskosität des Blutes ein. Nach dem Tauchgang sind das Hämoglobin (Hb), der Hämatokrit (Hk) und die Osmolarität erhöht (Bearden et al., 1999). Ein Abfall der Herzfrequenz unter Bedingungen der Immersion kann somit das Ergebnis der Kombination mehrerer Effekte sein (Norsk et al., 1985; Gauer, 1975; Risch et al., 1978b; Miwa et al., 1997).

In der vorliegenden Studie sollten daher zwei Atemgasgemische mit unterschiedlicher O₂-Anreicherung und deren vegetative Auswirkungen miteinander verglichen werden.

1.1.2. Schädigung durch Stickstoff

Gase können unter erhöhtem Druck während des Tauchganges in größerem Umfang in Flüssigkeiten und dadurch auch in Geweben des menschlichen Körpers physikalisch gelöst werden. Wird der Druck schneller als der Diffusionskapazität entsprechend reduziert, dann können sich Blasen im Gewebe entwickeln. Diese entwickeln sich am häufigsten durch gelöstes Inertgas, darunter ist der Stickstoff das Gas von Interesse (Doolette & Mitchell, 2001). Die aus dem Stickstoff entstandenen venösen Gas-Emboli (VGE) lassen sich dabei mittels gepulsten Doppler-Detektors nachweisen (Blatteau et al.,

2005). Es wird vermutet, dass diese Stickstoff-Blasen zudem aus Blasen-Vorläufern (Gas-Kerne) entstehen (Wisløff et al., 2004). Unter diesen Umständen entwickelt N₂ schädigende Effekte. Diese äußern sich nicht wie beim Sauerstoff durch ein direktes zelltoxisches Potential, sondern vielmehr durch seine Anreicherung im Gewebe.

Der als Isopressionsphase bezeichnete Abschnitt des Tauchganges ist im Wesentlichen für die N₂-Aufsättigung des Körpers verantwortlich. Im Gegensatz dazu führt die Dekompressionsphase, also der Aufstieg am Ende des Tauchganges, zu einer Entsättigung von Gewebe-Stickstoff und zur Gasblasenbildung in den Geweben und im Blut. Entstehen hierbei Mikroblasen im Gewebe, die nicht zur Lunge transportiert und dort abgeatmet werden, kann dies zu einer Dekompressionskrankheit (DCS) führen (Lettnin, 1994; Wisløff et al., 2004).

1.1.2.1. Dekompressionserkrankung

Die Dekompressionserkrankung (decompression illness; DCI) wird als akute dysbare Erkrankung verstanden, bei der es im Zusammenhang mit Veränderungen des Umgebungsdruckes zu einem Freiwerden von Gasen aus gelöstem Zustand kommt (Definition aus Klingmann & Tetzlaff, 2012). Diese Mikroblasen, die durch ausperlenden Stickstoff sowohl intravaskulär in Blutgefäßen als auch extravaskulär im Gewebe entstehen können, haben vielerlei schädigende Effekte (Vann et al., 2011). Diese Effekte werden als Dekompressionskrankheit (decompression sickness; DCS) bezeichnet und gleichen in der klinischen Symptomatik dem Krankheitsbild einer akuten oder langsam progredienten lokalen Ischämie.

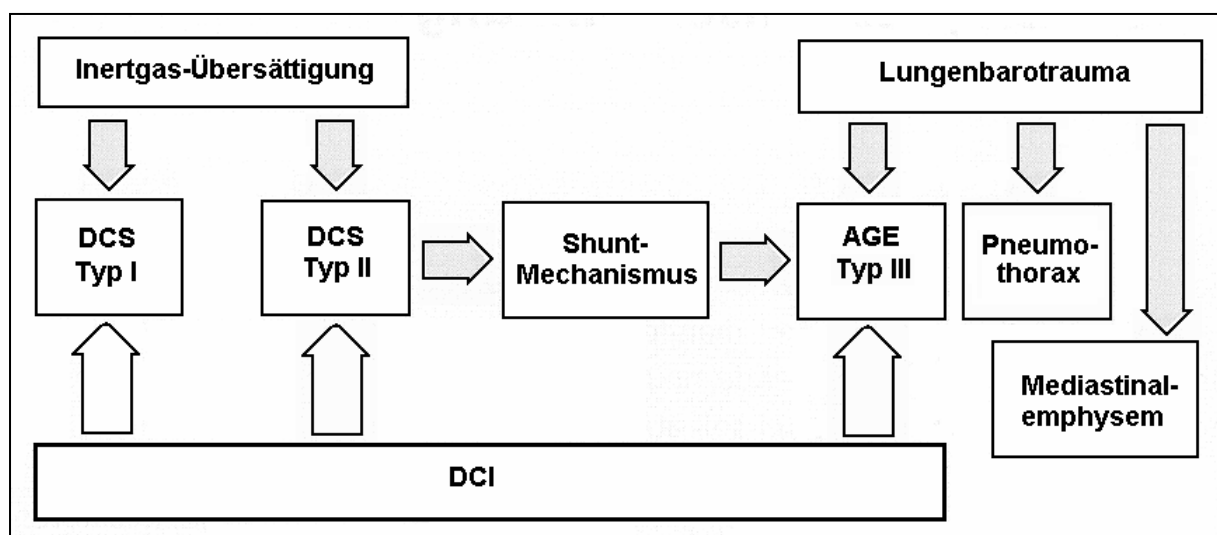


Abb. 2: Klassifikation von Tauchunfällen (mod. nach den Leitlinien der Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin (GTÜM). DCI: decompression illness; DCS: decompression sickness; AGE: arterielle Gasembolie.

Es werden drei DCS-Typen unterschieden:

Typ 1 äußert sich in Symptomen, die in der Haut als Pruritus ('Taucherflöhe'), im Bewegungsapparat (Muskulatur, Knochen und Gelenke) als 'bends', im Lymphsystem als Ödem und als Allgemeinsymptomatik wie Müdigkeit und Abgeschlagenheit auftreten. Typ 2 betrifft das Sehvermögen mit Amaurosis, das Innenohr mit einem Hörsturz oder Gleichgewichtsstörungen, das Herz-Kreislauf-System und die Lunge mit Atemnot, Brustschmerzen, Schock, Herzrhythmusstörungen und Bewusstlosigkeit, das Nervensystem (cerebral, cerebellär, spinal) mit Dys- und Parästhesien und Paralyse (Lettnin, 1994; Pokan et al., 2004; Klingmann & Tetzlaff, 2012). Typ 3 wird als fulminante Manifestation der DCS bezeichnet, welche durch ein pulmonales Barotrauma (PBT) mit arterieller Gasembolie (AGE) gekennzeichnet ist. Die AGE entsteht demnach durch eine Lungenüberdehnung die zu einem zentralen Lungenriss führt, bei dem Alveolar-Luft Zugang über einen Shunt-Mechanismus zum Gefäßsystem gewinnt. Übertretende Luftblasen können dann ein Mediastinalephysem, und weitaus schlimmer, embolische Verschlüsse in allen arteriell versorgten Organen hervorrufen; insbesondere in den Endarterien des Rückenmarks, des Gehirns oder auch der Herzkranzgefäße. Dadurch treten vermehrt progrediente neurologische Folgeschäden auf, die sich auch unter hyperbarer Therapie nicht immer bis zur restitutio ad integrum bessern (DCS-Einteilung aus Klingmann & Tetzlaff, 2012).

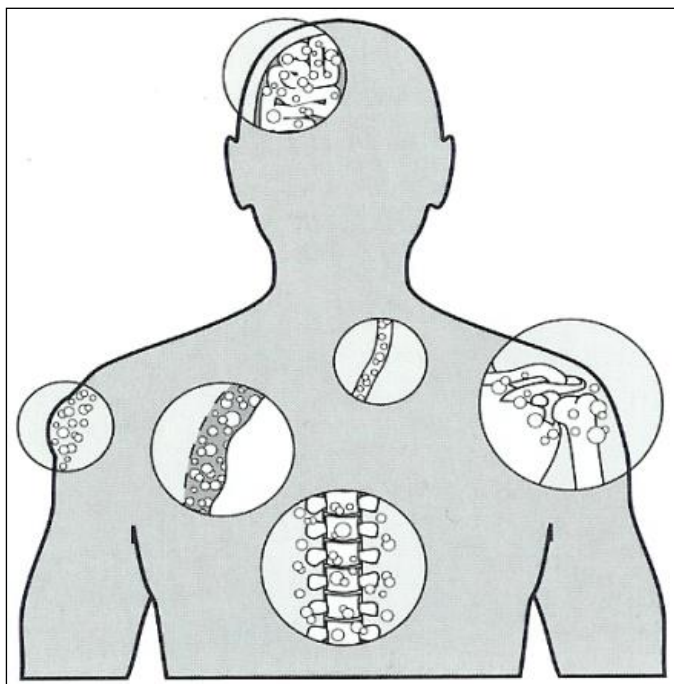


Abb. 3: *Prädilektionsorte von Mikroblasen im menschlichen Körper. Dargestellt sind die Kompartimente: ZNS, Wirbelsäule/ Rückenmark, Gefäße, Haut, Lunge, Gelenke und Knochen; entnommen und modifiziert von (Clark, 1998)*

Körperliche Anstrengungen unter Wasser, 'Jojo'-Tauchgänge, Aufstiegs-
geschwindigkeit, Lebensalter, Dehydratation, Übergewicht und körperliche Fitness, Alkohol,
Wiederholungstauchgänge, Auskühlung des Körpers beim Tauchen und zu schnelle
Wiedererwärmung nach dem Tauchgang sind modulierende Faktoren, die die Blasenbildung
beeinflussen und die Entstehung einer DCS fördern (Lettnin, 1994; Broome et al., 1995;
Bühlmann et al., 2002; Carturan et al., 2002; Klingmann & Tetzlaff, 2012).

Doch nicht jede Mikrobubble ruft eine klinische Symptomatik hervor. Nicht
symptomatische Mikrobubbles werden als 'silent bubbles' bezeichnet (Behnke, 1951). Daher
sollte in dieser Studie untersucht werden, ob die Anzahl der Inertgas-Blasen im venösen Blut
beim Nitrox-Tauchen gegenüber Druckluft verringert ist.

1.1.2.2. Stickstoffnarkose

Unabhängig vom Problem der Gasblasenbildung hat der unter normobaren
Bedingungen inerte Stickstoff unter hyperbaren Bedingungen euphorisierende und die
intellektuelle Leistungsfähigkeit beeinträchtigende Eigenschaften, die bis zu einer
narkotisierenden Wirkung oder Stickstoffnarkose führen können (Lettnin, 1994). Daher ähnelt
er in der Wirkung alkoholischen Genussmitteln (z.B. Wein, Bier, Likör) und stark wirksamen
psychotropen Substanzen (z.B. Marihuana, Heroin, diverse Arzneimittel).

Die molekularen und zellulären Mechanismen, die zu diesen Symptomen führen,
sind bis heute nicht geklärt. Nach gängiger Hypothese beruht die Stickstoffnarkose auf einer
Änderung der elektrischen Zellmembranpotentiale infolge des N₂-Überangebotes, wodurch
bei Erreichen einer kritischen N₂-Ansammlung Potenziale nicht mehr übertragen werden (so
genanntes „critical volume concept“ nach Klingmann & Tetzlaff, 2012).

Als beeinträchtigt durch einen erhöhten pN₂ gelten psychomotorische Fähigkeiten,
die intellektuelle Leistungsfähigkeit, z.T. auch die Fingerfertigkeit, die Konzentration und das
Kurzzeitgedächtnis (Behnke, 1935; Baddeley et al., 1968; Williamson et al., 1989; Lettnin,
1994).

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln angesprochen wurde, kann demnach ein
erhöhter pO₂ schädlich für das ZNS sein und eine Verringerung des pN₂ möglicherweise die
Beeinträchtigung der kognitiven Leistungsfähigkeit reduzieren. Daher wurden während des
Tauchganges auch kognitive Fähigkeiten (Gedächtnis- und Aufmerksamkeitstest) unter-
sucht.

1.1.3. Therapieansätze durch Sauerstoff

Im Gegensatz zu den bisher angesprochenen schädigenden Effekten des Sauerstoffes wird der hyperbaren Sauerstofftherapie (HBO-Therapie) bei der Behandlung von Tauchunfällen und einer Reihe weiterer Erkrankungen ein primär kausales therapeutisches Potential zugesprochen. Zu diesen Erkrankungen zählen: Problemwunden (Kranke et al., 2004; Löndahl et al., 2011), Brandwunden (Cianci et al., 1988), Gasbrand (Hart & Strauss, 1990), Fournier-Gangrän (Zamboni et al., 1990), gestörte Transplantat- und Implantat-Einheilung, Knochenheilung (Eid & El Sayed, 2011; Tripathi et al., 2011; Mutlu et al., 2012), aseptische Knochennekrose (Camporesi et al., 2010), Osteomyelitis (Yu et al., 2011), Fibromyalgie-Syndrom (Yildiz et al., 2004), retinale Arterienokklusion (Cope et al., 2011; Menzel-Severing et al., 2012), altersbedingte Makuladegeneration (Weiss, 2010), akuter Tinnitus und Hörsturz (Dundar et al., 2007), idiopathischer plötzlicher sensorisch-neuraler Hörverlust (ISSHL) (Fujimura et al., 2007), Bestrahlungs-Spätfolgen mit interstitieller Zystitis (Tanaka et al., 2011), Migräne- und Cluster-Kopfschmerz (Bennett et al., 2008), Kohlenmonoxyd-Vergiftung (Piantadosi, 2002).

Bei der HBO-Therapie atmen die Patienten in Überdruckatmosphäre (Druck ca. 2,4 bar) medizinisch reinen Sauerstoff per Maske ein. Durch die HBO-Therapie können bis zu 7 % Sauerstoff (= Steigerung um das 20-fache über den Norm-Wert) in physikalisch gelöster Form über das Blut zum Gewebe transportiert werden, um daraus einen therapeutischen Nutzen zu ziehen (Bader & Koch, 2007; Edwards, 2010). Ziel ist es, den zellulären pO_2 so weit zu steigern, dass O_2 -verbrauchende Reaktionen ablaufen können. Hierzu zählt die Aufrechterhaltung der oxidativen Phosphorylierung zur Energieversorgung der Zellen. Zum anderen werden durch die Steigerung des pO_2 die lokalen Wachstumsbedingungen für anaerobe Keime verschlechtert.

So zeigte sich in Experimenten an Ratten ein neuroprotektiver Effekt durch dosisabhängige HBO-Therapie bei akuter, transientser, fokaler Ischämie (Eschenfelder et al., 2008). Dies könnte durch ein verbessertes Überleben von Zellen in der Ischämierandzone durch Steigerung des pO_2 erklärt werden. Erfolge ergaben sich auch bei der septischen Schock-Behandlung von iatrogen induzierter, fäkaler Peritonitis bei Schweinen (Barth et al., 2008).

Polyneuropathie, Ischämie und Infektionen sind die pathophysiologischen Faktoren der diabetische Fuß-Ulzeration (DFU) (Caputo et al., 1994). Die DFU gehört zu den genannten Problemwunden, welche 4–10 % der Diabetiker betrifft. Sie ist eine der Hauptkomplikationen (Reiber et al., 1996), die zu einer 15 % höheren Amputationsrate bei Diabetikern führt (Most & Sinnock, 1983). Die DFU kann heute erfolgreich mittels HBO-Therapie behandelt werden und damit der Zeitpunkt der Amputation verzögert werden (Kranke et al., 2004; Löndahl et al., 2011).

Daher lässt sich sagen, dass die HBO-Therapie zum einen als Adjuvans zum anderen als anerkannte Therapieoption oder auch zur Prognoseverbesserung bei verschiedensten Krankheiten eingesetzt wird. Der therapeutische Nutzen muss die möglichen schädigenden Nebenwirkungen übertreffen. Trotz aller medizinischen Ansätze der HBO-Therapie sollten negative Auswirkungen einer hyperbaren Hyperoxie, die sowohl durch einen Tauchgang als auch durch eine Therapie ausgelöst werden können, nicht außer Acht gelassen werden.

1.2. Ziel der Studie

Es wurden Effekte untersucht, die aufgrund eines auf 28 % Sauerstoff angereicherten Atemgases (air28) gegenüber normaler Druckluft resultieren könnten. Dafür führten Freiwillige Tauchgänge im offenen Wasser durch. In den Zweiergruppen verwendete jeweils ein Taucher air28 und der andere Druckluft. Die Nutzung des jeweiligen Atemgemisches war dem Taucher unbekannt. Die folgenden vier von der Ethikkommission genehmigten Aspekte von möglichen, durch air28 verursachten Veränderungen wurden untersucht:

- Lungenfunktion vor und nach Beendigung des Tauchganges (statische und dynamische Spirometrie),
- Auftreten von Inertgas-Blasen im Kreislauf nach dem Tauchgang (Doppler-Ultraschall),
- kognitive Leistung während des Tauchganges (Gedächtnis- und Aufmerksamkeitstest),
- vegetative Modulation der Herzfrequenz während des Tauchganges.

Im Zusammenhang mit diesen vier Aspekten sollten vier spezifische Hypothesen getestet werden.

1. Die Lungenfunktion nach dem Tauchgang ist bei Tauchen mit air28 stärker eingeschränkt als bei Tauchen mit Luft.
2. Die Verwendung von air28 reduziert die Bildung von venösen Inertgas-Blasen im Vergleich zu Tauchen mit Luft.
3. Die kognitiven Leistungen der Taucher sind bei Verwendung von air28 besser gegenüber der Verwendung von Luft.
4. Die Abnahme der Herzfrequenz während des Tauchganges ist bei Tauchen mit air28 stärker ausgeprägt.

2. TEILNEHMER, MATERIALIEN UND METHODIK

2.1. Teilnehmer

Damit sich die Ergebnisse auf die Gruppe der heutigen Freizeit-Taucher übertragen ließen, sollten die an der Studie teilnehmenden Freiwilligen möglichst repräsentativ sein. Es wurde angenommen, dass alle Taucher, die ärztlicherseits als tauchfähig eingestuft worden waren, grundsätzlich auch teilnahmefähig waren. Somit wurden z. B. auch Raucher und Übergewichtige mit Tauchfähigkeitsbescheinigung in die Studie einbezogen. Der Gesundheitszustand in der heutigen Gruppe von Tauchern entspricht den Prävalenzen in der Gesamtpopulation auf der Basis der Häufigkeiten der Volkskrankheiten wie Asthma, Hypertonie und Diabetes mellitus (Piepho et al., 2008).

Ohne Einbeziehung von Probetauchgängen wurden insgesamt 117 Probanden für die Studie rekrutiert. Von diesen nahmen schließlich 108 an der Studie teil. Die restlichen 9 Probanden sagten kurzfristig aufgrund von Magen-Darmbeschwerden oder Ohrenscherzen ab. Die Daten von 108 Teilnehmern konnten in vollem Umfang ausgewertet werden, und keiner brach innerhalb der Studie ab. Von den 108 Teilnehmern waren 88 Urlaubstaucher, 11 Angestellte der SUBEX-Tauchbasis und 9 Studenten des Red Sea Environmental Center (RSEC).

2.1.1 Rekrutierung

Vor Beginn der eigentlichen Untersuchungen wurden die medizinischen Messgeräte unter den gegebenen Umgebungsbedingungen getestet. Außerdem wurde in einer Bucht (= El Quadim Bay) eine geeignete Tauchroute ausgewählt. Um die Durchführbarkeit der Versuchsschritte zu prüfen und sie gegebenenfalls zu optimieren, wurden 5 Probetauchgänge mit jeweils 2 Tauchern absolviert. Die dabei aufgetretenen organisatorischen und technischen Probleme konnten bis zum Beginn der Studie weitestgehend behoben werden. In dieser Vorbereitungszeit wurde bereits bei den Gästen einer großen Hotelanlage mit ca. 250 Betten und den Gästen einer assoziierten Tauchbasis für die Teilnahme an einer tauchmedizinischen Studie geworben (Abb. 4).

Die Urlaubsgäste des Hotels und die Tauchgäste der Tauchbasis konnten sich über die 'tauch'-klimatischen Bedingungen, Neuigkeiten und geplante Aktivitäten in der Hotellobby und direkt an der SUBEX-Tauchbasis informieren. Hier wurden auch die Aushänge platziert, mit denen um die Teilnahme an der Studie geworben wurde.



Abb. 4: Informationssäule in der Tauchbasis in El Qusier. An dieser Säule wurde für alle Hotelgäste gut ersichtlich und ausführlich auf die Studie hingewiesen. Foto: Brebeck

Die Interessensbekundungen an der Studie wurden von den Mitarbeitern der Tauchbasis an die Versuchsleiterin weitergeleitet, wodurch schnell und effizient Teilnehmer für eine Vormittags- oder eine Nachmittagsgruppe rekrutiert werden konnten. Zuerst wurde mit jedem Interessierten ein Vorgespräch durchgeführt, in dem die einzelnen Themengebiete und der geplante Ablauf erläutert wurden. Hierbei wurde auch über die zufällige Zuteilung des Gasmisches informiert. Jeder Teilnehmer wurde über den voraussichtlichen Zeitaufwand informiert sowie darüber, dass er zu jeder Zeit die Teilnahme abbrechen konnte. Nach Kenntnisnahme wurde die Einwilligungserklärung unterschrieben, und im Falle der Zusage wurden die demographischen Daten erhoben.

2.1.2. Ein- und Ausschlusskriterien

Die teilnehmenden Freiwilligen mussten vier Einschlusskriterien erfüllen:

(1) Ihr Alter musste zwischen 18 und 70 Jahren liegen. (2) Sie mussten eine ärztliche Tauchtauglichkeits-Untersuchung vorweisen. (Es wurde nicht in Frage gestellt, ob die Tauglichkeit zu Recht ausgestellt worden war). (3) Den Teilnehmern mussten die während des Tauchganges durchzuführenden kognitiven Tests noch unbekannt sein. (4) Die Teilnehmer mussten wegen der kognitiven Tests die deutsche Sprache fließend beherrschen.

Kinder und Taucher, welche als Anfänger eingestuft wurden, wurden nicht in die Studie eingeschlossen. Vermutlich wären diese beiden Gruppen während des Tauchganges stärker als erfahrene Taucher mit ihrer Ausrüstung und den Umgebungsbedingungen beschäftigt gewesen. Ein hierbei erhöhter Luftverbrauch hätte darüber hinaus einen 1-h Tauchgang unmöglich machen können. Ein weiteres Ausschlusskriterium war eine niedrige Tauchscheinklasse (Brevetierung), welche Tauchgänge bis auf eine Tiefe von 25 m nicht zuließ.

2.1.3. Soziodemographische Daten

Neben den personenbezogenen Daten wie Geburtsdatum, Geschlecht, Größe und Gewicht (zur Berechnung des BMI) wurde der Raucherstatus erfasst. Als Nichtraucher galt, wer nie oder seit mehr als 5 Jahre nicht geraucht hatte.

Um Rückschlüsse auf vorhandene Krankheiten ziehen zu können, wurde auch dokumentiert, welche Medikamente die Teilnehmer regelmäßig einnahmen. Dabei wurden auch Nahrungsergänzungsmittel und Vitaminpräparate erfasst.

Die tauchspezifischen Informationen sollten helfen, die Taucherfahrung in den beiden Gruppen abzuschätzen und sie auf ihre Homogenität zu überprüfen. Es wurden die Gesamtzahl der Tauchgänge, die Anzahl der Tauchgänge > 25 m, der tiefste Tauchgang und die Tauchjahre festgehalten. Zu den Tauchjahren zählte jedes Jahr, in welchem mindestens ein Tauchgang gemacht wurde. Außerdem wurde der derzeitige Ausbildungsstatus erfasst. Festgehalten wurde ebenfalls, ob der Teilnehmer bereits einen Dekompressionsunfall oder Symptome eines solchen hatte.

Leider konnten nicht Taucher aller Nationen teilnehmen, da die kognitiven Tests die Kenntnis der deutschen Sprache erforderlich machten. Teilgenommen haben daher außer Deutschen auch Schweizer und Österreicher. Diese drei Länder stellten auch die meisten der tauchenden Urlaubsgäste der Hotelanlage.

Es wurde vermerkt, ob ein Teilnehmer mit einer 15 l oder einer 12 l Flasche tauchte und weiterhin die zugehörige Flaschennummer, die später zur Identifizierung des Atemgasgemisches diente.

2.2. Materialien

Im Bereich des Sporttauchens werden Nitrox-Gemische bis zu einem O₂-Anteil von 40 % (= Nitrox40) verwendet. In der vorliegenden Studie wurde air28 (= Nitrox28) aus zwei Gründen verwendet: (1) Für dieses Atemgasgemisch ist keine zusätzliche Brevetierung notwendig. (2) Es besteht im Sinne der O₂-Toxizität keine offensichtliche Gefährdung durch den gegenüber Druckluft nur moderat erhöhten pO₂ (ca. 50 mmHg bei Wasserdampf-sättigung und 37 °C).

2.2.1. SUBEX air28

SUBEX air28 wurde von Johann Vifian lanciert. Dieses Atemgas hat einen Sauerstoffanteil von 28 % und einen Stickstoffanteil von 72 %. Seit Saisonbeginn 2006 werden auf den SUBEX-Basen alle Taucher standardmäßig und ohne Aufpreis mit diesem Atemgas versorgt. Für das Tauchen mit air28 wird von SUBEX keine Zusatzausbildung verlangt, da dieses Atemgas nicht in die Grenzbereiche führt, die eine Nitrox-Brevetierung erforderlich machen.

Unter Einhaltung der für Sporttaucher maximal empfohlenen Tauchtiefe von 40 m (= 5 bar) und damit unter Berücksichtigung eines maximalen pO₂ von 1,4 bar ergeben sich nach SUBEX folgende Vorteile bei der Verwendung von air28: vermindertes Risiko in Bezug auf N₂-Sättigung und N₂-Entsättigung, vermindertes Risiko einer Inertgasnarkose (Tiefenrausch) und verkürzte Flugverbotszeiten.

2.2.2. Doppel-Verblindung der Atemgase und Randomisierung

Die Durchführung aller Tauchgänge und der verschiedenen Untersuchungen oblag der Versuchsleiterin. Für die Doppel-Verblindung wurden mehrere Maßnahmen eingehalten, da die Tauchflaschen der SUBEX-Tauchbasis entweder mit air28 (Kennzeichnung nach DIN: schwarz/weiß) oder mit einem Nitroxgemisch (Kennzeichnung nach DIN: grün/weiß) befüllt werden (Abb.5). Dies hätte eine Verblindung jedoch unmöglich gemacht.

Für die Studiengruppen wurden 4 einheitlich schwarz/weiß gekennzeichnete Flaschen bereitgehalten; zwei 12 l- und zwei 15 l-Flaschen. Jeweils eine der beiden gleich großen Flaschen wurde mit 21 % (= Luft) und die andere mit 28 % O₂ (= air28) befüllt. Damit konnten die Teilnehmer sich eine dem eigenen Gasverbrauch angepasste Flaschengröße wählen. Die für die Studie vorgesehenen Flaschen wurden getrennt von den nicht für die Studie verwendeten Flaschen gelagert, um Verwechslungen für Unbeteiligte auszuschließen. Die jeweils geordneten Flaschen wurden mit dem Transportwagen zum Steg gebracht und standen dort für den Studientauchgang bereit.



Abb. 5: Lagerort der befüllten Tauchflaschen, von denen die Studienflaschen getrennt aufbewahrt wurden, um Verwechslungen für Unbeteiligte auszuschließen. Foto: Brebeck

Zur Randomisierung der Teilnehmer wurde bei identischer Flaschengröße das jeweilige Atemgemisch erst auf dem Steg zufällig verteilt. War sie jedoch unterschiedlich, wurde vom Kompressorpersonal festgelegt, ob die 15 l- oder die 12 l-Flasche 21 % O₂ enthalten sollte. Nach jedem Studientauchgang wurde ein neues Flaschenquartett bereitgestellt. Die Studienleiterin hatte zum Zeitpunkt des Tauchgangs keine Kenntnis vom Flascheninhalt.

An der Schulter jeder Tauchflasche befand sich eine für die Wartung der Flaschen relevante Nummerierung. Durch eine vom Kompressorpersonal geführte Befüllungsliste wurde sichergestellt, dass die für die Studie befüllten Flaschen immer identifizierbar waren und dem jeweiligen Atemgemisch zugeordnet werden konnten. Ausschließlich das Kompressorpersonal hatte Einsicht in diese Befüllungsliste. Damit waren sowohl die Teilnehmer als auch die Versuchsleiterin bezüglich der Gasauswahl verblindet.

Die Flaschennummern wurden den Teilnehmern erst auf dem Steg vor Beginn des Studientauchganges mitgeteilt. Dort bestand keine Möglichkeit mehr, die O₂-Konzentration zu analysieren. Nach Beendigung des Tauchganges wurden die Flaschen dem Kompressorpersonal zurückgegeben, auch dort wurde der Inhalt nicht überprüft. Erst nach Ablauf aller Untersuchungen konnte die Flaschenbefüllung erfragt werden.

2.3. Tauchgang

2.3.1. Ort, Umgebungsbedingungen und Zeitraum

Die Studien-Tauchbasis lag nahe der ägyptischen Küstenstadt El Qusier. Diese befindet sich auf der Höhe von Luxor am nördlichen Roten Meer (Abb. 6; 26° 6' 14" N, 34° 16' 52" O) und damit ca. 145 km südlich des touristisch erschlossenen Landstreifens der Stadt Hurghada. Als privates Hausriff wurde die El Quadim Bay genutzt. In dieser mittelgroßen Bucht wurden alle Studientauchgänge durchgeführt. Der Studienzeitraum erstreckte sich über 8 Wochen im Herbst 2009.

In diesem Zeitraum waren die Studienbedingungen sehr stabil. Die durchschnittliche Meerestemperatur lag bei 28-29 °C und die Umgebungstemperatur bei ca. 30 °C. Die Luftfeuchtigkeit schwankte leicht zwischen ca. 60–75 %, und es fiel kein Niederschlag.

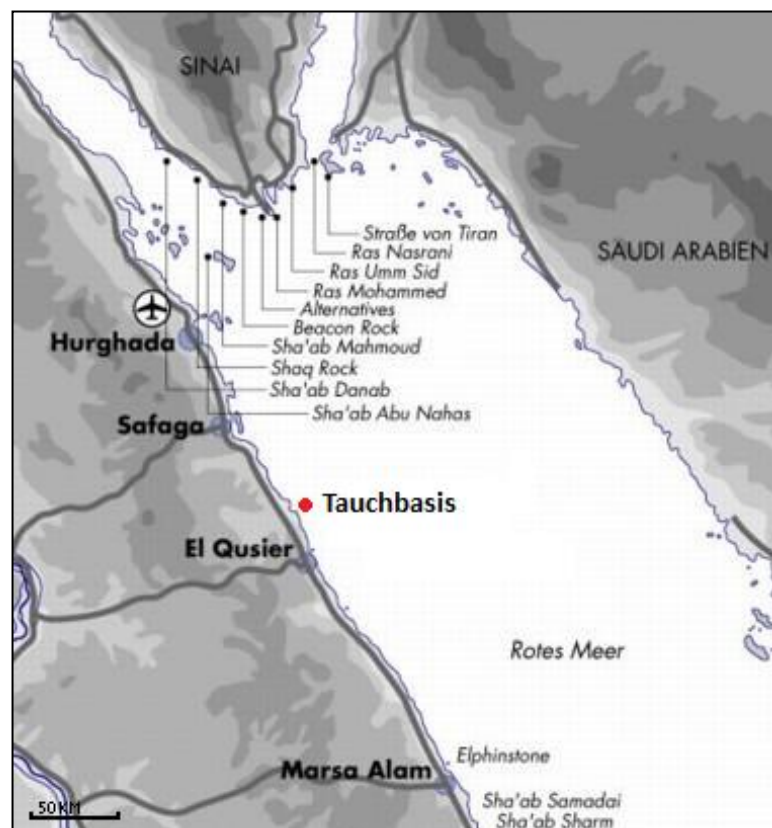


Abb. 6: Karte des nördlichen Roten Meeres. Die Tauchbasis befand sich wenige Kilometer nördlich der Stadt El Qusier. Entnommen und modifiziert von www.nautilus-tauchreisen.de

2.3.2. Tauchgebiet - El Quadim Bay

Dieses Tauchgebiet befand sich aus ökologischer Sicht in einem sehr guten Zustand. Innerhalb der Bucht war der Fischfang verboten, und das Anlegen von Booten war nur an den dafür vorgesehenen Bojen und am Steg erlaubt. Mit Hilfe des 75 m langen Steges ließ sich das Riffdach vom Strand bis zur Riffkante zu Fuß überqueren. Am Stegende befand sich die Absprungplattform für den Einstieg in das Wasser und eine Leiter für den Ausstieg aus dem Wasser (Abb. 7).

Für die Studie unbedeutend, nicht jedoch für die Beliebtheit der Bucht bei tauchenden Urlaubsgästen, war der Artenreichtum in der Bucht. Zwischen 3 m und 25 m Tiefe wurden 153 verschiedene Fischarten aus 97 Gattungen und 40 Familien gezählt. Vom Riffdach bis in 30 m Tiefe ließen sich 144 Arten Steinkorallen, 4 Arten Hydrokorallen und 15 Gattungen Weichkorallen unterscheiden (Heiss et al., 2005).

Die für die Studie relevante und betauchte Riffkante lag im Nordwesten der Bucht und konnte ohne Bootnutzung von den Studiengruppen direkt über den Steg erreicht werden. Nach gegenseitigem Bodycheck wurde der Studientauchgang auf der geplanten Tauchroute begonnen.



Abb. 7: Steg an der nordwestlichen Buchtseite. Am Ende des Steges befand sich eine bequem zu besteigende Leiter. Hier begannen und endeten alle Tauchgänge. Foto: Brebeck

2.3.3. Tauchroute

Nach dem Sprung ins Wasser wurde der mit einer Gesamtdauer von ca. 60 min geplante Tauchgang begonnen. Dabei suchte die Studienleiterin mit der Zweiergruppe zuerst eine Sandfläche auf 23 m Tiefe auf. Diese lag östlich des Riffes nahe einem mit Korallen bewachsenen Felsen. Die Sandfläche bot ausreichenden Platz zum Hinknien. An dieser Stelle wurde mit dem Ersten von zwei kognitiven Testabschnitten begonnen. Dort wurde der Gedächtnistest begonnen und der Aufmerksamkeitstest vollständig durchgeführt. Die Sandfläche ist in Abb. 8 mit dem Punkt 1 rot markiert.

Vor dem zweiten kognitiven Testabschnitt erfolgte eine 30-minütige Tauchgangsphase. Der Tauchgang wurde jedoch aufgrund der Nullzeitgrenze und des erhöhten Luftverbrauches in dieser Tiefe in einem flacheren Gebiet entlang der nördlich ausgerichteten Riffkante fortgeführt.

Innerhalb dieser Phase wurde darauf geachtet, dass beide Taucher dieselbe Tauchtiefe einhielten, die sich in der Regel zwischen 13 und 15 m befand. Jedoch war es den Teilnehmern gestattet, zur Beobachtung der Unterwasserfauna zu verharren und auch zu fotografieren. Der Tauchgang sollte, abgesehen von den Phasen der kognitiven Tests, so 'normal' wie möglich gestaltet werden.

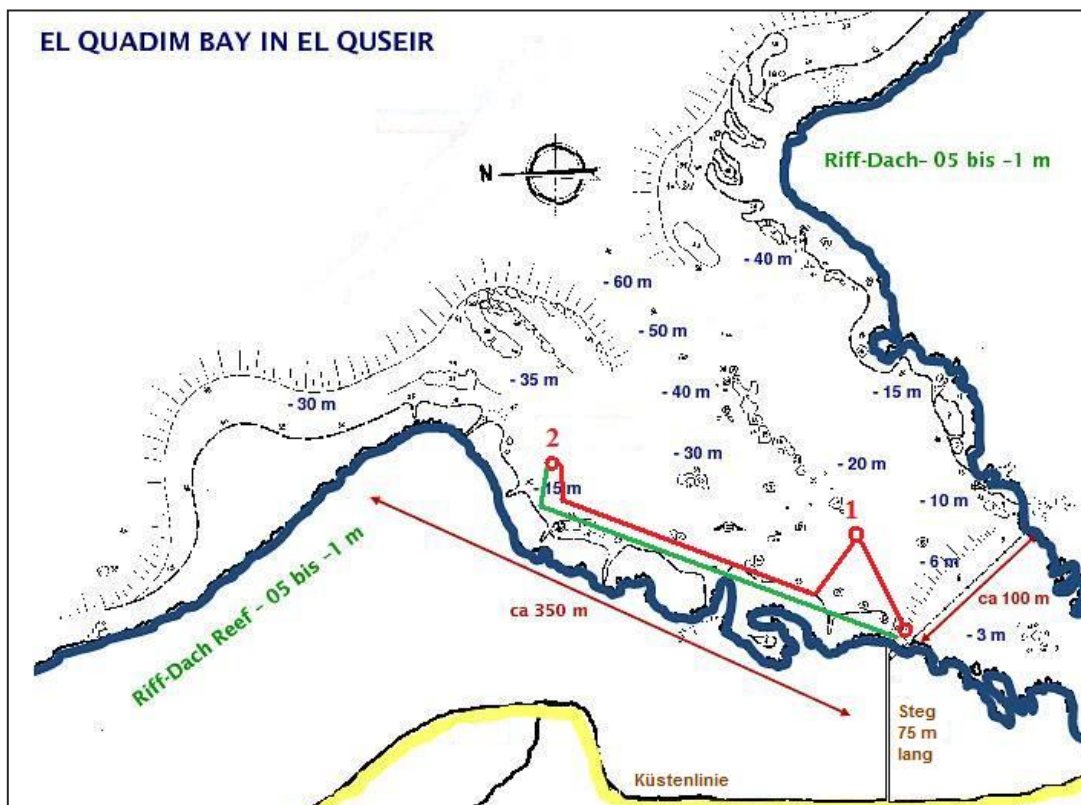


Abb. 8: Karte der El Quadim Bay in El Quseir, rot markiert wurde der Abschnitt des Tauchganges, in dem kognitive Tests durchgeführt wurden, oder in dem eine mentale Belastung bestand. Grün markiert ist der Rückweg / das Auftauchen.

entnommen und modifiziert von www.renemueller.ch

Am Punkt 2, dem Umkehrpunkt der Tauchroute, (Abb. 8) wurde der Gedächtnistest vervollständigt. Auch dort befand sich eine Sandfläche, welche für die drei Personen der Tauchgruppe Platz zum Knien bot. Die Sandfläche lag ebenfalls auf ca. -23 m.

Nach Abschluss aller Tests wurde der Rückweg in südwestlicher Richtung angetreten (grüne Linie in Abb. 8). Aus der Tiefe von 23 m wurde langsam mit dem Aufstieg zur Oberfläche begonnen bis letztendlich der Steg wieder erreicht war.

2.4. Datenerfassung und Zeitmanagement

In einem 5-min Briefing wurden der Ablauf der Studie und der Tauchgang besprochen. Die Zweiergruppe wurde hierbei zur engagierten Teilnahme aufgefordert.

Für die direkt im Anschluss stattfindende erste Lungenfunktionsprüfung wurden insgesamt 30 min eingeplant, wodurch pro Taucher jeweils 15 min für die gesamten standardisierten Untersuchungen zur Verfügung standen. Vor dem Anziehen der Tauchanzüge wurden die Pulsgurte der Tauchcomputer angelegt.

Die Teilnehmer hatten dann ca. 15 min Zeit, um sich anzukleiden und ihre Ausrüstung bereitzulegen. Die Montage des Tauchgerätes fand wegen der weiten Strecke (75 m) erst auf der Plattform am Ende des Steges statt (Abb. 7). Dort wurde bei der Vergabe der Tauchflaschen auch das jeweilige Atemgemisch zufällig zugeteilt. Für das Montieren der Ausrüstung, das Befestigen der Studientauchcomputer am Flaschenhals und den Bodycheck wurden ebenso 15 min benötigt.

Die Gesamtzeit des Tauchganges betrug standardisiert ca. 60 min. Während des Tauchganges wurden die beiden kognitiven Unterwassertests zu definierten Zeitpunkten durchgeführt. Nach Beendigung des Tauchganges hatten die Teilnehmer 30 min Zeit für die Versorgung der Ausrüstung und zum Duschen.

Direkt im Anschluss daran fand die Untersuchung mit dem Gefäß-Doppler-Ultraschall in zwei Intervallen statt. In Anlehnung an die Literatur (Dujic et al., 2005; Blatteau et al., 2007; Castagna et al., 2011; Blatteau et al., 2012) wurde das erste Intervall auf 30 bis 45 min nach dem Tauchgang und das zweite Messintervall auf 45 bis 60 min nach dem Tauchgang festgelegt. Daran schloss sich die Lungenfunktionsprüfung mit wiederum 30 min an; Sie entsprach umfänglich derjenigen vor dem Tauchgang.

In einem abschließenden Debriefing wurden Logbucheinträge geschrieben und andere formale Dinge erledigt. Auf Wunsch wurde den Studienteilnehmern das verwendete Atemgas genannt und erste Messergebnisse mitgeteilt und erklärt.

2.4.1. Lungenfunktion (statische und dynamische Spirometrie)

Zur Messung wurde das Jaeger MasterScope TP-Spirometer der Fa. CareFusion (San Diego, USA) verwendet. Das Gerät wurde mit der vom Hersteller entwickelten JLAB Software an einem Notebook betrieben. Die Daten der Referenzgruppe wurden der Publikation von Quanjer et al. (1994) entnommen. Es handelt sich bei dem Spirometer um ein Medizinprodukt, welches für den Einsatz am Menschen zugelassen ist (Klasse IIa: CE 0123, DHF 681493). Das Gerät war mittels Manual Calibration Syringe kalibriert. Die Volumenabweichung betrug 0,25 %. (Abb. 9)



Abb. 9: MasterScope Spirometer angeschlossen an ein Notebook. Es wurde jeweils vor und nach dem Tauchgang für die Lungenfunktionstests verwendet. entnommen von www.carefusion.com

Die Lungenfunktionsdiagnostik wurde standardisiert vor und nach dem Studientauchgang durchgeführt, um zum einen Kontrollwerte ohne den möglichen Einfluss von hyperbarem Sauerstoff zu erhalten und um zum anderen den möglichen Einfluss des mit O₂ angereicherten Atemgemisches zu prüfen. Zur Orientierung wurden die bereits bestehenden Standardisierungsschemata verwendet (Miller et al., 2005; Wanger et al., 2005).

Bei den spirometrischen Untersuchungszyklen wurden statische und dynamische Variablen erhoben.

Für das Atemmanöver der statischen Spirometrie wurde aus der Ruheatmung über die Atemruhelage hinaus so tief wie möglich langsam maximal ausgeatmet (expiratorisches Reservevolumen; ERV-Manöver), langsam maximal eingeatmet (VC_{in}) und anschließend langsam erneut maximal ausgeatmet (VC_{ex}), um die Vitalkapazität (VC) eines Probanden zu messen (Abb. 10). In Abb. 11 wird dieses Atemmanöver durch einen Probanden dargestellt.

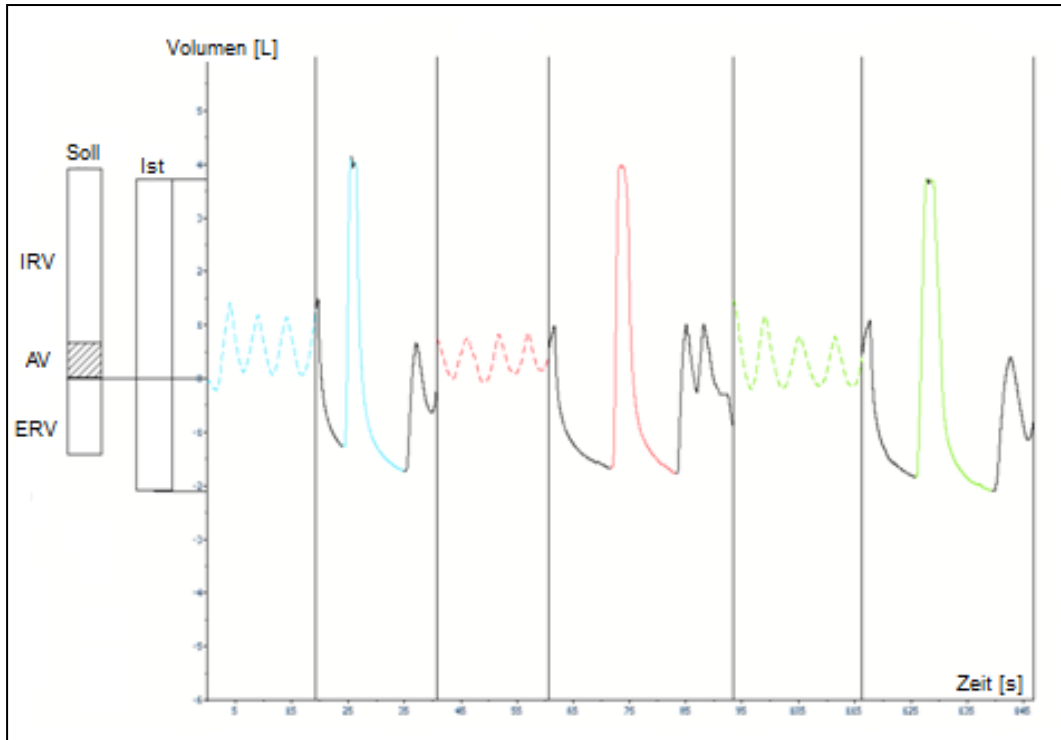


Abb. 10: Das Atemmanöver der statischen Spirometrie wurde dreimal wiederholt, und der jeweilige Bestwert wurde zur Auswertung herangezogen. Die Darstellung erfolgt als Volumen (Ordinate) in Abhängigkeit von der Zeit (Abszisse).

IRV: insp. Reservevolumen; AV: Atemzugvolumen; ERV: exp. Reservevolumen; Vitalkapazität (VC): IRV+ AV+ ERV. Die Sollwerte wurden nach Eingabe des Geschlechts, der Größe und dem Geburtsdatum des jeweiligen Probanden vom Messsystem vorgegeben.



Abb. 11: Atemmanöver in der Phase der maximalen Inspiration. Foto: Brebeck

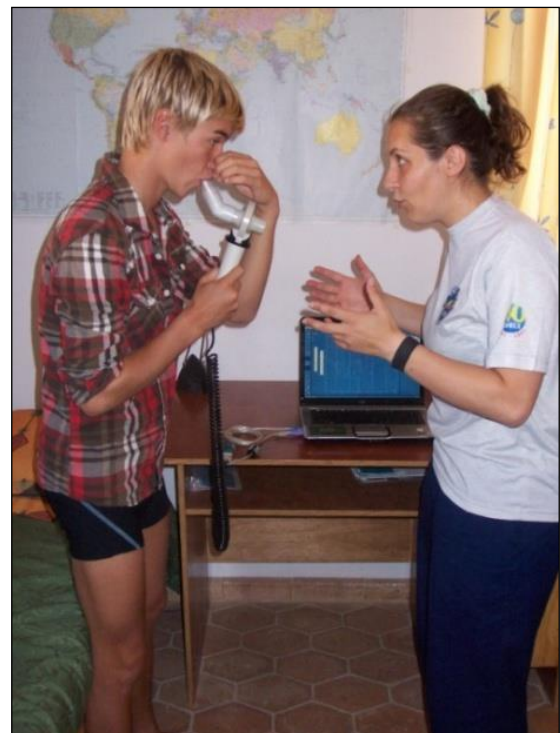


Abb. 12: Atemmanöver der dynamischen Spirometrie Foto: Brebeck

Bei der dynamischen Spirometrie wurde aus der Normalatmung langsam maximal ausgeatmet (ERV), wieder langsam maximal eingeatmet (VCin) und anschließend so schnell und so vollständig wie möglich ausgeatmet. Anhand der dynamischen Expirationskurve wurden die folgenden Indizes bestimmt: forciertes expiratorisches Volumen nach 1 s (FEV1), die expiratorischen Flüsse bei 25%, 50%, 75% der maximalen Vitalkapazität (MEF25, MEF50, MEF75), die forcierte Vitalkapazität (FVC) und der peak expiratory flow (PEF). Danach wurde normal weitergeatmet. Das Atemmanöver, welches in Abb. 12 dargestellt ist, wird in Abb. 13 als Fluss-Volumen-Diagramm abgebildet.

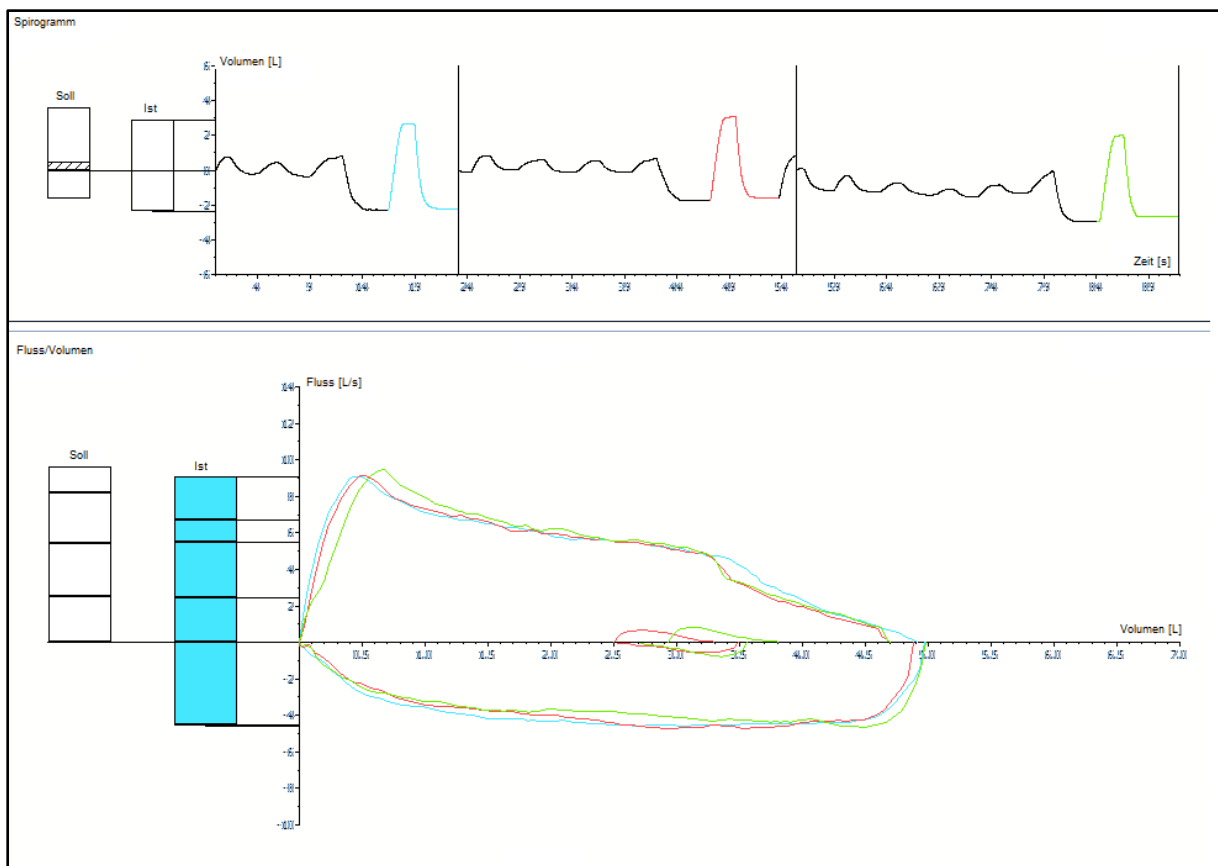


Abb. 13: Typische Darstellung von drei nacheinander folgenden Fluss-Volumen-Kurven zur dynamischen Spirometrie. Die obere Abbildung zeigt die Atemmanöver als Funktion der Zeit. In der unteren Abbildung sind die Daten als Fluss (Volumenänderung in Abhängigkeit von der Zeit, Ordinate: Fluss in L/s in Abhängigkeit vom Volumen (Abszisse) dargestellt.

Als weitere dynamische Messung wurde der Atemgrenzwert bei kurzfristiger willkürlich maximal beschleunigter und vertiefter Ventilation bestimmt. Der Sollwert liegt unabhängig von Alter und Geschlecht durchschnittlich bei ca. 160 l/min. Über Veränderungen des Atemgrenzwertes können globale Störungen der Atemmechanik erfasst werden.



Abb. 14: Atemmanöver zur Atemgrenzwertbestimmung. Dieses Manöver wurde einmalig und im Sitzen durchgeführt. Foto: Brebeck

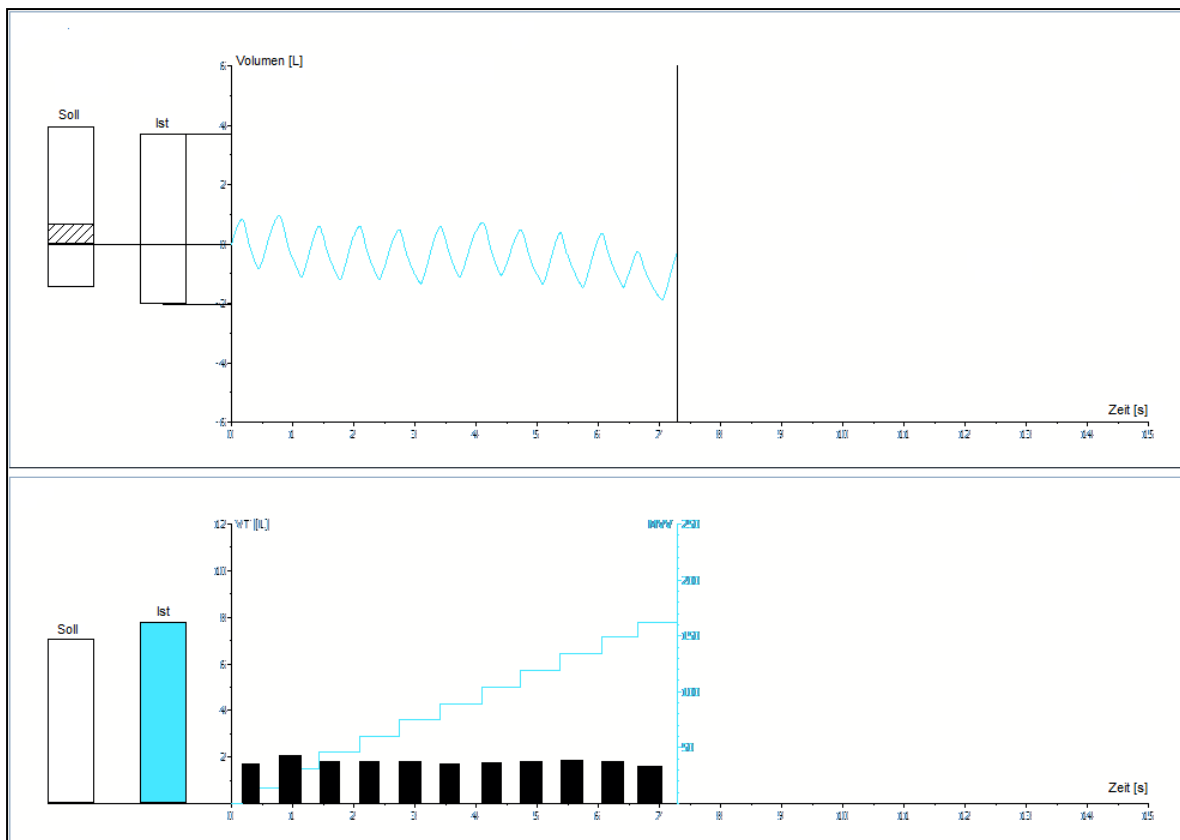


Abb. 15: Typisches Beispiel für eine Registrierung des Atemgrenzwertes. In der oberen Abbildung ist die Ventilation als Funktion der Zeit dargestellt. Im unteren Bild sind die einzelnen Atemvolumina durch die schwarzen Rechtecke wiedergegeben. Das über die Zeit kumulativ ventilierte Volumen ist die blaue Kurve. In dieser Registrierung führte der Proband 11 Atemzüge in etwa 7 s aus. Das ventilierte Volumen wurde dann auf eine Minute extrapoliert.

Bei allen Atemmanövern wurde das Handspirometer vom Teilnehmer in einer Hand gehalten. Zur Absicherung gegenüber unkontrolliertem Luftverlust wurde die Nase mit der anderen Hand manuell verschlossen.

Die statische und die dynamische Spirometrie wurden sowohl vor als auch nach dem Tauchgang jeweils drei Mal wiederholt und im Stehen ausgeführt. Bei der Bestimmung des Atemgrenzwertes mittels Hyperventilation kommt es zu einer starken Reduktion des $p\text{CO}_2$ im Blut. Dies kann über eine zerebrale Vasokonstriktion zu einer Bewusstseinstörung führen. Daher erfolgte die Atemgrenzwertbestimmung vor und nach dem Tauchgang jeweils nur einmal im Sitzen. Dieses Vorgehen erschien auch deswegen angeraten, weil aufgrund der erhöhten Luftfeuchtigkeit, der nicht abschätzbaren Dehydrierung der Teilnehmer und möglicherweise vorhandener Vorerkrankungen kein zusätzliches Risiko eines 'Kreislaufkollapses' eingegangen werden sollte. Während der Untersuchungen wurden die Teilnehmer zur maximal möglichen willentlichen Leistung motiviert.

Auswertung. Von den drei durchgeführten Atemmanövern der statischen und der dynamischen Spirometrie wurde in den beiden Gruppen jeweils der beste erreichte Wert in die Auswertung einbezogen. Zusätzlich wurde der Einfluss des Sauerstoffes auf die Lungenfunktion anhand der Oxygen Tolerance Units (OTU) und Units of Pulmonary Toxicity Dose (UPTD) berechnet und der Einfluss des Rauchens berücksichtigt.

Die Bestimmung des Atemgrenzwertes stellt ein integrales Maß für obstruktive und restriktive Lungenfunktionsstörungen dar. Er ist auch sehr stark von der subjektiven Motivation des Probanden abhängig. In der vorliegenden Studie wurde er daher verwendet um festzustellen, ob der jeweilige Teilnehmer nach dem Studientauchgang über das normale Maß hinaus ermüdet oder antriebsarm und somit die Leistungsfähigkeit eingeschränkt war.

2.4.2. Blasen-Detektion (Doppler-Ultraschall)

Als Messgerät wurde der Dopplerdetektor ES-1000SPII mit einem 5M5S Schallkopf (Hadeco, Kawasaki, Japan) verwendet. Das Gerät wurde mit einem Laptop verbunden, um das Ultraschallsignal zur direkten akustischen Bewertung auf Kopfhörer zu übertragen und die auftretenden Signale zeitgleich für die spätere Auswertung aufzunehmen. (Abb. 16)

Der Dopplerdetektor empfängt Ultraschallsignale, welche von den Blasen stammen, die mit dem Blut transportiert werden. Es können Blasen ab einem Durchmesser $>19 \mu\text{m}$ detektiert werden (Hills & Butler, 1981).



Abb. 16: Das Hadeco ES-1000SP11 angeschlossen an den Schallkopf 5M5S mit welchem die Gefäß-Doppleruntersuchungen durchgeführt wurden. entnommen von www.kdd1.com

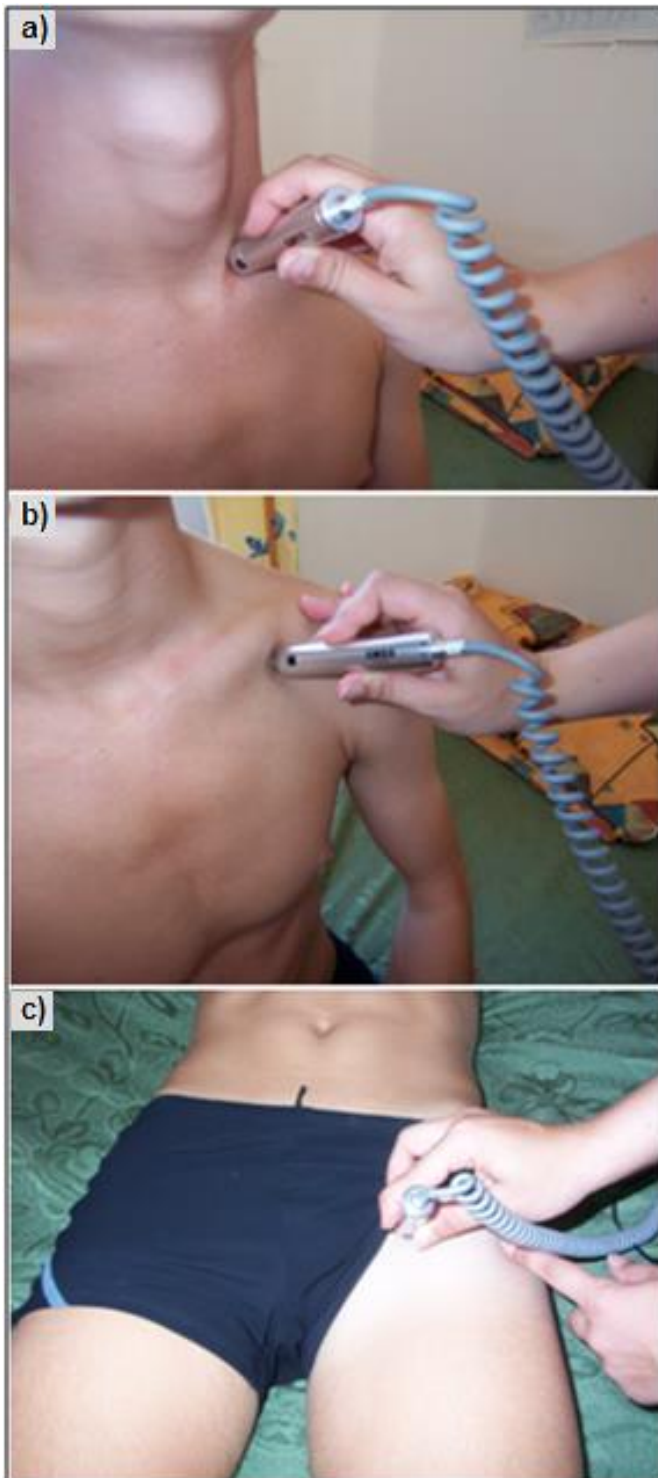
Wird der Ultraschallstrahl an zirkulierenden Blasen reflektiert, ertönt ein akustisches Signal, welches entweder einer einzelnen Blase oder Blasendusche entspricht. Eine Blase verursacht dabei ein eher klackendes Geräusch, wohingegen eine Blasendusche eher ein Rauschen/Knistern produziert. Als Blasenketten wird ein übermäßiges Auftreten von Blasen, kaum einzeln detektierbar, bezeichnet. Kardiologische Signale sind bei diesen herzfernen Messungen und durch die Abfolge der vielen Einzelblasen nicht mehr wahrnehmbar. Die Lautstärke des Signals wird einerseits durch die Nähe zum Schallkopf moduliert und könnte zudem auf die Größe einer Blase hinweisen. Es wurden in dieser Studie nur die Häufigkeit und die Charakteristik, nicht jedoch die Intensität des Signals bewertet.

Die Untersuchungen fanden in zwei Intervallen nach dem Tauchgang statt. Eine Untersuchung vor dem Tauchgang wurde nicht durchgeführt. Unter normobaren Bedingungen ohne vorausgehenden Tauchgang sind erfahrungsgemäß keine N₂-Blasen nachweisbar.

In früheren Studien war ein Blasenmaximum innerhalb der ersten 60 min nach dem Tauchgang nachgewiesen worden (Dujic et al., 2005; Blatteau et al., 2007; Castagna et al., 2011; Blatteau et al., 2012). Daher lagen in dieser Studie das erste Intervall zwischen der 30. und 45. min und das zweite Intervall innerhalb der 45. und 60. min nach dem Tauchgang.

Durch die Messung an drei verschiedenen anatomischen Lokalisationen sollten Unterschiede in der Blasenanzahl in Abhängigkeit vom Versorgungsgebiet nachgewiesen werden. Es bestand die Vorstellung, dass solche Unterschiede zwischen bewegter und unbewegter Muskulatur und zwischen fettarmen und fettreichen Geweben des menschlichen Körpers bestehen würden.

Gemessen wurde daher an folgenden Gefäß-Lokalisationen:



a) Im Trigonum scalenovertebrale wurde die V. jugularis interna vor dem Zusammenstrom mit der V. subclavia zur V. brachiocephalica beschallt, um den Rückstrom der Inertgas-Blasen aus dem Kopf festzuhalten und damit aus einem Versorgungsgebiet ohne arbeitende Muskulatur aber hohem Fettgehalt zu untersuchen (Abb. 17a).

b) An der V. subclavia im Trigonum clavipectorale wurden die Ultraschall-signale des Blasen-Rückstroms aus dem Arm erfasst. Dieses Versorgungsgebiet umfasst zwar muskelreiche Regionen, diese werden jedoch bei einem üblichen Tauchgang nur wenig eingesetzt (Abb. 17b).

c) Zuletzt wurde an der V. femoralis die Gas-Blasenzahl aus dem Abstromgebiet eines Beines untersucht. Diese Lokalisation ist repräsentativ für ein Versorgungsgebiet, in dem Muskelgewebe während des Tauchgangs umfangreich arbeitet (Abb. 17c).

Abb. 17 a, b, c: Die drei Gefäß-Lokalisationen: V. jugularis interna, V. subclavia und V. femoralis (von oben nach unten), an welchen Blasenengeräusche gemessen und aufgenommen wurden. Die Untersuchungen der Messlokalisationen a) und b) erfolgten im Sitzen und c) im Liegen. Fotos: Brebeck

Vor jeder Messung wurden die Probanden aufgefordert, für die jeweilige Messlokalisierung spezifische gymnastische Übungen durchzuführen. Sie mussten mehrmalige Kopfwendungen durchführen (Messlokalisierung a), die Arme so bewegen, als würden sie boxen oder einen Gegenstand schütteln (Messlokalisierung b), und anschließend mit den Beinen auf den Boden stampfen und einige Male hochspringen (Messlokalisierung c). Diese Bewegungen sollten dazu dienen, an der Glykokalix der Gefäßwand hängende Blasen zu lockern, damit sie frei im Blutgefäß zirkulierten.

Während der erste Teilnehmer mit dem Dopplerdetektor untersucht wurde, musste der andere ruhig sitzen. Bei welchem Teilnehmer die Ultraschallsignale zuerst gemessen wurden, wurde willkürlich festgelegt, jedoch wurde diese Reihenfolge auch für das zweite Intervall beibehalten. Für jede Messung und gymnastische Übung wurden ca. 2 min pro Proband benötigt. Nach Abschluss der drei Messungen folgte ein Wechsel des Probanden. Nach Durchführung des ersten Intervalls folgte nach einer kurzen Pause das zweite Messintervall.

Auswertung. Die allgemeine Blasenauswertung erfolgte nach den derzeit geläufigen Scores. Dabei wurden mehrere Einteilungsschemata wie z.B. der Zusammenschluss der drei Messlokalisationen zu einem Gesamtindex (V. jugularis + subclavia + femoralis) oder die absolute Blasenanzahl für jedes Gefäß einzeln (jugularis, subclavia, femoralis) zur Berechnung verwendet. Zudem wurden mögliche Unterschiede zwischen beiden Intervallen geprüft sowie Berechnungen zur Häufigkeit von Blasenduschen und ein Vergleich der Versorgungsgebiete unter Berücksichtigung aller drei Messlokalisationen durchgeführt.

Um die Einflussfaktoren auf die Blasen-Untersuchung zu erfassen, wurden zusätzliche Daten wie Geschlecht, Taucherfahrung und Body-Mass-Index (BMI) der Probanden verarbeitet.

Zur Quantifizierung der Untersuchungsergebnisse wurden die Spencer- Verteilung, die Spencer-Skala und die erweiterte Spencer-Skala (Spencer & Clarke, 1972; Spencer, 1976) verwendet. Zur Verdeutlichung der Unterschiede und Gemeinsamkeiten sind die für die Studie verwendeten Scores in Tab. 2 bis 4 dargestellt.

Tab. 2: *Spencer-Verteilung mit 5 Graden*

Grad	Definition
0	keine Inertgasblasen nachweisbar
1	Inertgasblasen treten sporadisch auf ($n < 1/s$) (< 30 BS)
2	Inertgasblasen sind periodisch/ kontinuierlich nachweisbar ($n < 1/s$) (< 60 BS)
3	Kontinuierliche Inertgasblasen ($1/s < n < 5/s$) (Dauerblasengeräusche und >60 BS)
4	Übermäßiges Auftreten von Blasen, kaum einzeln detektierbar, kardiologische Signale sind nicht mehr wahrnehmbar. (=BK)

BS: Blasensignal, BK: Blasketten

Tab. 3: *Spencer-Skala mit 5 Graden*

Grad	Definition
0	keine Blasen-Signale
1	bis zu 5 Blasen-Signale über eine Aufzeichnungszeit von einer min (≤ 5 BS)
2	bis zu 30 Blasen-Signale über eine Aufzeichnungszeit von einer min (≤ 30 BS)
3	nahezu durchgängige Blasen-Signale und Blasen-Duschen über eine Aufzeichnungszeit von einer min (≤ 50 BS+BD)
4	kontinuierliche Blasen-Signale über eine Aufzeichnungszeit von einer min, mit kontinuierlichen Blasen-Duschen (> 50 BS+BD)

BS: Blasensignal, BD: Blasenduschen

Tab.4: *Erweiterte Spencer-Skala mit halben Skalierungsschritten*

Grad	Definition
0	keine Blasen-Signale
0,5	1-2 sporadische Blasen-Signale über eine Aufzeichnungszeit von einer min
1	bis zu 5 Blasen-Signale über eine Aufzeichnungszeit von einer min (≤ 5 BS)
1,5	bis zu 15 Blasen-Signale über eine Aufzeichnungszeit von einer min, mit Blasen-Duschen (≤ 15 BS+BD)
2	bis zu 30 Blasen-Signale über eine Aufzeichnungszeit von einer min (≤ 30 BS)
2,5	mehr als 30 Blasen-Signale über eine Aufzeichnungszeit von einer min, mit Blasen-Duschen (> 30 BS+BD)
3	nahezu durchgängige Blasen-Signale und Blasen-Duschen über eine Aufzeichnungszeit von einer min (≤ 50 BS+BD)
3,5	kontinuierliche Blasen-Signale über eine Aufzeichnungszeit von einer min, mit zahlreichen Blasen-Duschen (> 50 BS+BD)
4	kontinuierliche Blasen-Signale über eine Aufzeichnungszeit von einer min, mit kontinuierlichen Blasen-Duschen (=BK)

BS: Blasensignale, BD: Blasenduschen, BK: Blasketten

2.4.3. Kognitive Leistung (Gedächtnis- und Aufmerksamkeitstest)

Zur Überprüfung der kognitiven Leistungen wurde der Verbale Lern- und Merkfähigkeitstest (VLMT; Helmstaedter et al., 2001) mit Kurzzeit- und Langzeitgedächtnis (short und long delay) und der Zahlenverbindungstest (ZVT; Oswald & Roth, 1970) eingesetzt. Die Tests wurden zur Verwendung unter Wasser modifiziert und während des Tauchganges standardisiert durchgeführt (Abb. 18).

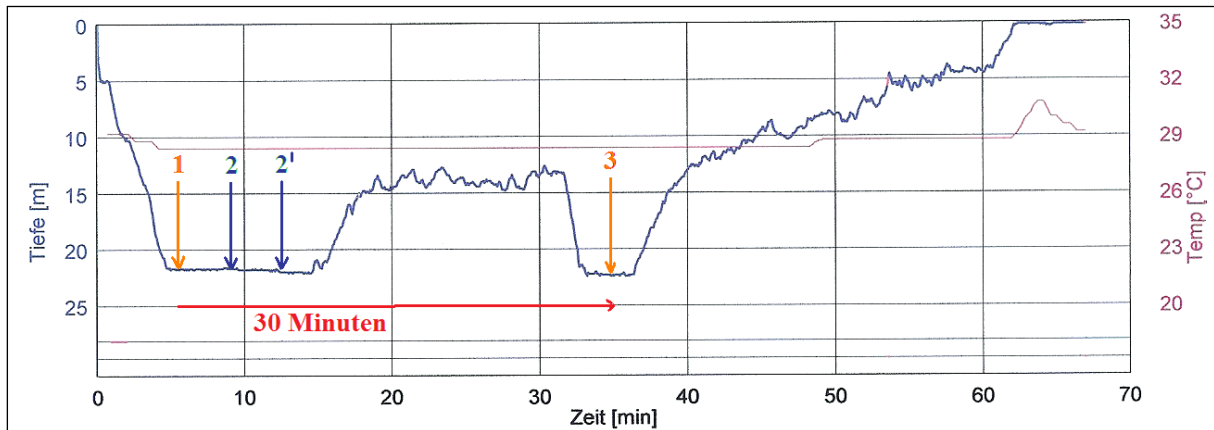


Abb. 18: Die gelben Pfeile zeigen das short delay (1: sofort) und long delay (3: 30 min später) des Lern- und Merkfähigkeitstests an, die blauen Pfeile (2, 2') zeigen den Beginn des Zahlenverbindungstests, welcher mit Taucher 1 und danach mit Taucher 2 durchgeführt wurde.

VLMT. Unter Normbedingungen über Wasser werden 15 semantisch unabhängige Wörter der Begriffsliste vorgelesen. Dabei ist eine Wortdarbietung, ohne Akzente oder veränderte Betonung, im 2-s Rhythmus vorgeschrieben, wodurch sich Funktionen des expliziten (deklarativen) episodischen Gedächtnisses überprüfen lassen (Helmstaedter et al., 2001). Dadurch sind verschiedene mnestic Aspekte wie Merkspanne, Lernzuwachs, Störanfälligkeit und Langzeitkonsolidierung prüfbar.

Zur Unterwasser-Durchführung des Tests erfolgte eine Modifikation zu einem 'Visuellen Lern- und Merkfähigkeitstest'. Dabei hatten die Probanden insgesamt 30 s Zeit, um die 15 Begriffe von der Tafel abzulesen und sich einzuprägen. Nach Ablauf der Zeit mussten die Tafeln wieder abgegeben werden. Das short delay Gedächtnis wurde direkt im Anschluss geprüft. Jeder Proband konnte ohne zeitliche Begrenzung alle Begriffe mit einem Bleistift auf eine unbeschriebene Acrylplatte schreiben. Circa 20 s nachdem der jeweilige Proband den letzten erinnerten Begriff aufgeschrieben hatte, wurden die Platten zurückgegeben (Abb. 18, gelber Pfeil; Nr. 1).

Abweichend vom vorgeschriebenen Überwasser-VLMT-Protokoll wurde das long delay Gedächtnis nach einer ablenkenden Tauchphase von 30 min durchgeführt. Störwortlisten, welche semantisch oder phonematisch ähnliche Distraktorwörter enthalten, wurden nicht verwendet. Die Tafeln mit den 15 Begriffen wurden dabei nicht erneut gezeigt (Abb. 18, gelber Pfeil; Nr. 3).

Bei dem modifizierten VLMT wurden die Unterlagen gleichzeitig an beide Probanden ausgehändigt (Abb. 19). Die Worttafeln wurden nach dem Lesen wieder eingesammelt. Zusätzlich, um die Gefahr der Manipulation unter den teilnehmenden Studiengruppen zu reduzieren, wurden zwei gleichwertige Worttafeln wechselweise eingesetzt.



Abb. 19: Gleichzeitige Übergabe der Acrylplatten des Visuellen-Lern-und-Merk-Tests zur Bestimmung der Gedächtnisleistung an die Taucher. Foto: Brebeck

ZVT. Dieser Test fand zwischen dem short delay und dem long delay des modifizierten VLMT statt. Er sollte – so wie das Korallenriff und die Artenvielfalt der Fauna – gleichzeitig zur Ablenkung von der Liste mit den 15 Begriffen dienen.

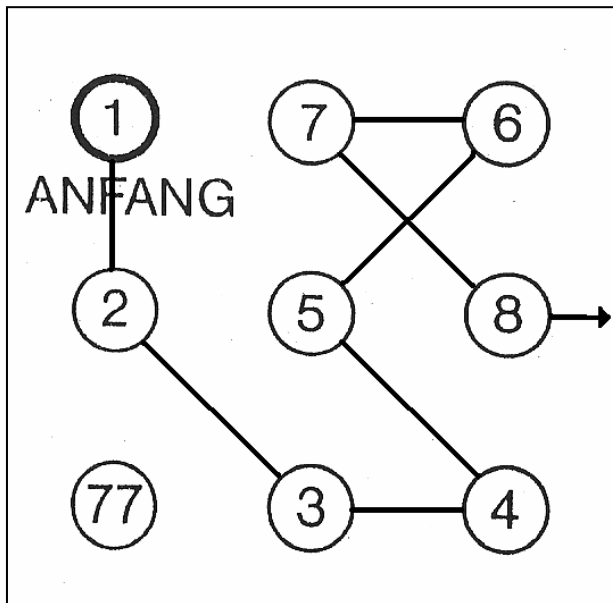


Abb. 20: Tafelausschnitt des ZVT zur Bestimmung der Aufmerksamkeit. Abgebildet ist der Start des Tests. Foto: Brebeck

Bei diesem sprachfreien Test wurden den Probanden jeweils eine vorgefertigte Acrylplatten, welche mit einer beschreibbaren Folie versehen waren, und ein Bleistift übergeben. Mit dem ZVT sollte die 'kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit' überprüft werden. Es sollten die Zahlen 1 bis 90 in aufsteigender Reihenfolge so schnell wie möglich miteinander verbunden werden (Abb. 20). Die jeweils höhere Zahl befand sich jeweils in unmittelbarer Nachbarschaft der vorherigen Zahl.

Gemessen wurde die Zeit vom Aufsetzen bis zum Absetzen des Bleistiftes. Das entsprach der benötigten Zeit, um vom Startpunkt (Zahl 1) bis zum Zielpunkt (Zahl 90) zu gelangen. Die Testabbruch-Grenze wurde erreicht, wenn mehr als 300 s für die Matrize benötigt wurden (Oswald & Roth, 1970).

Der Test wurde immer in eins zu eins Betreuung durchgeführt. Abweichend vom Über-Wasser-Protokoll wurde dem Teilnehmer vor Beginn mit einer Hand ein Countdown von 5 s aufgezeigt, während mit der anderen Hand die Startposition auf der Platte verdeckt wurde (Abb. 21).

Nach Ablauf des Countdowns durfte der Teilnehmer mit dem Zahlenverbinden beginnen. Es wurde pro Teilnehmer jeweils



Abb. 21: Nach Ablauf des 5 s Countdowns durften die Probanden mit dem ZVT zur Bestimmung der Aufmerksamkeit beginnen. Foto: Brebeck

eine Matrize verwendet. Hatte der erste Proband den Test beendet, wurde der Test mit den gleichen Schritten beim zweiten Probanden initialisiert. Die Reihenfolge beider Probanden erfolgte zufällig (Abb. 18, blauer Pfeil mit '2' für den ersten Probanden und '2' für den zweiten Probanden).

Während des Tests wurde der Proband sofort auf direkte Fehler (in dieser Studie als 'fouls' bezeichnet) aufmerksam gemacht. Ein solcher Fehler lag vor, wenn der Proband z.B. von der Zahl 4 zur Zahl 6 eine Linie zog und dabei die Zahl 5 ausließ. Dann wurde auf die zuletzt richtig verbundene Zahl gedeutet, hier die Zahl 4. Als indirekter Fehler oder 'Schussfehler' wurde gewertet, wenn ein Proband seinen eigenen Fehler erkannte und sofort selbst ausbesserte.

Rahmenbedingungen. Die kognitiven Tests wurden jeweils mit Grundkontakt und entleertem Jackett durchgeführt. Dadurch waren die Taucher nicht durch Tarieren abgelenkt, die Gruppe wurde nicht durch eine Strömung auseinander gezogen, und ein direkter Augen- oder Handkontakt blieb gewährleistet.

Auswertung. Bei dem VLMT wurde die Anzahl der richtig erinnerten Wörter für das Kurz- und das Langzeit-Gedächtnis und ebenso die Anzahl der falschen Wörter und Perseverationen der Studienteilnehmer erfasst. Für den ZVT wurde die gemessene Test-Dauer der beiden Studiengruppen verglichen und die Anzahl der indirekten und direkten Fehler vermerkt. Als Einflussfaktoren wurden die verwendete Wortliste, das Geschlecht, das Alter und die Taucherfahrung angesehen und bei der Auswertung beurteilt.

2.4.4. Vegetative Modulation der Herzfrequenz

Die 'vegetative Balance' zwischen sympathischen und parasympathischen Effekten wurde über den Parameter der Herzfrequenz untersucht. Als Messgerät wurde der Tauchcomputer Galileo Sol (Fa. Uwatec AG, Spreitenbach, CH) verwendet. Er wurde zusammen mit einem Pulsmessgurt (T31-Sender codierend [5 kHz], Fa. Polar Electro GmbH, Büttelborn, DE) betrieben. Die Herzfrequenz wurde drahtlos zum Galileo-Tauchcomputer übertragen und dort gespeichert, um später am Laptop mit der dazugehörigen Uwatec-Smart-Track Software (Version 2.0.5.1.) ausgewertet zu werden.

Um sicherzustellen, dass die teilnehmenden Taucher ihre Herzfrequenz nicht vom Tauchcomputer ablesen konnten, und es dadurch zu einem Bio-Feedback kam, wurde er am jeweiligen Flaschenhals befestigt und ohne akustische Signale betrieben (Abb. 22). Während des Tauchganges benutzte jeder Teilnehmer seinen eigenen Tauchcomputer. Die individuellen Nullzeitgrenzen und mögliche Sicherheitsstopps wurden eingehalten.



Abb. 22: Der Tauchcomputer Galileo Sol (Fa. Uwatec AG, Spreitenbach, CH) wurde an der ersten Stufe des Atemreglers montiert. Foto: Brebeck

Auswertung. Die Tauchgänge waren für die Dauer von 60 min geplant. In Abhängigkeit von den aktuellen Bedingungen kam es jedoch zu Tauchgängen mit geringfügig längerer Dauer. Ein wichtiger Grund dafür waren Sicherheitsstopps, die von den verschiedenen Teilnehmer-Computern gefordert wurden. Die Auswertung der Herzfrequenz geschah daher folgendermaßen. Die Dauer aller Tauchgänge wurde jeweils auf 100 % gesetzt. Danach wurden jeweils zehn Perzentilen gleicher Länge (= 10 %) und innerhalb dieser jeweils Mittelwerte gebildet. Es werden also zehn gleichmäßig über den Tauchgang verteilte Werte für die Herzfrequenz angegeben.

Als zusätzliche Einflussfaktoren der Herzfrequenz wurden die Taucherfahrung, das Geschlecht und das Alter berücksichtigt.

Nebenaspekt. Durch die Überwachung mit dem Galileo-Tauchcomputer konnte zudem überprüft werden, ob aufgrund erhöhter psychischer Anspannung die Herzfrequenz während der kognitiven Tests überproportional anstieg. Die so erkannte psychische Anspannung hätte möglicherweise eine unabhängige Klassifikation der Tests ermöglicht.

Zudem ermöglicht die Tauchprofil-Überwachung, dass nur Tauchgänge, welche mit dem Standard-Profil vergleichbar sind (Tiefe; Dauer), in die Auswertung einbezogen wurden und damit andere Untersuchungsteile nicht invalide wurden.

2.5. Statistik

Zur Berechnung der Studienergebnisse und Erstellung der Diagramme wurden sowohl das Programm Office Excel 2007 (Microsoft, Redmond, USA) als auch das Programmpaket SPSS (PASW Statistics 18, IBM, New York, USA) verwendet. Als Signifikanzniveau wurde $\alpha = 0,05$ gewählt.

Das Vorliegen einer Normalverteilung wurde mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests überprüft. Da bei den meisten Merkmalen die Hypothese auf Vorliegen einer Normalverteilung abgelehnt werden musste, kamen in der Folge meist nicht-parametrische Verfahren zur Anwendung. Zu diesen gehörten der Kruskal-Wallis-Test und der Friedman-Test. Beim Vergleich mehrerer Gruppen oder Zeitpunkte wurde der Mann-Whitney-Test (U-Test) verwendet, bei einer Gegenüberstellung zweier Gruppen oder Zeitpunkte der Wilcoxon-Test. Bei multiplen Tests wurden die Ergebnisse Bonferroni-adjustiert, um das versuchsbezogene Signifikanzniveau von $\alpha \leq 0,05$ einzuhalten.

Ordinal und nominal skalierte Merkmale (z.B. Scores) wurden einer Kontingenztafelanalyse unterzogen und mit einem χ^2 -Test oder dem exakten Fisher-Test ausgewertet.

Um den linearen Zusammenhang von stetigen Merkmalen beurteilen zu können, wurden Pearson-Korrelationskoeffizienten berechnet; bei ordinal skalierten Merkmalen oder Fehlen einer Normalverteilung kamen Spearman-Rang-Korrelationskoeffizienten zum Einsatz.

Univariate Varianzanalysen (ANOVA) und allgemeine lineare Modelle wurden genutzt, um die Einwirkung verschiedener Faktoren auf die gemessenen Merkmale unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Einflussgrößen wie Geschlecht, Alter, Rauchverhalten und Taucherfahrung zu untersuchen.

Die Suche nach Funktionen zur Beschreibung der Veränderung der Herzfrequenz erfolgte mittels Kurvenanpassung, Transformation von Merkmalen und anschließender linearer Regression.

Mit der logistischen Regression wurde ermittelt, welche körperlichen Merkmale und Einflussgrößen sich bei der Verwendung der verschiedenen Atemgemische signifikant unterscheiden. Unterschiede wurden bei $p \leq 0,05$ als signifikant betrachtet.

Die berechneten p-Werte wurden in zwei Sub-Klassen eingeteilt, und in der statistischen Auswertung dementsprechend gewertet:

- (1) $p = 0,051 - 0,08$ wurde als tendenziell verschieden bezeichnet,
- (2) $p < 0,05 - p < 0,001$ als signifikant bis äußerst signifikant,

Wenn das besondere Augenmerk auf einen signifikanten Unterschied gelegt werden sollte, wurde das Signifikanzniveau der jeweiligen Berechnung mit dem erreichten p-Wert angegeben.

3. Ergebnisse

3.1. Soziodemografische Merkmale

Das für die Untersuchungen rekrutierte Probandenkollektiv war in seinen soziodemografischen Merkmalen inhomogen. An der Studie nahmen sowohl Partnerlose, ledige Paare, Verheirate und Geschiedene teil. Zudem stammten die Teilnehmer aus Deutschland, Österreich oder der Schweiz. Der Bildungsgrad der Teilnehmer wurde nicht erfragt, jedoch partizipierten sowohl vor dem Berufsleben stehende Studenten, im Berufsleben steckende Selbständige und Angestellte und Teilnehmer mit akademischer Ausbildung, als auch nach dem Berufsleben stehende Rentner an der Studie.

Während die Frage nach regelmäßigem Tabakkonsum in einer Umfrage einer Tauchzeitschrift an der auch Kinder teilnehmen durften zu 44,2 % bejaht wurde (Piepho et al., 2008), lag in dieser Studie mit ausschließlich Erwachsenen der Raucheranteil mit 32,4 % deutlich niedriger. Der deutsche Durchschnitt liegt bei 37 % (Lampert & Burger, 2004). Unter den Urlaubstauchern befanden sich sowohl Normalgewichtige als auch Übergewichtige, welche bei den Männern einen Body-Mass-Index (BMI) bis 39, entsprechend einer Adipositas Grad II, und bei den Frauen einen BMI bis 34, entsprechend einem Adipositas Grad I, erreichten. Lediglich eine Teilnehmerin hatte einen BMI-Wert im leichten Untergewicht. Daher hätte der Konstitutions-Typ der Taucher von unспортlich bis sportlich-athletisch eingeteilt werden können.

Die Frage nach früheren Dekompressionskrankheiten (DCS), Tiefenrauschsymptomatik oder Tauchunfällen bejahten 8,3 % der Teilnehmer (♀: Frauen; ♂: Männer). Retrospektiv gaben 5 Taucher DCS-Symptome (6,5 %) an; zwei weitere Taucher waren mindestens einmal in der Dekokammer behandelt worden (2 %). In Bezug auf frühere DCS wurden sowohl Typ1-Beschwerden (Schmerzen im Ellenbogen (♂), Schulterschmerzen (♀), Schmerzen in den Halswirbeln (♀)) als auch Typ2-Beschwerden (Schwindel nach dem Tauchgang (♀) und Gehörsturz (♂)) genannt. Die Zwischenfälle während des Tauchganges wurden mit Platzangst (♂) und ein Barotrauma des Ohres (♀) angegeben. Von den Betroffenen hatte keiner medizinische Hilfe beansprucht oder eine Dekokammer-Behandlung in Erwägung gezogen. Die beiden Teilnehmer mit einer Dekokammer-Behandlung gaben einen Z.n. Kreislaufkollaps (♂) und einen Notaufstieg (♂) aus 51 m an.

In dieser Studie ergab sich retrospektiv keine signifikante Korrelation zwischen dem Auftreten von DCS und dem Geschlecht (exakter Test nach Fisher: $p=0,717$). Es wird noch einmal erwähnt, dass die beiden schwersten Fälle zwei Männer betrafen, die in der Dekompressions-Kammer behandelt werden mussten.

Um zu zeigen, dass das Teilnehmerkollektiv annähernd dem 'Normal/Urlaubs-Taucher' entsprach, werden Daten von Piepho et al. (2008) den Ergebnissen dieser Studie gegenübergestellt und ebenso deren Krankheitsprävalenzen (Tab. 5 und 6).

Tab. 5: *Soziodemografischer Vergleich.*

Demografischer-Vergleich	Piepho et al. 2008		diese Studie	
	männlich	weiblich	männlich	weiblich
Anzahl Taucher	226 (70,2%)	96 (29,8%)	70 (64,8%)	38 (35,2%)
Alter [a]	44,3 (15-72)	36,3 (13-64)	43,9 (20-67)	37,6 (21-67)
BMI [kg/m ²]	26,3 (19,1-39,9)	23,0 (14,9-37,6)	25,9 (19-39)	23,4 (18-34)
Tauchjahre [a]	12,2 (1-45)	6,5 (1-28)	10,2 (1-43)	7,2 (1-33)
Tauchgänge [n]	250 (4-6700)	130 (6-1300)	464 (22-7200)	294 (20-3000)
Maximaltiefe [m]	51,8 (11-104)	43,0 (7-93)	46,7 (30-87)	41,6 (21-74)

Die Ergebnisse dieser Studie wurden mit der Umfrage von Piepho et al. (2008) verglichen. Die Werte wurden, wenn möglich, mit Minimum und Maximum angegeben. Abweichungen lassen sich auf Kinder zurückführen, die an der Umfrage von Piepho teilgenommen hatten.

Tab. 6: *Vergleich der Krankheitsprävalenz.*

Erkrankungen	Piepho et al. 2008	diese Studie
Pollenallergie	22,7%	1%
Asthma	10,2%	6,5%
Pulm. Erkrankungen	10,7%	3,7%
Hypertonie	17,4%	11,1%
Diabetes mellitus	5,7%	2,8%
Refluxbeschwerden	n.a.	5,6%
Depression	n.a.	2,8%
Schilddrüsenfehlfunktion	n.a.	7,4%
Fettstoffwechselstörung	n.a.	3,7%
Andere Erkrankungen	21,4%	4,6%

Die Studientaucher wurden mit denjenigen der Umfrage von Piepho et al. (2008) verglichen. Erkrankungen, die bei Piepho unter andere Krankheiten zusammengefasst wurden, wurden mit n.a. gekennzeichnet. Man erkennt die deutlichen Abweichungen zwischen einer Patienten-Fragebogen und einer Arzt-Patienten Befragung.

Es ließ sich nicht eruieren, in welchem Umfang bei der Umfrage von Piepho et al. (2008) Pathologien wie Refluxbeschwerden, Fettstoffwechselstörungen oder Depressionen angegeben wurden, denn diese wurden unter 'andere Erkrankungen' zusammengefasst und nicht genauer aufgeschlüsselt. In dieser Studie wurde als zweithäufigste Krankheit die Schilddrüsenfehlfunktion mit 7,4 % genannt (Frauen 10,5 %), die bei (Piepho et al., 2008)

nicht erwähnt wird. Letztlich bleibt ungeklärt, ob rein zufällig vermehrt Schilddrüsenerkrankungen in der Studiengruppe auftraten.

3.2. Tauchgruppenvergleich

Unter den insgesamt 108 Teilnehmern waren 38 Frauen (35,2 %) und 70 Männer (64,8 %). In der air28-Gruppe und in der Luft-Gruppe betrug der Anteil der Frauen ebenfalls etwa ein Drittel (33 bzw. 37 %) (Tab. 7).

Tab. 7: Tauchgruppen-Vergleich in Abhängigkeit vom Atemgemisch (air28 oder Luft).

Gruppen-Vergleich	Luft	air28	Signifikanz (U-Test)
Anzahl insgesamt	54	54	1,0
Geschlechterverteilung	20 ♀ , 34 ♂	18 ♀ , 36 ♂	0,688
Raucher [n]	15 (4 ♀ , 11 ♂)	20 (6 ♀ , 14 ♂)	0,400
Alter [Jahren]	41,6 ± 11,9	41,7 ± 11,5	0,941
BMI [kg/m ²]	25,0 ± 3,3	24,7 ± 4,3	0,696
Dauer des Tauchgangs in [min]	61,7 ± 5,3	61,8 ± 5,3	0,987
Tiefe des Tauchgangs in [m]	23,9 ± 0,9	23,9 ± 1,0	0,990
Direkter Erfahrungsvergleich			
Anzahl der bisher absolvierten Tauchgänge [n]	337 ± 494	472 ± 1247	0,705
Anzahl der Tauchgänge tiefer als 25m [n]	163 ± 266	220 ± 570	0,728
Anzahl der aktiven Tauchjahre [Jahren]	9,2 ± 7,9	9,2 ± 8,6	0,732
Tiefe des bisher tiefsten Tauchgangs (TG) in [m]	45,5 ± 12,1	44,2 ± 13,5	0,399
Grade der Erfahrung (1-4)			
	Luft	air28	Signifikanz (U-Test)
Anzahl der TG in 1: ≤ 50; 2: ≤ 100; 3: ≤ 300; 4: > 300	2,7 ± 1,1	2,6 ± 1,2	0,869
Anzahl der TG tiefer 25m in 1: ≤ 50; 2: ≤ 100; 3: ≤ 300; 4: > 300	2,0 ± 1,1	2,0 ± 1,1	0,842
Anzahl der Tauchjahre 1: ≤ 3; 2: ≤ 5; 3: ≤ 10; 4: ≤ 15; 5: > 15	2,8 ± 1,3	2,8 ± 1,4	0,763

Angegeben wurden die Mittelwerte ± Standardabweichungen der jeweiligen Parameter. Zwischen allen relevanten Parametern gab es keine statistisch signifikanten Unterschiede.

Sowohl im Alter, in der Geschlechterverteilung, in der Relation von Körpergewicht zu Körpergröße (BMI), in der Dauer der Tauchgänge als auch in der Tiefe des Tauchganges unterschied sich die air28-Gruppe nicht signifikant von der Luft-Gruppe.

Da bei den verschiedenen Erfahrungsvergleichen eine starke Streuung um den Mittelwert und dadurch fälschlicherweise der Eindruck einer besonders erfahrenen Studientauchgruppe entstanden wäre, wurden zusätzlich vier Grade der Erfahrung eingeführt. Diese spiegeln deutlicher die reell vorhandene Erfahrung wider und zeigen, dass die Teilnehmer im Durchschnitt zwischen 100 und 300 Tauchgänge insgesamt hatten, von denen zwischen 50 und 100 Tauchgänge tiefer als 25 m waren. In den Erfahrungsvergleichen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Tauchgruppen festgestellt werden.

Insgesamt präsentierten sich die beiden randomisierten Studiengruppen in allen Parametern sehr homogen, so dass die weiteren statistischen Auswertungen vermutlich nicht durch einen systematischen Unterschied in der Zuteilung der Probanden zu den Studiengruppen beeinflusst wurden. Es ergab sich für beide Gruppen lediglich eine signifikante Korrelation: Das Körpergewicht nahm unabhängig vom Geschlecht mit dem Alter zu ($p=0,013$).

3.3. Lungenfunktion (statische und dynamische Spirometrie)

Zunächst wird eine theoretische Analyse der Toxizität des Sauerstoffes auf das Lungengewebe durchgeführt. Daran schließt sich die Darstellung der statistischen Auswertung von 52 Teilnehmern in der Luft- und in der air28-Gruppe an. Vier Teilnehmer des Gesamt-Probandenkollektives konnten nicht ausgewertet werden, da die Spirometer-Software eine Fehlfunktion meldete, welche die Messungen an zwei Tagen verhinderte.

3.3.1. Oxygen Tolerance Units, Units of Pulmonary Toxicity Dose

Um die mögliche Toxizität des Sauerstoffes auf die Lunge zu quantifizieren wurden zunächst die 'Oxygen tolerance Units' (OTU) berechnet. Die OTUs werden in der Einheit 'Units of Pulmonary Toxicity Dose' (UPTD; oder kumulativ CPTD) angegeben.

Dabei gilt: 1 UPTD = 1 min O₂ Atmung bei 1 bar (Hamilton, 1989):

$$(1) \quad \text{UPTD} = t(x) \cdot \frac{(p\text{O}_2 - 0,5)^{0,83}}{0,5}$$

t: Einwirkzeit in Minuten (x: 15 min);
pO₂: O₂ Partialdruck in bar (24 m: 3,4 bar)
0,5: Bereich ohne signifikante Symptome (hier: 7,9 - 13,8 m);
0,83: Exponent

Für die Studententaucher errechneten sich für die maximale Tiefe (24 m; 15 min) des Tauchganges in der Luft-Gruppe 7,4 UPTD (0,49 UPTD / min) und in der air28-Gruppe 13,8 UPTD (0,92 UPTD / min) (p= 0.451). Für die restlichen 25 min des Tauchganges, der tiefer als 7,9 m (air28-Gruppe) und 13,8 m (Luft-Gruppe) war, kann ein Zuschlag von ungefähr 8 UPTD (0,29 UPTD / min) pro Gruppe hinzugerechnet werden. Insgesamt ergibt sich damit eine OTU von 15,4 UPTD in der Luft-Gruppe und 21,8 UPTD in der air28-Gruppe.

Eine VC-Verschlechterung (ΔVC) von 2 %, welche der Messungenauigkeit des verwendeten Spirometers (Manual Calibration Syringe: ± 2 %) entspricht, wird nach Meinung mehrerer Autoren bei einer etwa 30-fach höheren Expositionsdosis von 615 OTU postuliert (Wright & Lambertsen, 1972; Harabin et al., 1987). Eine 4 bis 6 %ige ΔVC könnte für eine klare Schädigung der Lungenfunktion sprechen, welche bei einer OTU-Dosis zwischen 825 und 1035 erreicht wird (Harabin et al., 1987).

Eine weitere Möglichkeit, die pO₂-bedingte ΔVC in % zu bemessen, basiert auf empirischer Datenlage und lässt sich nach Harabin et al (1987) folgendermaßen berechnen (Hamilton, 1989):

$$(2) \quad \% \Delta\text{VC} = -0,011 \cdot (p\text{O}_2 - 0,5) \cdot t$$

pO₂: O₂ Partialdruck in bar (24 m: 3,4 bar)
t: Einwirkzeit in Minuten (15 min);
0,5: Bereich ohne signifikante Symptome (hier: 7,9 - 13,8 m)

Damit errechnete sich für die Studientaucher für die maximale Tauchtiefe eine ΔVC von 0,035 % in der Luft-Gruppe und 0,075 % in der air28-Gruppe. Für die Tauchdauer von 25 min auf 15 m Tiefe, kann ein Zuschlag von ungefähr 0,024 % ΔVC pro Gruppe hinzugerechnet werden. Die gesamte ΔVC beträgt 0,059 % in der Luft-Gruppe und 0,099 % in der air28-Gruppe und damit für beide Atemgemische Werte ohne physiologische Relevanz. Derartige Unterschiede dürften messtechnisch innerhalb einer heterogenen Probandengruppe kaum erfassbar sein. Ein hypothetischer Vergleich: Patienten unter intensivmedizinischer Betreuung werden z.T. mit 70 % bis 100 % Sauerstoff für ganze Tage beatmet. Daraus würde sich eine ΔVC von etwa 3,2 % bis 7,9 % pro Tag errechnen.

Die Ergebnisse legen nahe, dass für diese Studie die pO_2 -bedingte Beeinträchtigung der Lungenfunktion in einem unbedenklichen Bereich liegt. Für die Studientaucher war auf der Basis dieser Berechnungen kein Lungenschaden durch den Tauchgang zu erwarten.

3.3.2. Spirometrie vor dem Tauchgang

Das zur Messung verwendete MasterScope TP-Spirometer nimmt für jeden Teilnehmer entsprechend der jeweiligen Größen-, Gewichts-, Geschlechts- und Altersklasse Normwerte an, die über die Gerätesoftware mit denen der Probanden-Werte verglichen wurden (Quanjer et al., 1994). Bei den Tauchern ergaben sich vor dem Tauchgang nur geringe Abweichungen von diesen Normwerten. Auch die Abweichungen zwischen den beiden Studiengruppen waren nicht signifikant und betragen für einzelne Parameter minimal 0,1 % und maximal 5,3 % (Mittel: 2,2 %).

Summarisch lässt sich feststellen, dass die Teilnehmerwerte die Normwerte eher über- als unterschritten. Damit lässt sich das Kollektiv als nicht pulmonal vorgeschädigt betrachten. Allerdings gaben 4 % der Teilnehmer frühere oder aktuelle pulmonale Erkrankungen an. Die Ist-Werte aller überprüften Studienparameter lagen im Gesamtkollektiv zwischen minimal 65,7 % und maximal 113,2 % des Soll-Wertes.

Die Lungenfunktionsparameter beider Studiengruppen wurden vor dem Tauchgang miteinander verglichen. Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf restriktive oder obstruktive Veränderungen (Tab. 8).

Tab. 8: Parameter der statischen und der dynamischen Spirometrie vor dem Tauchgang.

Spirometrie vor dem Tauchgang	Luft [%]	air28 [%]	Signifikanz (U-Test)
VC _{IN}	108,4 ± 12,9	108,2 ± 11,7	0,969
VC _{MAX}	113,2 ± 13,5	112,7 ± 12,6	0,820
FVC	112,6 ± 13,5	110,4 ± 12,7	0,473
FEV 1	108,3 ± 12,0	106,5 ± 14,2	0,509
FEV 1 % VC _{MAX}	95,9 ± 7,4	94,9 ± 8,1	0,658
PEF	100,8 ± 16,9	106,0 ± 24,0	0,296
MEF ₇₅	98,4 ± 19,8	99,6 ± 21,4	0,704
MEF ₅₀	89,6 ± 20,3	102,0 ± 16,0	0,470
MEF ₂₅	70,00 ± 33,6	65,7 ± 27,1	0,887

Dargestellt sind die relativen Werte (Ist-Werte im Verhältnis zum Sollwert in %; Mittelwerte ± Standardabweichung). Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Studiengruppen in Bezug auf die statische und dynamische Spirometrie vor dem Tauchgang. VC_{IN}: inspir. Vitalkapazität; VC_{MAX}: maximale Vitalkapazität; FVC: forcierte Vitalkapazität; FEV 1: forciertes expir. Volumen nach 1 s; FEV 1 % VC_{MAX}: FEV 1 in Prozent der max. Vitalkapazität; PEF: peak expiratory flow; MEF₇₅₋₂₅: max. expir. Flüsse bei 25 %, 50 %, 75 % der VC_{MAX}.

3.3.3. Spirometrie nach dem Tauchgang

Die Berechnung der Sauerstofftoleranz hatte ergeben, dass aus der Verwendung von air28 und Luft kein Risiko für die Lungenfunktion resultieren sollte. Dies wurde durch eine Spirometrie nach dem Tauchgang überprüft. Dabei hätten Veränderungen im Bereich der Restriktion und/oder der Obstruktion auftreten können. Die statischen und dynamischen Variablen werden im Folgenden präsentiert.

Parameter der Lungenrestriktion. Als ein wichtiger Parameter der Restriktion wurde die Vitalkapazität (VC) herangezogen. Der Sollwert für die VC lag für alle untersuchten Probanden bei 4,6 ± 0,9 l (Mittelwert ± Standardabweichung). Auf der Basis geringfügiger (nicht signifikanter) Unterschiede in der Gruppenzusammensetzung lagen die VC-Sollwerte bei 4,6 ± 0,9 l bzw. bei 4,6 ± 0,8 l (Abb. 23; blaue Säulen).

Die Werte vor dem Tauchgang (Ist1) waren mit 5,0 ± 1,0 l (Abb. 23; lila Säulen) in beiden Gruppen größer als erwartet (n.s.). Nach dem Tauchgang war die VC mit 5,0 ± 1,1 l in der Luft-Gruppe und mit 4,9 ± 1,1 l in der air28-Gruppe im Vergleich zur Voruntersuchung unverändert und lag wiederum über den Soll-Werten (Abb. 23; rosa Säulen).

Die relativen Zahlenwerte für die restriktiven Parameter sind in Tab. 9 zusammengestellt.

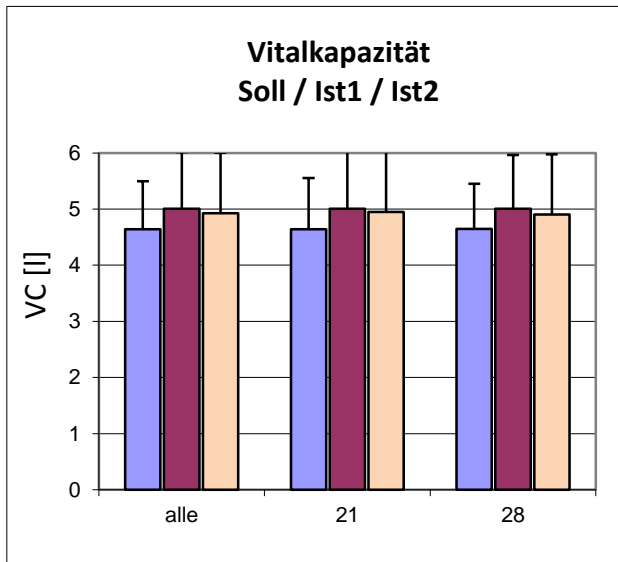


Abb. 23: Die erste Säule (blau) zeigt den Sollwert der VC, die zweite Säule (lila) den Ist1-Wert vor dem Tauchgang und die dritte Säule (rosa) den Ist2-Wert nach dem Tauchgang. Die Ist-Werte überragen in allen drei Gruppen die Soll-Werte sowohl vor als auch nach dem Tauchgang. Im direkten Vergleich der beiden Studiengruppen zeigten sich keine signifikanten Unterschiede.

Tab. 9: Parameter der Vitalkapazität nach dem Tauchgang.

Spirometrie nach dem Tauchgang	Luft [%]	air28 [%]	Signifikanz (U-Test)
VC _{IN}	106,6 ± 11,5	105,6 ± 12,6	0,843
VC _{MAX}	112,4 ± 12,4	109,4 ± 12,6	0,853

Dargestellt sind die relativen Werte (Ist-Werte im Verhältnis zum Sollwert in %; Mittelwerte ± Standardabweichung). Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf mögliche restriktive Veränderungen. VC_{IN}: inspir. Vitalkapazität; VC_{MAX}: maximale Vitalkapazität.

Parameter der Lungenobstruktion. Es wurden der maximale Fluss (PEF) und die Mean-Expiratory-Flow-Werte (MEF₇₅, MEF₅₀, MEF₂₅) für die Auswertung herangezogen. Der Sollwert für PEF (Abb. 23; blaue Säulen) lag für alle Probanden bei 8,6 ± 1,3 l/s, für die Luft-Gruppe bei 8,5 ± 1,3 l/s und die air28-Gruppe bei 8,6 ± 1,2 l/s.

Die mittleren Ist-Werte von PEF lagen sowohl für die gesamte Gruppe als auch für die beiden Atemgas-Gruppen vor und nach dem Tauchgang etwas über dem Normmittelwert. Bei der Gesamt-Gruppe lag er vor dem Tauchgang bei 8,5 ± 1,5 l/s und bei den beiden Atemgas-Gruppen bei 8,5 ± 1,3 bzw. 9,1 ± 1,6 l/s (Abb. 24; lila Säulen). Nach dem Tauchgang waren die Ist-Werte nur unwesentlich verändert: 8,9 ± 2,3; 8,9 ± 2,0; 8,9 ± 2,7 l/s; (Abb. 24; rosa Säulen). Bei der Luft-Gruppe hatte der mittlere PEF ein wenig zugenommen und bei der air28-Gruppe ein wenig abgenommen (Abb. 24). Die Unterschiede waren nicht signifikant.

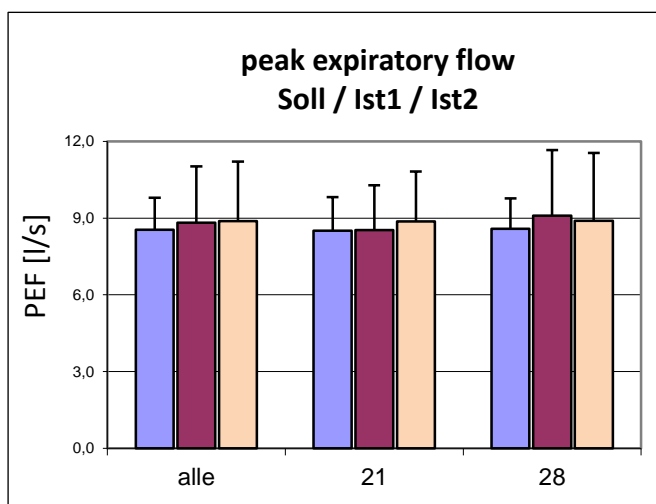


Abb. 24: Die erste Säule (blau) zeigt den Sollwert des PEF, die zweite Säule (lila) den Ist1-Wert vor dem Tauchgang und die dritte Säule (pink) den Ist2-Wert nach dem Tauchgang. Die Ist-Mittelwerte überragen in alle drei Gruppen die Soll-Werte. Im direkten Vergleich der beiden Studiengruppen, hatte die Relation bei der Luft-Gruppe ein wenig zugenommen und bei der air28-Gruppe ein wenig abgenommen.

Auch bei den obstruktiven Variablen ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit vom Atemgas. Da sich die restlichen Variablen (FVC; FEV 1; FEV 1 % VC_{MAX}) sehr ähnlich verhielten, wurde auf eine graphische Präsentation verzichtet. Die Zahlenwerte für obstruktive Variablen sind in Tab. 10 zusammengestellt.

Tab. 10: Parameter der Obstruktion nach dem Tauchgang.

Spirometrie nach dem Tauchgang	Luft [%]	air28 [%]	Signifikanz (U-Test)
FVC	110,7 ± 12,4	108,5 ± 11,6	0,919
FEV 1	107,5 ± 11,9	104,8 ± 12,1	0,787
FEV 1 % VC _{MAX}	95,9 ± 7,1	95,5 ± 8,00	0,892
PEF	104,1 ± 19,6	103,7 ± 12,0	0,841
MEF ₇₅	101,0 ± 17,0	98,1 ± 21,8	0,520
MEF ₅₀	85,9 ± 12,5	85,1 ± 13,4	0,958
MEF ₂₅	70,4 ± 8,3	66,3 ± 6,7	0,797

Dargestellt sind die relativen Werte (Ist-Werte zu Sollwerten in %; Mittelwerte ± Standardabweichung). Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in den überprüften Parametern. FVC: forcierte Vitalkapazität; FEV 1: forciertes expir. Volumen nach 1 s; FEV 1 % VC_{MAX}: FEV 1 in Prozent der max. Vitalkapazität; PEF: peak expiratory flow; MEF₇₅₋₂₅: max. expir. Flüsse bei 25 %, 50 %, 75 % der VC_{MAX}.

3.3.4. Atemgaseffekte auf die Lungenfunktion vor und nach Tauchgang

Die Analyse der Lungenfunktionsparameter im Vergleich mit einem Kontrollkollektiv ergab keine Anhaltspunkte für pathologische Veränderungen in beiden Studiengruppen. In einer weiteren Berechnung wurden die Ergebnisse der Lungenfunktion vor dem Tauchgang mit denjenigen nach dem Tauchgang direkt verglichen. Dadurch sollten Veränderungen innerhalb der Luft- und der air28-Gruppe getrennt voneinander ermittelt werden, die zwischen den beiden spirometrischen Messungen entstanden sein könnten. Außerdem sollte festgestellt werden, ob die Atemgaseffekte auf die Lunge möglicherweise nur eine der beiden Gruppen betraf.

Nach dem Tauchgang war unter den restriktiven Variablen die VC in beiden Gruppen zumindest tendenziell vermindert: in der Luft-Gruppe auf $99,0 \pm 4,9$ % ($p=0,033$) und in der air28-Gruppe auf $97,6 \pm 11,6$ % (n.s.). Auch die VC_{MAX} tendierte in beiden Gruppen zu einer Reduktion. In der Luft-Gruppe lag der Wert bei $99,0 \pm 4,1$ % ($p=0,081$) und in der air28-Gruppe bei $97,4 \pm 11,3$ % ($p=0,056$).

Unter den obstruktiven Variablen verhielten sich einige Werte gegenläufig. In der air28-Gruppe nahmen PEF und MEF₇₅ ab und MEF₅₀ und MEF₂₅ (ca. 5 %) zu. In der Luft-Gruppe stiegen hingegen PEF und MEF₇₅ um ca. 5 % an und MEF₅₀ sank. Die relative FEV₁ hatte in beiden Gruppen etwas zugenommen. Alle erfassten statischen und dynamischen Variablen sind in Tab. 11 zusammengestellt.

Tab.11: Vergleich der statischen und dynamischen Variablen vor und nach dem Tauchgang.

vor dem TG zu nach dem TG	Luft [%]	Luft Signifikanz	air28 [%]	air28 Signifikanz
VC _{IN}	$99,0 \pm 4,9$	0,033	$97,6 \pm 11,6$	0,334
VC _{MAX}	$99,0 \pm 4,1$	0,081	$97,4 \pm 11,3$	0,056
FVC	$98,2 \pm 5,1$	0,052	$98,2 \pm 11,1$	0,401
FEV ₁	$99,2 \pm 6,3$	0,446	$98,3 \pm 11,7$	0,844
FEV ₁ % VC _{MAX}	$100,2 \pm 5,8$	0,701	$100,9 \pm 6,5$	0,351
PEF	$105,4 \pm 20,2$	0,191	$98,4 \pm 18,3$	0,384
MEF ₇₅	$105,1 \pm 17,6$	0,223	$99,1 \pm 20,8$	0,642
MEF ₅₀	$98,2 \pm 21,4$	0,552	$100,3 \pm 19,6$	0,895
MEF ₂₅	$103,5 \pm 36,7$	0,521	$105,5 \pm 38,3$	0,612

Die Daten sind als prozentuale Änderungen zusammengestellt (Parameterwerte nach dem Tauchgang/ vor dem Tauchgang). Obwohl bei drei Variablen das Signifikanzniveau erreicht oder beinahe erreicht war, sind die jeweiligen relativen Unterschiede klein. (Wilcoxon-Test) VC_{IN}: inspir. Vitalkapazität; VC_{MAX}: maximale Vitalkapazität; FVC: forcierte Vitalkapazität; FEV₁: forciertes expir. Volumen nach 1 s; FEV₁ % VC_{MAX}: FEV₁ in Prozent der max. Vitalkapazität; PEF: peak expiratory flow; MEF₇₅₋₂₅: max. expir. Flüsse bei 25 %, 50 %, 75 % der VC_{MAX}.

Die signifikante Abnahme der VC_{IN} in der Luft-Gruppe und die Tendenz der VC_{MAX} in der air28-Gruppe legen einen Trend zu einer restriktiven Veränderung durch den Tauchgang nahe. Die Unterschiede erscheinen eher physiologisch, im Mittel waren sie < 3 %.

Bei den obstruktiven Variablen ergaben sich bei der air28-Gruppe leichte Abnahmen (PEF und MEF_{75}), während es in der Luft-Gruppe bei diesen beiden Variablen zu leichten Zunahmen kam. Signifikante Unterschiede zwischen air28 und Luft lassen sich nicht erkennen.

3.3.5. Einflussfaktor Rauchen

Mit der Varianzanalyse (allgemeines lineares Modell; GLM) wurde ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Rauchverhalten und der forcierten Vitalkapazität (FVC) vor dem Tauchgang ($p=0,035$) und nach dem Tauchgang ($p=0,037$) nachgewiesen. Ebenso war bei den Rauchern die Vitalkapazität (VC_{IN}) gegenüber den Normwerten bereits vor dem Tauchgang ($p=0,036$) vermindert. Die überwiegende Anzahl der Variablen war bei den Rauchern bei beiden Messungen moderat jedoch nicht signifikant verringert.

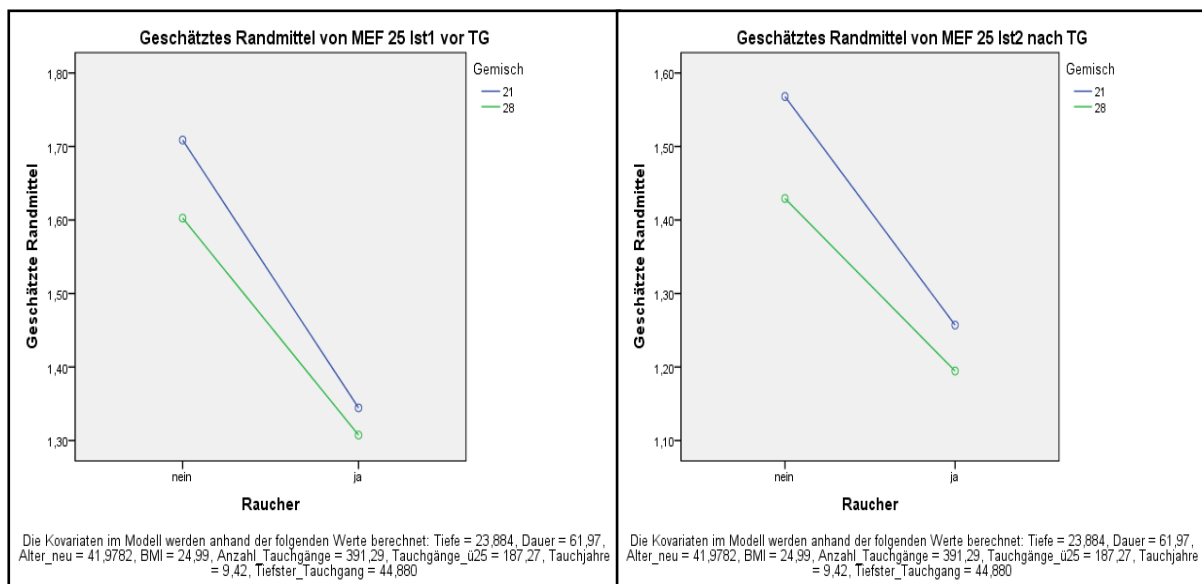


Abb. 25: Lungenfunktion der Raucher in beiden Tauchgruppen. Dargestellt ist als Beispiel der mittlere expiratorische Fluss 25 % (MEF_{25}) vor (links) und nach (rechts) dem Tauchgang. Unabhängig vom Atemgas (blau: Luft; grün: air28) ist MEF_{25} bei den Nichtrauchern (jeweils linke Datenpunkte im Bild) deutlich höher als bei den Rauchern (jeweils rechte Datenpunkte im Bild). MEF_{25} ist ein Maß für eine Stenosierung oder mögliche Schädigung der kleinen und kleinsten Lungenbronchiolen.

3.4. Blasen-Detektion (Doppler-Ultraschall)

Es sollte untersucht werden, ob abhängig vom Atemgas unterschiedlich viele Gasblasen mittels Doppler-Ultraschall nachweisbar waren. Dafür wurden an drei Gefäßlokalisationen, der Vena jugularis interna (jug), der Vena subclavia (sub) und der Vena femoralis (fem), Messungen durchgeführt. Zur Auswertung kamen demnach je 3 Messungen an 54 Teilnehmern in der Luft- und in der air28-Gruppe; es liegen also Daten vom gesamten Kollektiv vor. Dabei wurde in zwei Zeit-Intervallen nach Beendigung des Tauchganges gemessen (1. Intervall (30 - 45 min); 2. Intervall (45 - 60 min)).

In den Abbildungen zur Gas-Blasenbildung wurde auf die graphische Darstellungen der Standardabweichungen einzelner Messwerte zu Gunsten der Akzentuierung signifikanter Messergebnisse und zur Erhaltung der Übersichtlichkeit verzichtet.

3.4.1. Allgemeine Blasenbewertung

In einem ersten Schritt wurde lediglich die Anzahl der Probanden mit Blasen für beide Atemgas-Gruppen getrennt ausgewertet (Tab. 12). Im zweiten Schritt wurde die Blasenanzahl für jedes Gefäß (jug, sub, fem) einzeln und als Summe für das Gesamt-Gefäßsystem (jug+sub+fem) beider Studiengruppen getrennt voneinander ausgewertet (Tab. 13 und 14).

Von jeweils 54 Probanden wiesen 44 (air28) bzw. 47 (Luft) Teilnehmer Blasen im frühen Messintervall auf. Im späten Messintervall waren es 42 (air28) bzw. 45 (Luft) Probanden. In Summation beider Messintervalle wiesen 48 (air28) bzw. 50 (Luft) Probanden Gasblasen auf.

Für die Anzahl der Teilnehmer mit Blasen wurde kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen gefunden (exakter Test nach Fisher). In der Luft-Gruppe befanden sich jedoch in beiden Intervallen 2 - 3 Teilnehmer mehr, welche Blasen aufwiesen (Tab. 12).

In beiden Untersuchungszeiträumen zusammen (30-60 min) wurden bei etwa 89 % der Teilnehmer der air28-Gruppe und etwa 93 % der Luft-Gruppe Blasen im Gefäßsystem auffindig gemacht (n.s.; Tab. 12).

Tab. 12: Häufigkeit des Auftretens von Gasblasen in Abhängigkeit vom verwendeten Gasmisch.

(jug+sub+fem)	Luft	air28	Luft vs air28
	Teilnehmer (%)	Teilnehmer (%)	Signifikanz
1. Intervall (30 - 45 min)	47 (87,0)	44 (81,5)	0,299
2. Intervall (45 - 60 min)	45 (83,3)	42 (77,8)	0,314
Intervall 30 - 60 min	50 (92,6)	48 (88,9)	0,371

Angaben in Prozent der Teilnehmer beider Studiengruppen, bei welchen Blasen nachgewiesen wurden. Alle drei Gefäßlokalisationen wurden als ein Gefäßsystem zusammengefasst. Eine Testung der Mittelwertunterschiede erfolgte mit dem exakten Test nach Fisher.

Blasenduschen. Zusätzlich wurde zwischen der Gas-Blasenzahl allein und der Blasenanzahl plus Blasenduschen unterschieden. Blasenduschen wurden als eine Häufung sehr kleiner Blasen angesehen. Dabei wurde bei der Doppler-Messung ein Rauschen/Knistern als akustisches Signal anstelle eines 'klackenden' Signals, wie es eine einzelne Blase verursacht, wahrgenommen.

Der größte Anteil dieser Blasenduschen wurde an der V. jugularis interna festgestellt. Er betrug während des ersten Intervalls 19,2 % in der air28-Gruppe und 20,9 % in der Luft-Gruppe, im zweiten Intervall stieg er in beiden Gruppen auf 24,2 % bzw. auf 29,9 % an. Dahingegen wurden an der V. femoralis in der air28-Gruppe keine und in der Luft-Gruppe äußerst selten Blasenduschen detektiert (Intervall 1: 4,2 %; Intervall 2: 1,4 %).

Gefäßlokalisationen (V. jugularis, V. subclavia, V. femoralis). Die Gegenüberstellung der drei Gefäßlokalisationen ergab einige signifikante Differenzen in der Anzahl der Blasen in Abhängigkeit vom Atemgemisch. Die aufgetretenen Differenzen wurden ebenfalls mit gesonderter Betrachtung der oben erwähnten Blasenduschen dargestellt.

Während im 1. Intervall an der V. subclavia in der Luft-Gruppe insgesamt 625 Blasen (11,6 / min / Taucher) ohne Blasenduschen nachgewiesen wurden, waren es in der air28-Gruppe lediglich 206 Blasen (3,8 / min / Taucher) ($p=0,025$). Wurden am Messwert der V. femoralis die Blasenduschen mit einbezogen, ergibt sich ein tendenzieller Unterschied ($p=0,071$).

Im 2. Intervall zeigten sich diese beiden Messwerte an der V. subclavia nicht signifikant verschieden. Dagegen wurde ein signifikanter Unterschied an der V. femoralis mit insgesamt 377 Blasen ohne Blasenduschen in der Luft-Gruppe (7,0 / min / Taucher) und 73 Blasen in der air28-Gruppe (1,4 / min / Taucher) festgestellt ($p=0,046$). Tabelle 13 vervollständigt für die beiden Intervalle die nicht aufgeführten Ergebnisse an den anderen Lokalisationen.

Tab. 13: Gas-Blasenanzahl an den drei Gefäßlokalisationen in Abhängigkeit vom verwendeten Gasgemisch.

Anzahl der Blasen -Einzel- (jug, sub, fem)		Luft		air28		Signifikanz	
		(Blasen / min / Taucher)		(Blasen / min / Taucher)		(U-Test)	
		Blasenduschen		Blasenduschen		Blasenduschen	
		ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
1. Intervall 30-45 min	jug	640 (11,9)	810 (15,0)	505 (9,4)	625 (11,6)	0,314	0,247
	sub	625 (11,6)	627 (11,6)	206 (3,8)	224 (4,2)	0,025	0,067
	fem	391 (7,2)	408 (7,6)	99 (1,8)	99 (1,8)	0,103	0,071
2. Intervall 45-60 min	jug	585 (10,8)	835 (15,5)	485 (8,9)	640 (11,9)	0,780	0,253
	sub	580 (10,7)	600 (11,1)	223 (4,1)	240 (4,4)	0,110	0,110
	fem	377 (7,0)	382 (7,1)	73 (1,4)	73 (1,4)	0,046	0,045

Sowohl im 1. als auch im 2. Intervall traten in Abhängigkeit von der Lokalisation unterschiedlich viele Blasen auf. Es bestanden zwischen der air28-Gruppe und der Luft-Gruppe signifikante Unterschiede und starke Tendenzen an den Lokalisationen V. subclavia und V. femoralis.

Demnach war die Differenz der Blasenanzahl (ohne Berücksichtigung der Blasenduschen) in der V. jugularis für die beiden Atemgase in beiden Intervallen am geringsten ([1] Differenz: 135 Blasen \approx 21 %; [2] Differenz 100 Blasen \approx 17 %; n.s.). An den beiden Gefäßlokalisationen mit signifikanten Unterschieden waren die Differenzen im Gegensatz dazu eindeutig (V. sub., Differenz: 419 Blasen \approx 67 %; V. fem., Differenz: 304 Blasen \approx 81 %). Die Abbildungen 26 a und b veranschaulichen die Besonderheiten der drei Gefäßlokalisationen und stellen beide Intervalle getrennt voneinander dar.

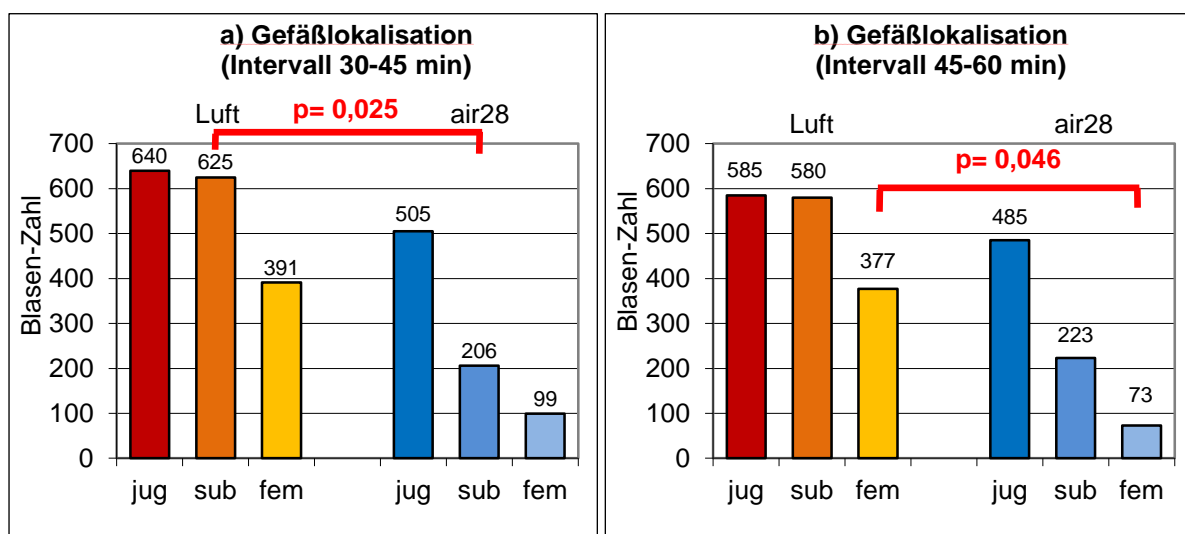


Abb. 26 a, b: Unterschiede in der Blasenanzahl (exklusive Blasenduschen) für die beiden Atemgas-Gruppen in Abhängigkeit von der Gefäßlokalisation (V. jugularis, V. subclavia, V. femoralis) und dem Messintervall (a: 30-45 min, b: 45-60 min).

Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Tauchgruppen ergaben sich:
a) (1. Messintervall) für die V. subclavia; b) (2. Messintervall) für die V. femoralis.

Intervall-Vergleich. Beim Vergleich der beiden Messintervalle zeigte sich, dass in dieser Studie die Anzahl der gemessenen Blasen vom 1. zum 2. Intervall geringfügig abgenommen hatte. Damit lag das Maximum der Blasenanzahl offenbar vor Erreichen von 60 min nach Tauchgangsende. Demnach zeigten sich sowohl in der Gegenüberstellung der einzelnen Gefäßlokalisationen (jug, sub, fem) als auch in der Auswertung des Gesamt-Gefäßsystems (jug+sub+fem) signifikante Unterschiede.

In der Luft-Gruppe wurden in toto 1656 Blasen (30,7 / min / Taucher) und in der air28-Gruppe 810 Blasen (14,9 / min / Taucher) nachgewiesen ohne die Blasenduschen mit einzubeziehen. Die kumulativen Werte (jug+sub+fem) unterschieden sich signifikant ($p=0,050$). Tabelle 14 und Abb. 27 fassen diese Ergebnisse zusammen.

Tab. 14: Gesamt-Gasblasenanzahl der drei Gefäßlokalisationen in Abhängigkeit vom verwendeten Gasgemisch.

Anzahl der Blasen -In Summe- jug+sub+fem	Luft (Blasen / min / Taucher)		air28 (Blasen / min / Taucher)		Signifikanz (U-Test)	
	Blasenduschen		Blasenduschen		Blasenduschen	
	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
1. Intervall: 30-45 min	1656 (30,7)	1845 (34,2)	810 (14,9)	948 (17,6)	0,050	0,047
2. Intervall: 45-60 min	1542 (28,6)	1817 (33,7)	781 (14,5)	953 (17,7)	0,346	0,088

Zwischen der air28-Gruppe und der Luft-Gruppe bestanden signifikante Unterschiede im 1. Intervall im Gesamt-Gefäßsystem (jug+sub+fem) und eine leichte Tendenz im 2. Intervall, wenn die Blasenduschen mit einbezogen wurden.

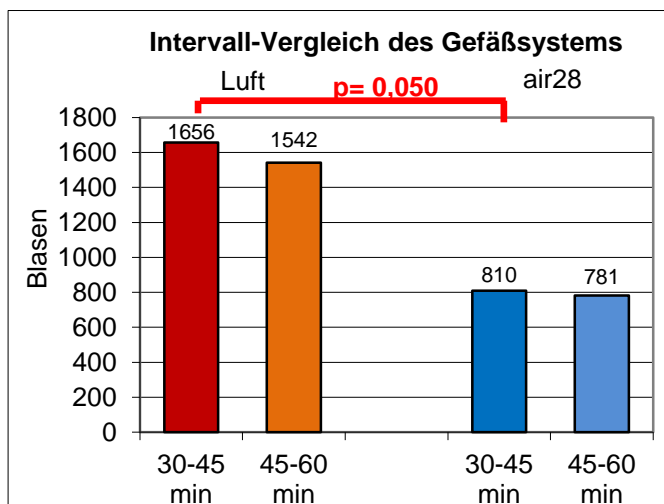


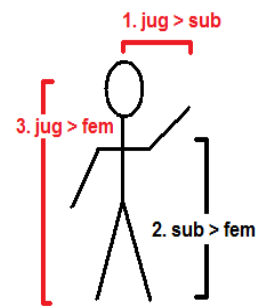
Abb. 27: In der Luft-Gruppe und in der air28-Gruppe fiel die Blasenanzahl vom 1. zum 2. Messintervall geringfügig ab. Bei dieser Darstellung wurden die drei Messlokalisationen zu einem Gesamt-Gefäßsystem (jug+ sub+fem) zusammengefasst. Die Gesamtzahl der Blasen war im 1. Intervall in der Luft-Gruppe signifikant höher als in der air28-Gruppe ($p= 0,050$).

Kompartiment-Vergleich. Zwischen den drei verschiedenen Messorten (Kompartimente) ergaben sich bei der Blasenzahl signifikante Unterschiede. Tabelle 15 fasst die Unterschiede zwischen den drei Kompartimenten zusammen und die Abbildungen 28 a und b stellen die beiden Intervalle der Atemgas-Gruppen dar.

Die größte Differenz ergab sich im 1. Intervall in der air28-Gruppe zwischen der V. jugularis und der V. femoralis ($p=0,0000287$). Ähnlich deutlich war der Unterschied zwischen der V. jugularis und der V. subclavia ($p=0,0000638$). Lediglich von der V. subclavia zur V. femoralis bestand kein signifikanter Unterschied. Insgesamt waren die Unterschiede innerhalb der air28-Gruppe deutlicher.

Tab.15: Vergleich der Blasenzahl zwischen den Kompartimenten der Studien-Gruppe.

Kompartimente		Luft Blasenzahl (p)	air28 Blasenzahl (p)
1. Intervall (30-45 min)	1. jug > sub	810>627 (0,041)	625>224 (0,000)
	2. sub > fem	627>408 (0,107)	224>99 (0,147)
	3. jug > fem	810>408 (0,001)	625>99 (0,000)
2. Intervall (45-60 min)	1. jug > sub	835>600 (0,026)	640>240 (0,000)
	2. sub > fem	600>382 (0,148)	240>73 (0,277)
	3. jug > fem	835>382 (0,001)	640>73 (0,000)



Unabhängig vom Atemgas zeigte sich ein signifikanter Unterschied in der Anzahl der Blasen (incl. Blasenduschen) von der V. jugularis zur V. subclavia und von der V. jugularis zur V. femoralis. Die Unterschiede waren in der air28-Gruppe deutlicher. Der Zusammenhang wird im rechten Schema graphisch qualitativ dargestellt. Rote Linien zeigen signifikante Unterschiede an. (Wilcoxon-Test mit Bonferroni-Adjustierung)

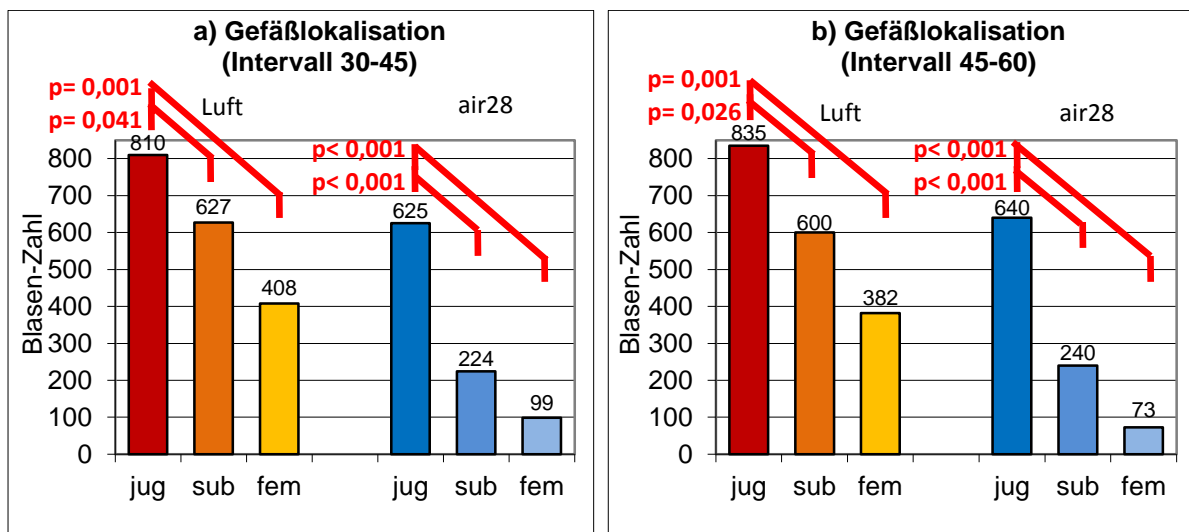


Abb. 28 a, b: Unterschiede in den beiden Tauchgruppen und für die beiden Messintervalle (a: 1. Intervall; b: 2. Intervall) anhand der verschiedenen Gefäßlokalisationen (jug, sub, fem). Die Abbildung zeigt Blasen Zahlen inklusive Blasenduschen. Unabhängig vom Atemgas bestehen für beide Studiengruppen in beiden Intervallen signifikante Unterschiede zwischen den Messwerten V. jugularis und V. subclavia und zwischen V. jugularis und V. femoralis.

3.4.2. Auswertung der Scores

Zur Auswertung der Scores wurden die Spencer-Verteilung (SV), der Spencer-Score (SS) und der erweiterte Spencer-Score (ESS) verwendet. Die in der reinen Blasenzählung durchgeführten Berechnungen 'mit und ohne Blasenduschen' wurden für die Ausarbeitung der Scores nicht durchgeführt, da diese bereits in die verschiedenen Scores integriert sind.

Die Gegenüberstellung der Studiengruppen mittels Scores (SV; SS; ESS) spiegeln dabei die allgemeine Blasenzählung wider (s.o. und vgl. Tab. 13 und 14). Es zeigten sich die bereits in der einfachen Blasenzählung signifikanten Unterschiede. Allerdings traten diese Unterschiede nicht immer in allen Scores zugleich auf.

Gefäßlokalisationen (V. jugularis, V. subclavia, V. femoralis). Im ersten Messintervall unterschieden sich die beiden Studiengruppen in den Score-Werten des ESS an der V. subclavia signifikant ($p=0,031$) und in den Score-Werten von SV und SS nur tendenziell voneinander.

Im 2. Intervall war die Blasenanzahl in beiden Gruppen an der V. femoralis im SS ($p=0,044$) und ESS ($p=0,048$) signifikant und im SV ($p=0,056$) tendenziell unterschiedlich. Tab. 16 komplettiert den Score-Vergleich der beiden Intervalle.

Tab. 16: Auswertung der Blasenzählung anhand der verschiedenen Scores unter Berücksichtigung der Gefäßlokalisationen und beider Intervalle.

-Einzel- (jug, sub, fem)		p-Werte: Luft vs air28 (U-Test)		
		SV	SS	ESS
Score				
1. Intervall (30-45 min)	jug	0,259	0,150	0,158
	sub	0,067	0,078	0,031
	fem	0,089	0,075	0,100
2. Intervall (45-60 min)	jug	0,271	0,211	0,718
	sub	0,121	0,122	0,103
	fem	0,056	0,044	0,048

Im ESS besteht im 1. Intervall ein signifikanter Unterschied an der V. subclavia und im 2. Intervall im SS und ESS an der V. femoralis. SV: Spencer-Verteilung; SS: Spencer-Score; ESS: erweitertes Spencer-Score.

Demnach spielte es für die Ergebnisse dieser Studie eine geringere Rolle, ob einem Taucher ein Wert aus den standardmäßig eingesetzten Scores zugeteilt wurde, oder ob die absolute Blasenzahl ausgewertet wurde. Auf eine erneute graphische Darstellung wurde daher verzichtet.

Intervall-Vergleich. Auch für das Gesamt-Gefäßsystem (jug+sub+fem) sollten die in den beiden Mess-Intervallen gemessenen Score-Werte einander gegenüber gestellt werden. Für die unterschiedlichen Scores nach Spencer (SV; SS; ESS) ergeben sich folgende Ergebnisse.

Für die SV wurde in der air28-Gruppe für das gesamte Gefäßsystem (jug+sub+fem) ein Score-Wert von $1,52 \pm 1,44$ (Mittelwert \pm Standardabweichung) errechnet, in der Luft-Gruppe lag der Wert mit $2,46 \pm 2,72$ etwas höher. Diese Score-Werte waren in der SV zum 2. Intervall 45-60 min nach dem Tauchgang abgefallen (air28: $1,46 \pm 1,50$; Luft: $2,30 \pm 2,65$).

Im 1. Intervall lagen die Werte des SS mit $2,17 \pm 2,03$ in der air28-Gruppe ein wenig höher ebenso wie in der Luft-Gruppe mit $3,26 \pm 2,96$. Auch hier fielen die Score-Werte zum 2. Intervall - wenn auch gering - ab (air28: $2,11 \pm 1,91$; Luft: $3,20 \pm 2,99$).

Im ESS lag der Wert in der Luft-Gruppe mit $2,69 \pm 2,89$ etwas höher als in der air28-Gruppe mit $1,60 \pm 1,81$. Diese Score-Werte fielen auch für den ESS zum 2. Intervall etwas ab (Luft: $2,48 \pm 2,95$; air28: $1,59 \pm 1,73$).

Die Signifikanzniveaus der Gegenüberstellung des Gesamt-Gefäßsystems beider Studiengruppen anhand der verschiedenen Scores zeigt Tab. 17. Der SS und ESS lieferten dabei im 1. Intervall signifikante Unterschiede (SS: $p=0,038$; ESS: $p=0,025$).

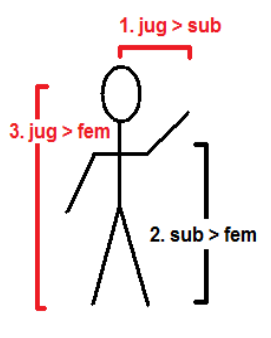
Tab. 17: Auswertung der Blasenählung anhand der verschiedenen Scores unter Berücksichtigung des Gesamt-Gefäßsystems (jug+sub+fem) und beider Intervalle.

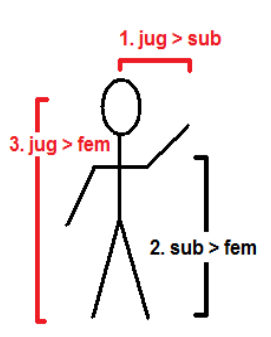
-In Summe- jug+sub+fem	p-Werte: Luft vs air28 (U-Test)		
	SV	SS	ESS
Score			
1. Intervall (30-45 min)	0,087	0,038	0,025
2. Intervall (45-60 min)	0,105	0,066	0,152

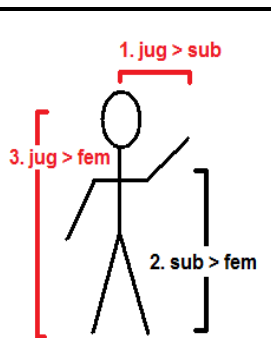
Im SS und im ESS bestehen signifikante Unterschiede im 1. Intervall. SV: Spencer-Verteilung; SS: Spencer-Score; ESS: erweitertes Spencer-Score.

Kompartiment-Vergleich. Die drei verschiedenen Messorte (Kompartimente) wurden zudem mit Hilfe der Scores verglichen (Tab. 18). Die Vergleiche wurden mit dem Wilcoxon-Test durchgeführt und anschließend mit einer Bonferroni-Adjustierung korrigiert.

Tab. 18 a, b, c: Vergleich der Blasenanzahl an drei Gefäßlokalisationen mit Hilfe der Spencer-Verteilung (a), des Spencer-Scores (b) und des erweiterten Spencer-Scores (c) innerhalb der jeweiligen Atemgas-Gruppe.

a) Spencer Verteilung		p-Werte: Luft	p-Werte: air28	
1. Intervall 30-45 min	1. jug > sub	0,047	0,000	
	2. sub > fem	0,116	0,489	
	3. jug > fem	0,000	0,000	
2. Intervall 45-60 min	1. jug > sub	0,006	0,001	
	2. sub > fem	0,282	0,290	
	3. jug > fem	0,000	0,000	

b) Spencer Score		p-Werte: Luft	p-Werte: air28	
1. Intervall 30-45 min	1. jug > sub	0,001	0,000	
	2. sub > fem	0,242	0,269	
	3. jug > fem	0,000	0,000	
2. Intervall 45-60 min	1. jug > sub	0,000	0,000	
	2. sub > fem	0,508	0,233	
	3. jug > fem	0,000	0,000	

c) erweiterter Spencer Score		p-Werte: Luft	p-Werte: air28	
1. Intervall 30-45 min	1. jug > sub	0,023	0,000	
	2. sub > fem	0,216	0,375	
	3. jug > fem	0,000	0,000	
2. Intervall 45-60 min	1. jug > sub	0,009	0,001	
	2. sub > fem	0,524	0,476	
	3. jug > fem	0,007	0,000	

Es besteht für die Zahl der Blasen (incl. Blasenduschen) unabhängig vom Atemgas ein signifikanter Unterschied von der V. jugularis zur V. subclavia und von der V. jugularis zur V. femoralis. Die Unterschiede waren in der air28-Gruppe deutlicher. Der Zusammenhang wird im rechten Schema auch graphisch dargestellt. Rote Linien zeigen signifikante Unterschiede an. (Wilcoxon-Test mit Bonferroni-Adjustierung)

Mit diesem Vergleich wurden Unterschiede bestätigt, die sich bereits mit der Auswertung der Blasenzahl ergeben hatten. Die Zahl der Blasen nahm vom Kopf zum Arm und vom Kopf zum Bein signifikant und in der air28-Gruppe ausgeprägter ab. Die höchsten Signifikanz-Niveaus fanden sich beim Spencer-Score.

Demnach spielte es nahezu keine Rolle, welcher der bereits standardmäßig eingesetzten Scores zur Berechnung der Ergebnisse herangezogen wird. Die drei Graduierungsschemata unterschieden sich nur marginal voneinander und lieferten beinahe die gleichen signifikanten Unterschiede.

3.4.3. Einflussfaktor Geschlecht auf die Blasen-Bildung

Bei der Gegenüberstellung der beiden Geschlechter ergaben sich unerwartete Unterschiede. Wurden lediglich nach Tauchern gefahndet, bei denen keine Blasen nachgewiesen werden konnten, so zeigten sich bei 6 von 38 Taucherinnen (15,8 %) insgesamt keine Blasen, bei den Männern waren es lediglich 4 von 70 Tauchern (5,7 %) ($p=0,087$).

Im frühen Intervall hatten 8 von 38 Taucherinnen keine Blasen (Männer: 9 von 70; $p=0,199$). Im späten Intervall fanden sich bei 11 von 38 Taucherinnen keine Blasen (Männer: 10 von 70; $p=0,058$).

Wurden die beiden Intervalle nach dem Gemisch und dem Geschlecht aufgeschlüsselt, wurden im frühen Intervall bei 4 von 20 Luft-Taucherinnen und bei 3 von 34 Luft-Tauchern keine Blasen nachgewiesen ($p=0,221$). Im Vergleich der air28-Gruppen konnten im frühen Intervall bei 4 von 18 air28-Taucherinnen und bei 6 von 36 air28-Tauchern keine Blasen detektiert werden ($p=0,440$). Im späten Intervall lag die Anzahl der Luft-Taucherinnen ohne Blasen bei 7 von 20, und damit signifikant höher als bei den Luft-Tauchern (2 von 34; $p=0,009$). In der air28-Gruppe hatten 4 von 18 Taucherinnen keine Blasen, bei den Männern waren es 8 von 36 ($p=0,627$).

Gefäßlokalisationen (V. jugularis, V. subclavia, V. femoralis). Weiterhin wurden die drei Gefäßlokalisationen bei den beiden Geschlechtern einzeln und in Abhängigkeit vom Atemgemisch verglichen. Bei den Frauen waren in beiden Intervallen an allen Lokalisationen in der Luft-Gruppe im Durchschnitt weniger Blasen als bei den männlichen Teilnehmern nachweisbar. Jedoch wurden in der air28-Gruppe insbesondere an der V. jugularis bei den Frauen mehr Blasen als bei den männlichen Tauchern festgestellt. Zur Veranschaulichung dieser komplexen Ergebnisse wurden vier Abbildungen erstellt (vgl. Abb. 29 a, b (oben) und 29 c, d (unten)).

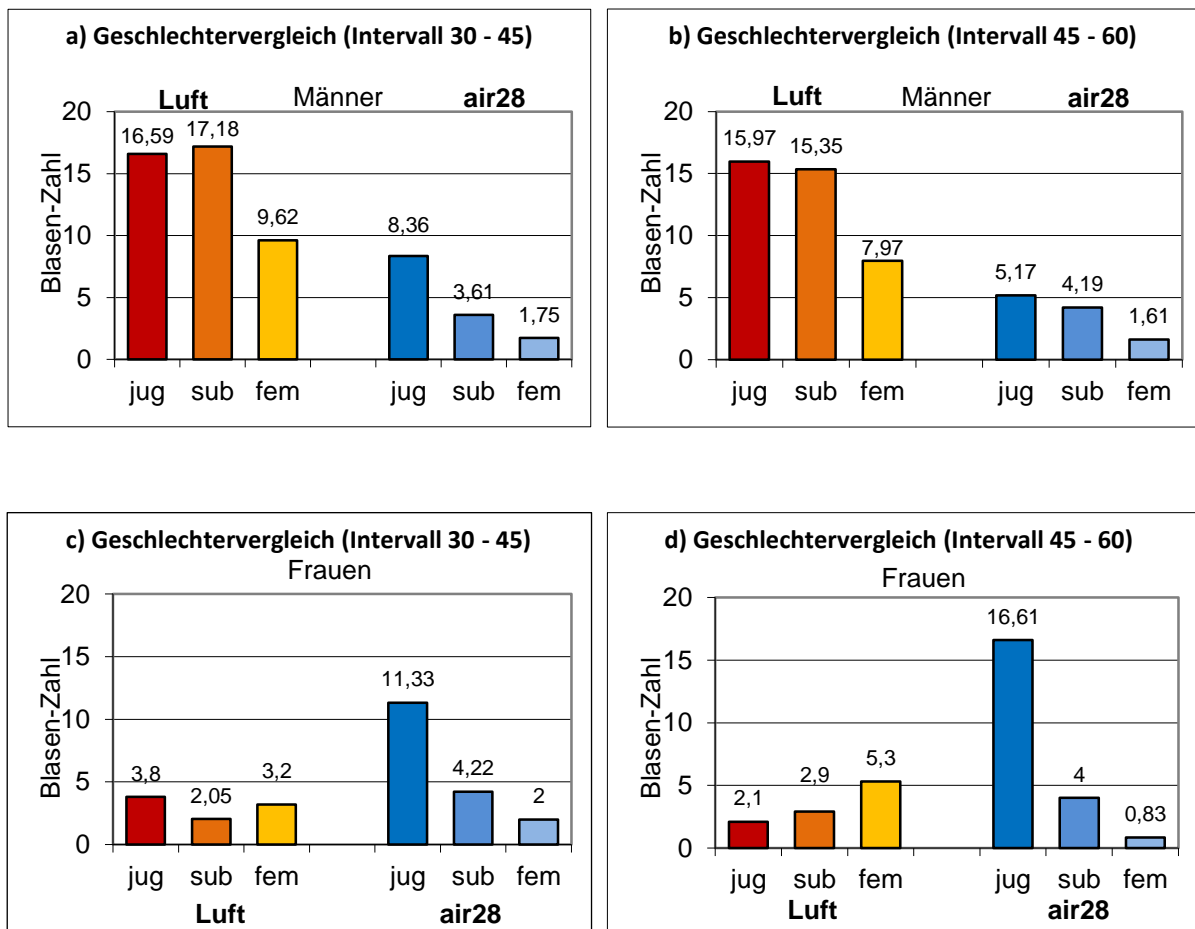


Abb. 29 a, b (oben) und 29 c, d (unten): Graphische Darstellung der Intervalle (links: 1. Intervall; rechts: 2. Intervall) und der beiden Geschlechter (Männer (a, b); Frauen (c, d)) in Abhängigkeit des Atemgemisches. Die Männer unterschieden sich stark im Luft-Gemisch und weniger stark im air28-Gemisch von den Frauen.

Intervall-Vergleich. Im Vergleich der beiden Mess-Intervalle anhand des Gesamt-Gefäßsystems (jug+sub+fem) hatten die Frauen im 1. Intervall $13,1 \pm 25,8$ Blasen je Taucherin und die Männer $28,1 \pm 47,1$ je Taucher ($p=0,068$). Somit fanden sich bei den Frauen im Durchschnitt weniger als halb so viele Blasen wie bei den Männern. Im 2. Intervall wurden bei den Frauen durchschnittlich 9 Blasen je Taucherin weniger als bei den Männern gemessen ($15,9 \pm 27,8$ vs. $24,7 \pm 46,5$; ($p=0,141$)). Dabei erreichte der Unterschied an der V. subclavia im 2. Intervall fast statistische Signifikanz ($p=0,052$).

Vermutlich durch den höheren Ausgangswert nahm die Zahl der Blasen bei den Männern unabhängig vom Atemgas vom 1. zum 2. Intervall gegenüber den Frauen stärker ab. Bei den Frauen stiegen an einzelnen Gefäßlokalisationen und in Abhängigkeit vom Atemgemisch die Zahl der Blasen im 2. Messintervall sogar noch leicht an (Luft-Gruppe: V.fem.; air28-Gruppe: V.jug.).

Kompartiment-Vergleich. Der Kompartiment-Vergleich zeigt für Männer größere Gewebsunterschiede als für Frauen. Bei den männlichen Tauchern wurde in beiden Intervallen ein signifikanter Blasenunterschied von der V. subclavia zur V. femoralis deutlich (1. Intervall: $p=0,048$; 2. Intervall: $p=0,015$), zwischen der V. jugularis und der V. subclavia lag kein solcher Blasenunterschied vor. Diese Ergebnisse decken sich mit dem Kompartiment-Vergleich durch die Scores (Signifikanzniveau zwischen $p=0,045$ und $p=0,069$ in der Spencer-Verteilung).

Bei den Frauen sowohl im ersten als auch zweiten Intervall kein signifikanter Blasenunterschied zwischen den drei Messlokalisationen festgestellt werden.

Andere Einflussfaktoren (BMI, Taucherfahrung, Alter). Da sich bereits geschlechts- und atemgemischabhängige Besonderheiten ergaben, kann eine weitere Prüfung der Fragen, ob der BMI, die Taucherfahrung oder das Alter einen Einfluss auf die Blasenbildung haben, durch diese Untersuchung nicht abschließend geklärt werden. Für die Einflussfaktoren BMI, Taucherfahrung und Alter wurde keine ausreichende Fallzahl erreicht, um einen sinnvollen statistischen Vergleich zu erlauben.

3.5. Kognitive Leistung (Gedächtnis- und Aufmerksamkeitstest)

Für die Bestimmung der kognitiven Unterwasser-Leistung wurden der 'Verbale-Lern- und Merkfähigkeits-Test' (VLMT) (Kurzzeit- und Langzeit-Gedächtnis) und der 'Zahlenverbindungs-Test' (ZVT) (Aufmerksamkeit) eingesetzt. In die Auswertung wurden je 54 Teilnehmer in der Luft- und in der air28-Gruppe einbezogen. Es liegen somit Daten vom gesamten Kollektiv vor.

In den Abbildungen zur kognitiven Leistung wurde auf die graphische Darstellung der Standardabweichungen einzelner Messwerte zu Gunsten der Akzentuierung signifikanter Messergebnisse und zur Erhaltung der Übersichtlichkeit verzichtet. Die Standardabweichungen sind jedoch in den Tabellen und im Text angegeben.

3.5.1. VLMT

Bei der regulären Auswertung werden lediglich die korrekt erinnerten Wörter herangezogen und diese anschließend mit Richtwerttabellen für Alter, Geschlecht und Bildungsgrad verglichen. In dieser Studie wurde der Test unter Wasser als 'Visueller-Lern- und Merkfähigkeitstest' durchgeführt, wodurch der Vergleich mit den Richtwerten, die einem 'Verbalen-Lern- und Merkfähigkeitstest' entsprechen und in akustischer Weise durchgeführt wurden, nicht sinnvoll ist.

Bei beiden Tauchgruppen wurden daher für das Kurzzeit-Gedächtnis (short delay; SD) und für das Langzeit-Gedächtnis (long delay; LD) die Anzahl der richtig erinnerten Begriffe, die Anzahl der Fehler-Wörter und die Anzahl der Teilnehmer erfasst, welche Fehler gemacht haben.

Die Anzahl der korrekten Begriffe lag im Kurzzeit-Gedächtnis bei den air28-Tauchern bei $7,9 \pm 2,0$ (Mittelwert \pm Standardabweichung) und bei den Luft-Tauchern bei $7,4 \pm 1,9$. Im Langzeit-Gedächtnis änderte sich diese Relation nicht (air28 $6,8 \pm 2,2$; Luft $6,4 \pm 2,2$). Bei der Anzahl der Fehler pro Taucher ergaben sich für das Kurzzeit-Gedächtnis keine Unterschiede (air28: $0,7 \pm 1,1$; Luft: $0,7 \pm 1,0$). Für das Langzeit-Gedächtnis war der Unterschied signifikant (air28: $1,0 \pm 1,6$ vs Luft $1,3 \pm 1,3$; $p=0,039$). Während in der air28-Gruppe die Fehler-Anzahl insgesamt von 38 (SD) auf 52 (LD) zugenommen hatte, waren es in der Luft-Gruppe 37 und 71 Fehler. Ebenso nahm die Anzahl der Teilnehmer mit Fehlern bei der air28-Gruppe nur um 7,4 % und in der Luft-Gruppe um 22,2 % ($p=0,078$) zu (Tab. 19 und Abb. 30).

Tab. 19: Ergebnisse des Kurzzeit- (SD) und Langzeitgedächtnis- (LD) Tests (VLMT).

VLMT		Luft	air28	Luft vs air28 (U-Test)
Anzahl korrekter Begriffe pro Teilnehmer	SD	$7,4 \pm 1,9$	$7,9 \pm 2,0$	0,260
	LD	$6,4 \pm 2,2$	$6,8 \pm 2,2$	0,366
Anzahl der Fehler in der Gruppe, (pro Teilnehmer)	SD	37 ($0,7 \pm 1,0$)	38 ($0,7 \pm 1,1$)	0,858
	LD	71 ($1,3 \pm 1,3$)	52 ($1,0 \pm 1,6$)	0,039
Teilnehmer, die Fehler machten (% der Gruppe)	SD	23 (42,6)	24 (44,4)	0,846
	LD	35 (64,8)	28 (51,6)	0,172

Zusammengestellt sind für die beiden Atemgas-Gruppen die korrekt erinnerten Begriffe pro Teilnehmer. Die Anzahl aller Fehler ist pro Gruppe und in Klammern pro Teilnehmer angegeben. Die Anzahl der Teilnehmer, die Fehler machten, ist absolut und in Klammern als prozentualer Fehler angegeben.

Laut VLMT-Richtwerten hätte der Mittelwert über Wasser bei ungefähr 9 richtig erinnerten Begriffen liegen sollen. Dieser Mittelwert wurde von keiner der beiden Atemgas-Gruppen erreicht. Abbildungen 30 a, b, c verdeutlichen den Unterschied zwischen beiden Gruppen und zeigen den signifikanten Anstieg der Fehler im Langzeitgedächtnis.

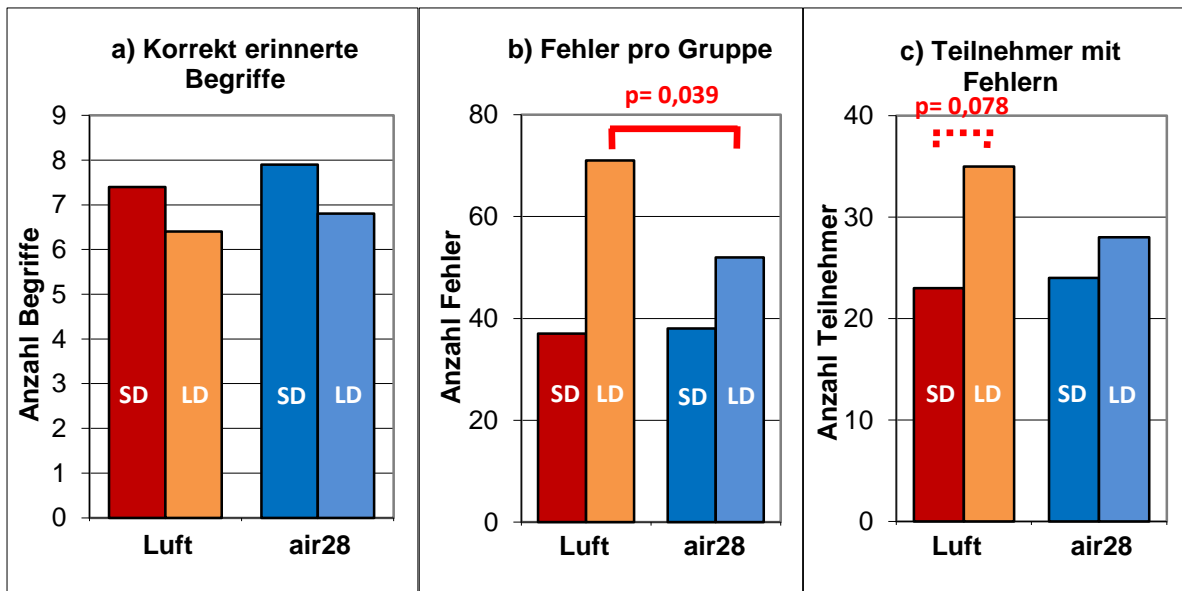


Abb. 30 a, b, c: Gedächtnistest in Abhängigkeit vom Atemgemisch. a) Die Anzahl der korrekt erinnerten Begriffe unterschied sich sowohl im Kurzzeit-(SD)- als auch im Langzeit-(LD)-Gedächtnis nicht signifikant voneinander. b) Die Anzahl der Fehler im Langzeitgedächtnis war gegenüber dem Kurzzeitgedächtnis in der Luft-Gruppe signifikant angestiegen ($p=0,039$). Die eckige Klammer verweist auf einen Unterschied zwischen den Gruppen. c) Die Anzahl der Taucher, die Fehler machten, hatte in der Luft-Gruppe vom Kurzzeit- zum Langzeit-Gedächtnis tendenziell zugenommen ($p=0,078$).

3.5.2. ZVT

Bei der regulären Auswertung wird lediglich die Zeit, die benötigt wird, um die Zahlen 1 bis 90 zu verbinden, gemessen und diese anschließend mit Richtwerttabellen für Alter, Geschlecht und Bildungsgrad verglichen. Über Wasser dauert die korrekte Lösung des Tests ungefähr 90 s.

In die vorliegende Auswertung wurden nicht nur die benötigte Zeit sondern auch die gemachten Fehler einbezogen um zu prüfen, ob eine der beiden Gruppen eine erhöhte Fehlerquote hatte. Es wurden sowohl die direkten Fehler ('fouls') als auch die indirekten Fehler ('Schussfehler'=SF) ausgewertet. Ein Teilnehmer, welcher vermehrt Fehler macht, benötigt mehr Zeit. Die Ergebnisse sind in Tab. 20 zusammengefasst.

Tab. 20: Ergebnisse des Aufmerksamkeits-Tests (ZVT).

ZVT	Luft	air28	Luft vs air28 (U-Test)
Dauer des ZVT [s]	87,0 ± 30,3	85,5 ± 26,7	0,687
Anzahl fouls pro Gruppe, (pro Teilnehmer)	15 (0,3 ± 0,6)	9 (0,2 ± 0,4)	0,068
Anzahl Schussfehler pro Gruppe, (pro Teilnehmer)	22 (0,4 ± 0,7)	19 (0,4 ± 0,6)	0,755
Anzahl Gesamtfehler (fouls und SF) pro Gruppe, (pro Teilnehmer)	37 (0,7 ± 0,8)	28 (0,5 ± 0,8)	0,291
Anzahl Gesamtfehler (fouls=2 und SF=1) pro Gruppe, (pro Teilnehmer)	52 (1,0 ± 1,3)	37 (0,7 ± 1,0)	0,273

Die Fehler sind pro Gruppe und in Klammern pro Teilnehmer innerhalb der Gruppe angegeben. In der dritten Datenzeile wurden Fouls und Schussfehler mit einfachem Fehlerwert bewertet. In der vierten Datenzeile wurden Fouls als schwerwiegendere Fehler mit 2 Fehlerpunkten gewertet und Schussfehler mit einfachem Fehlerpunkt. Daten sind Mittelwerte ± Standardabweichungen.

Es ergab sich nur ein geringer zeitlicher Unterschied für die Durchführungsdauer des Tests (air28: 85,5 ± 26,7 s vs Luft: 87,0 ± 30,3 s). Auch bei der mittleren Anzahl der fouls pro Taucher ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen der air28-Gruppe und der Luft-Gruppe (0,2 ± 0,4 vs 0,3 ± 0,6). In der air28-Gruppe wurden 9 fouls begangen und in der Luft-Gruppe waren es mit 15 tendenziell mehr (p=0,068).

Die Aufgabe, die Zahlen in korrekter aufsteigender Reihenfolge miteinander zu verbinden, hätte ein Teilnehmer mit Schussfehlern ordnungsgemäß jedoch mit vermehrtem Zeitaufwand gelöst. Bei einem foul wäre die an den Teilnehmer gestellte Aufgabe durch 'Auslassen' einer oder mehrerer Zahlen nicht erfüllt worden. Daher wurden letztere Fehler gravierender bewertet. Die Anzahl der fouls und Schussfehler in Summe war in der Luft-Gruppe mit 37 gegenüber der air28-Gruppe mit 28 höher. Es ergaben sich aber auch bei diesem Vorgehen keine signifikanten Unterschiede (p=0,273).

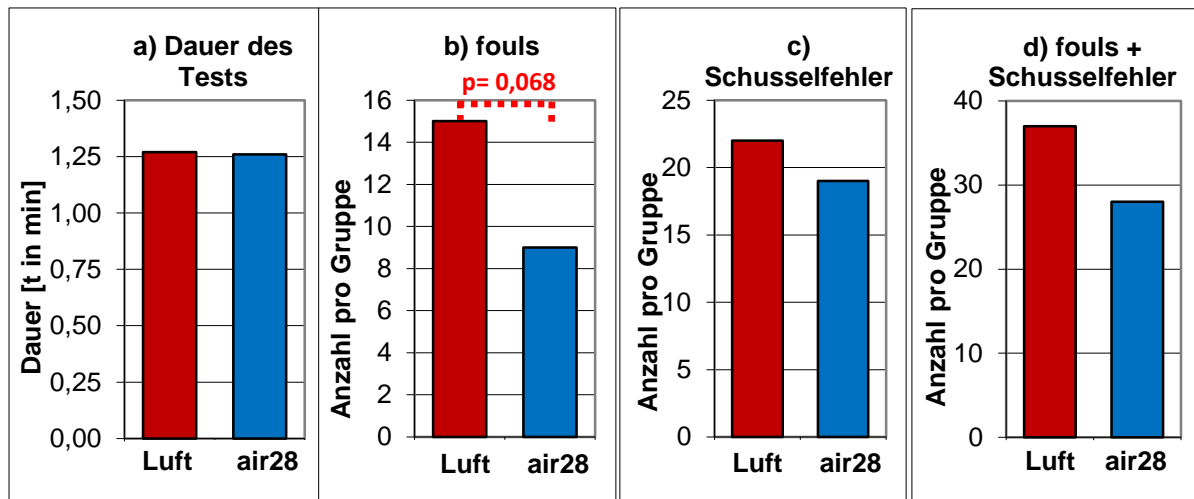


Abb. 31 a, b, c, d: Aufmerksamkeitstest (ZVT). a) Bei der Testdauer ergaben sich keine Unterschiede. b) Bei den Fouls zeigte sich eine starke Tendenz zu mehr Fehlern in der Luft-Gruppe ($p=0,068$). c) Bei den Schussfehlern schnitt die Luft-Gruppe nicht signifikant unterschiedlich ab, d) auch bei der Gesamtzahl der Fehler war der Unterschied zwischen der air28-Gruppe und der Luft-Gruppe nicht signifikant.

3.5.3. Einflussfaktoren auf die kognitive Leistung

Wortliste. Beim Gedächtnistest wurden zwei verschiedene Wortlisten wechselweise verwendet. Bei 108 Testpersonen und 54 Testläufen wurde der Merkfähigkeitstest 29-mal mit der Wortliste (1) und 25-mal mit der Wortliste (2) durchgeführt.

Daher sollte auch untersucht werden, ob die Wortlisten selbst einen Einfluss auf die Ergebnissen des Gedächtnistests genommen hatten. Es konnte jedoch keine Korrelation weder in Bezug auf das Atemgemisch noch in Bezug auf das Geschlecht festgestellt werden.

Geschlecht. Während der Durchführung des Gedächtnis-Tests fiel auf, dass Taucherinnen mehr Begriffe erinnerten als Taucher. Daher wurde dieser Zusammenhang statistisch untersucht. Ebenso wie in der geschlechtsunabhängigen Auswertung, wurden in der air28-Gruppe immer mehr Begriffe erinnert als in der Luft-Gruppe.

Die Frauen der air28-Gruppe erinnerten im Kurzzeit-Gedächtnis im Durchschnitt 9,1 Begriffe und in der Luft-Gruppe 8,2 Begriffe. Bei den Männern waren es in der air28-Gruppe mit 7,2 Begriffen und in der Luft-Gruppe mit 7,4 Begriffen deutlich weniger. Im Langzeit-Gedächtnis blieb dieses Verhältnis bestehen. Dort erinnerten sich die Frauen in der air28-Gruppe an 8,2 Begriffe und in der Luft-Gruppe an 7,7 Begriffe. Die Männer erinnerten lediglich 6,1 Begriffe in der air28-Gruppe und 5,7 Begriffe in der Luft-Gruppe.

Demnach reproduzierten in diesem Test die Frauen zu beiden Zeitpunkten signifikant mehr Begriffe (SD: $p=0,0009$; LD: $p=0,00005$). Die Unterschiede in der Fehler-Anzahl und der Anzahl der Teilnehmer mit Fehler waren nicht signifikant (Abb. 32 a, b, c).

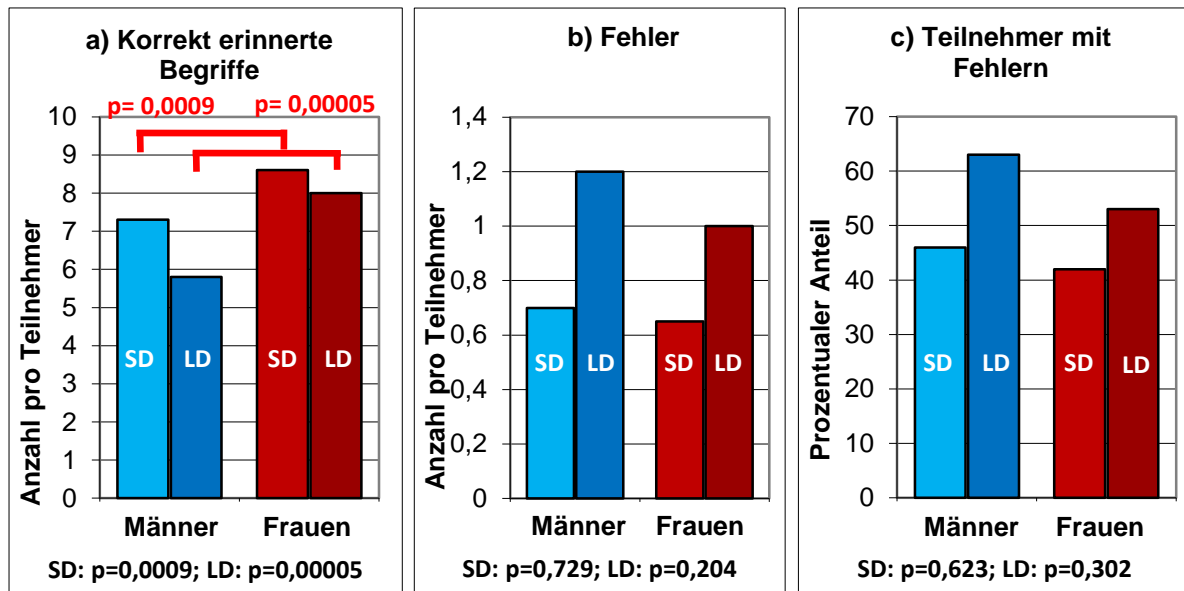


Abb. 32 a, b, c: Unterschiede zwischen Frauen und Männern beim Gedächtnistest. a) Frauen reproduzierten sowohl im Kurzzeit-(SD)-Gedächtnis ($p=0,0009$) als auch im Langzeit-(LD)-Gedächtnis ($p=0,00005$) signifikant mehr Begriffe. b) Bei der Anzahl der Fehler pro Teilnehmer zeigten sich keine signifikanten Unterschiede. c) Bei der Anzahl der Teilnehmer mit Fehlern ergaben sich ebenfalls keine signifikanten Unterschiede.

Taucherfahrung, Alter. Zwischen der kognitiven Leistung und der Taucherfahrung (= Anzahl der Tauchgänge) bestand sowohl bei den weiblichen als auch bei den männlichen Teilnehmern keine Korrelation. Jedoch bestand eine Korrelation zwischen Taucherfahrung und dem Alter. Demnach waren ältere Taucher auch erfahrener.

Die weitere Analyse ergab einen inversen Zusammenhang zwischen dem Alter und der kognitiven Leistung in beiden kognitiven Tests. Dementsprechend machten die älteren Teilnehmer insgesamt mehr Fehler und erinnerten weniger richtige Begriffe im Gedächtnistest, und im Aufmerksamkeitstest waren sie langsamer und machten mehr fous und Schussfehler. Die kognitive Leistungsfähigkeit nahm also mit fortschreitendem Alter ab. Dieser Zusammenhang war unabhängig vom Atemgas und vom Geschlecht.

Die Regressionsanalyse ließ keinen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der beiden durchgeführten kognitiven Tests zum Atemgemisch erkennen (s. Tab. 19 und 20).

3.6. Vegetative Modulation der Herzfrequenz

Der Einfluss des vegetativen Nervensystems sollte durch die Überwachung der Herzfrequenz (HF) während des Tauchganges untersucht werden. Aufgrund technischer Ausfälle kamen nur 96 Teilnehmer (von 108) zur Auswertung, d.h. in der air28-Gruppe und in der Luft-Gruppe befanden sich je 48 Taucher.

3.6.1. Herzfrequenz während des Tauchganges

Bei den Studientauchgängen handelte es sich um 'leichte' Tauchgänge. Es gab keine Strömungen, der Tauchgang erfolgte in einem ruhigen Ablauf, die körperliche Anstrengung war leicht, und es bestand eine sehr gute Sicht. Weil der physische Stress gering war, wurde die HF auch – mit Einschränkungen – als Index für psychischen Stress herangezogen, welchem die Taucher durch die kognitiven Tests eventuell ausgesetzt waren.

Weil die einzelnen Tauchgänge geringfügig unterschiedlich lang waren – sie dauerten im Mittel 62 ± 5 min (Mittelwert \pm Standardabweichung) – wurde die Dauer der einzelnen Tauchgänge für die Auswertung auf 100 % gesetzt und in 10 %-Schritte (Perzentile) aufgeteilt. Jeder dieser 10 Abschnitte dauerte damit etwa 6 Minuten (entspricht einer Perzentile). Innerhalb jedes einzelnen Abschnittes wurde die HF gemittelt.

Zu Tauchbeginn betrug die durchschnittliche HF für das gesamte Kollektiv 98 ± 13 /min. In der Luft-Gruppe lag die HF bei 97 ± 16 /min und in der air28-Gruppe bei 100 ± 12 /min. Demnach war der Unterschied zwischen den Atemgas-Gruppen statistisch nicht signifikant ($p=0,233$).

Am Ende des Tauchganges war die HF für das gesamte Kollektiv auf 79 ± 11 /min (-19 %) abgefallen. In der Luft-Gruppe reduzierte sich die HF auf 80 ± 12 /min (-18 %) und in der air28-Gruppe auf 78 ± 9 /min (-22 %). Dieser Unterschied war ebenfalls statistisch nicht signifikant ($p=0,331$).

Tab. 21: Vergleich der HF zu Beginn und Ende des Tauchganges in Abhängigkeit vom Atemgemisch.

Tauchbeginn	Luft	air28	Luft vs air28 (U-Test)
1. Perzentile	97 ± 16 /min, n = 46	100 ± 12 /min, n = 48	0,233
Tauchende			
10. Perzentile	80 ± 12 /min, n = 47	78 ± 9 /min, n = 48	0,331

Die Dauer der einzelnen Tauchgänge wurde auf 100 % gesetzt und in 10 %-Schritte (Perzentile) aufgeteilt. Bei dem Vergleich der Atemgas-Gruppen zeigten sich sowohl zu Beginn (1. Perzentile), als auch am Ende (10. Perzentile) des Tauchganges keine signifikanten Unterschiede. Die Perzentilen 2.- 9. waren ebenfalls nicht signifikant verschieden.

Der HF-Abfall (ΔHF) betrug in der Luft-Gruppe 17 ± 11 /min und 22 ± 8 /min in der air28-Gruppe. Dieser ΔHF von Perzentile Nr. 1 zu Perzentile Nr. 10 war innerhalb der jeweiligen Studiengruppen deutlich signifikant ($p < 0,000$). Ebenso war in beiden Gruppen der HF-Abfall bis zur 6. Perzentile zur jeweiligen vorherigen Perzentile signifikant ($p < 0,01 - 0,018$). In den letzten 4 Perzentilen blieb die HF nahezu unverändert.

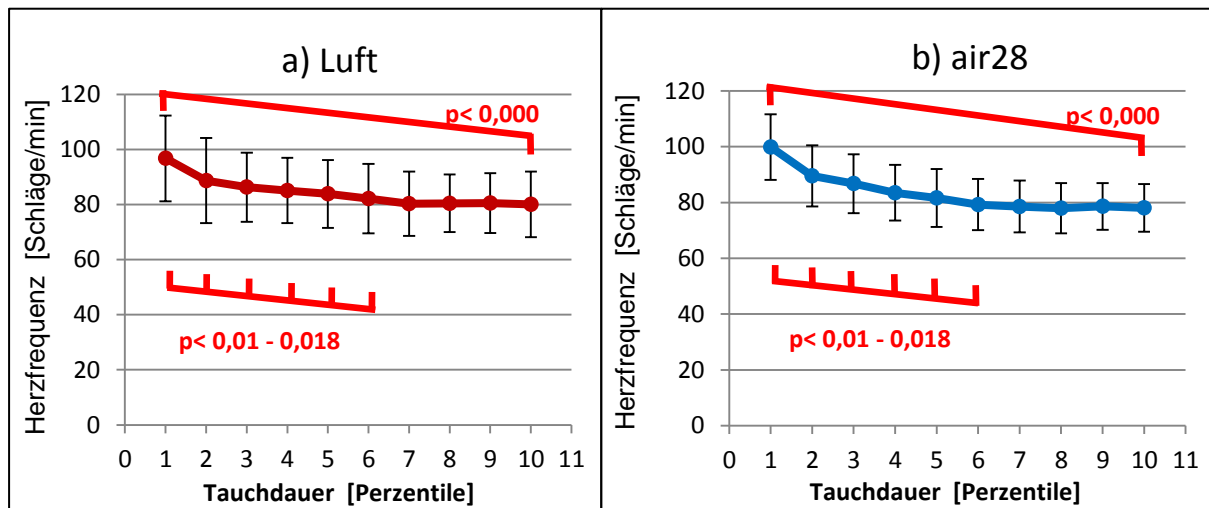


Abb. 33 a, b: Die Herzfrequenz (HF) hatte in beiden Gruppen zwischen dem Beginn und dem Ende des Tauchganges signifikant abgenommen. Die HF fiel in der Luft-Gruppe (a) im Mittel etwas geringer ab als in der air28-Gruppe (b). Der Unterschied in der HF-Abnahme zwischen den beiden Atemgas-Gruppen war statistisch nicht signifikant.

3.6.2. Einflussfaktoren auf die Herzfrequenz während des Tauchganges

Taucherfahrung. Weil erfahrene Taucher den Tauchgang eventuell ruhiger beginnen, könnte das ΔHF bei diesen kleiner als bei weniger erfahrenen Tauchern sein. Daher wurde ΔHF in Abhängigkeit von der Taucherfahrung (= Anzahl der Tauchgänge) untersucht (Abb. 34 a, b).

Zum Zeitpunkt der Submersion ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den unerfahrenen (98 ± 14 /min) und den erfahrenen Tauchern (99 ± 13 /min). In Übereinstimmung mit dem oben berichteten Ergebnis war ΔHF in der air28-Gruppe über den gesamten Erfahrungsbereich geringfügig höher als in der Luft-Gruppe. Die HF fiel bei Tauchern mit wenigen Tauchgängen (ca. 50-100) in der air28-Gruppe um 23 /min im Gegensatz zur Luft-Gruppe mit 17 /min. Bei Tauchern mit ≥ 1000 Tauchgänge fiel die HF in der air28-Gruppe um 20 /min und in Luft-Gruppe um 17 /min (n.s.).

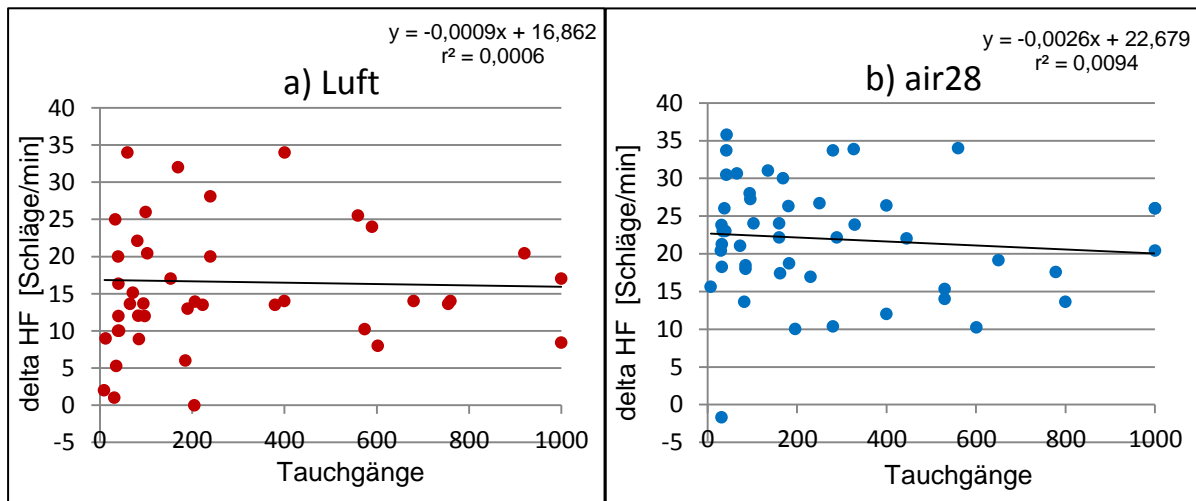


Abb. 34 a, b: Abnahme der Herzfrequenz während der Tauchgänge in Abhängigkeit von der Taucherfahrung (Anzahl der Tauchgänge). (a) Weder in der Luft-Gruppe (b) noch in der air28-Gruppe war der Zusammenhang signifikant. r^2 : Bestimmtheitsmaß

Geschlecht. Überwiegend Frauen haben an der Tauchausrüstung schwer zu tragen. Dadurch hätte bei Frauen die HF zu Tauchbeginn höher als bei Männern sein können und dadurch während des Tauchganges die Möglichkeit zum umfangreicheren Abfall haben können. Das Ausgangswert-Gesetz ('Wilder'sche Gesetz') besagt, dass stark aktivierte vegetative Organe (psycho-physiologische Funktionen) auch stark auf hemmende Reize und schwach auf aktivierende Reize ansprechen (Wilder, 1931).

Dieser Zusammenhang konnte jedoch nicht bestätigt werden. Bei den Frauen lag die HF zu Beginn bei 97 ± 12 /min und bei den Männern bei 99 ± 15 /min ($p=0,597$). Am Ende des Tauchganges war die HF bei den Frauen auf 78 ± 10 /min und bei den Männern auf 80 ± 12 /min abgesunken ($p=0,294$). Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede.

Bei den Frauen reduzierte sich die HR insgesamt um 19 ± 8 /min und bei den Männern um 19 ± 11 /min (n.s.). Am umfangreichsten nahm die HF bei Frauen aus der air28-Gruppe ab (24 ± 7 /min). Es zeigten sich weder in der Luft-Gruppe noch in der air28-Gruppe signifikante Unterschiede in Bezug auf das Geschlecht.

Tab. 22: Reduktion der HF während des Tauchganges in Abhängigkeit vom Geschlecht.

Tauchbeginn	Frauen	Männer	♀ vs ♂ (U-Test)
1. Perzentile	97 ± 12 /min, n = 35	99 ± 15 /min, n = 58	0,597
Tauchende			
10. Perzentile	78 ± 10 /min, n = 37	80 ± 12 /min, n = 59	0,294

Die Dauer der einzelnen Tauchgänge wurde auf 100 % gesetzt und in 10 %-Schritte (Perzentile) aufgeteilt. Bei dem Vergleich der Geschlecht-Gruppen zeigte sich sowohl zu Beginn (1. Perzentile), als auch am Ende (10. Perzentile) des Tauchganges keine signifikanten Unterschiede. Die Perzentilen 2.- 9. waren ebenfalls nicht signifikant verschieden.

Alter. Für die altersabhängige HF-Analyse wurden die Teilnehmer in drei Altersgruppen eingeteilt. Gruppe 1 entsprach allen Teilnehmern jünger als 35 Jahre, Gruppe 2 umfasste Teilnehmer im Alter zwischen 36 und 50 Jahren und Gruppe 3 solche über 51 Jahre.

Unabhängig vom Atemgemisch hatte die älteste Gruppe im Vergleich zu den beiden jüngeren Altersgruppen eine höhere HF während des Tauchens. Bei Tauchbeginn war sie in der Luft-Gruppe 2,9 - 8,2 /min höher und in der air28-Gruppe 2,9 - 5,8 /min höher. Gegen Ende des Tauchganges verringerte sich der Abstand auf 1,8 -4,1 /min in der Luft-Gruppe und 2,9 - 7,1 /min in der air28-Gruppe.

Im Mittel lag die HF in Gruppe 1 bei 77,7 /min über den ganzen Tauchgang. In der mittleren Altersgruppe bei 76,0 /min und in der Altersgruppe > 51 Jahre waren es 80,7 /min. Die Unterschiede in den Altersklassen erreichten keine statistische Signifikanz.

4. DISKUSSION

Tauchen ist eine der Sportarten, die sowohl bei Jugendlichen als auch bei älteren Menschen zunehmend an Popularität gewinnt (Musa & Dimmock, 2012) und darüber hinaus zu einer beliebten Touristenattraktion wurde (Higham & Lück, 2007). Hinter dem SCUBA-Tauchen steht eine Multimillionen-Dollar-Industrie, die von den Zuwachsraten dieses Freizeit-Sports profitiert (Ong & Musa, 2011). Durch diese Studie, die ein umfangreiches Repertoire an Informationen über den Einfluss O₂-angereicherter Luft auf Gerätetaucher liefert, wurden auch Bereiche beleuchtet, welche bisher seltener in der tauchmedizinischen Forschung untersucht wurden. Darunter sind speziell die Einflüsse auf die weiblichen Taucher, regionale Unterschiede bei der Messung der Gasblasen im Körper und der jeweilige Bezug zur Taucherfahrung und zum Alter der Teilnehmer zu nennen.

Durch die präsentierten Resultate wird eine bessere Einschätzung des potentiellen Nutzens moderat O₂-angereicherter Luft unter kritischer Berücksichtigung gesundheitlicher Nachteile für den Taucher möglich.

4.1. Einflussfaktoren

Bei dieser prospektiven Studie bestand durch die Doppelverblindung und die Randomisierung der beiden Studiengruppen kein Risiko zur bewussten Beeinflussung der Messergebnisse. Alle Untersuchungen wurden im Vorfeld eingehend trainiert und wurden stets von der Studienleiterin durchgeführt. Damit entfällt für diese Studie die Gefahr eines Untersucher-bedingten Bias. Einflussfaktoren wie Alter, Geschlecht, Taucherfahrung und Wahl der Wortliste wurden zum jeweiligen Studienteil gesondert betrachtet und im Kapitel 'Ergebnisse' ausführlich dargestellt.

Da alle Teilnehmer der Studie Freiwillige waren, sie dabei ihrem Hobby nachgehen durften und für sich nützliche Erfahrungen sammeln konnten, waren Antriebsbereitschaft und Engagement vermutlich hoch.

Die Umgebungsbedingungen dieser Feldstudie mit erhöhter Lufttemperatur und erheblicher Luftfeuchtigkeit waren über den zweimonatigen Studienzeitraum stabil. Das galt insbesondere auch für die Wassertemperatur. Dennoch können bei einer Feldstudie leichte klimatische Veränderungen die Ergebnisse marginal beeinflussen.

Die Unruhen im soziokulturellen Umfeld Ägyptens durch die provozierten Haiangriffe durch Anfütterung mit Ziegenkadavern zur Belustigung für Taucher und die politischen Unruhen während der Zeit des Staats- und Ministerpräsidenten Husni Mubarak traten erst anderthalb Jahre später im Februar 2011 auf.

4.2. Soziodemografische Daten und Tauchgruppenvergleiche

Die Inhomogenität des Probandenkollektives und die Homogenität zwischen den beiden Studiengruppen stellten ideale Testbedingungen dar, da in der Studie Aussagen für ein typisches Urlaubs- oder Hobbytaucher-Kollektiv erzielt werden sollten. Mit einem prozentual reduzierten Raucheranteil waren die Studienteilnehmer etwas gesundheitsbewusster als die deutsche Durchschnittsbevölkerung (32,4 % vs 44,2 % (Piepho et al., 2008)). Allerdings hatten die Teilnehmer deutlich häufiger voran gegangene Dekompressions-Erkrankungen (DCS) als der Taucherdurchschnitt (6,5 % vs. 0,105 %) angegeben (DAN, 2005).

Trotz bestehender Tauchtauglichkeit wurden bei einem gezielten nachträglichen 'Debriefing' derzeit in Therapie befindliche Erkrankungen wie Asthma, antibiotisch behandelte Lungeninfektion, Epilepsie (keine 5-jährige Anfallsfreiheit) und mehrere Taucher mit Depressionen (unklare Suizidalität und mit z.T. Antidepressiva-Mehrfachkombinationen) genannt. Weiterhin fanden sich ein Fall von M. Hodgkin-bedingter Lungenteilresection und ein traumatisch bedingter Pneumothorax in der Vorgeschichte. Einige dieser Fälle waren nicht mit einer Tauchtauglichkeit vereinbar und stellten teilweise eine absolute Kontraindikation dar (vgl. Tetzlaff et al., 2012).

Die beschriebene Situation ist leider nicht die Ausnahme. Sie lässt sich zum Teil damit erklären, dass die Teilnehmer bei zertifizierten 'Taucher-Ärzten' bei der Selbstauskunft zur Erteilung der Tauchtauglichkeit fehlerhafte Angaben machen, zum Teil werden vorbestehende Erkrankungen aber auch von Ärzten übersehen, und Tauchtauglichkeits-Untersuchungen können bisher auch von Ärzten bescheinigt werden, die hierfür nicht ausreichend qualifiziert sind. Letztendlich können Tauchtauglichkeits-Bescheinigungen an den Tauchbasen nicht mehr auf ihre Korrektheit überprüft werden.

Trotz des Wissens, dass bei diversen Krankheiten keine Tauchtauglichkeit vorliegt oder die Gefahr eher Tauchunfälle zu erleiden erhöht ist, gehen Taucher dieses erhöhte Risiko ein. Sie stellen ihr leibliches Wohlergehen und die körperliche Unversehrtheit hinten, um weiterhin tauchen zu können.

In einer amerikanischen Studie konnten retrospektiv bei 60 % der tödlichen Tauchunfälle mit kardialen Hintergrund vor dem Tauchgang Warnsymptome eruiert werden. Diese bestanden in Dyspnoe, Müdigkeit, Stress, Brustschmerzen oder einem allgemeinen Krankheitsgefühl (Denoble et al., 2010).

Die vorliegende Studie war von der zuständigen Ethikkommission genehmigt. Vor den Tauchgängen wurden die Teilnehmer schriftlich über den Studieninhalt informiert. Eine schriftliche Einverständniserklärung lag in jedem Fall vor. Bei der Studienleiterin ergab sich

der Eindruck, dass die Teilnehmer der Studie sehr verantwortungsvoll tauchten. Sie wurden in der Studie keinem spezifischen Risiko ausgesetzt. Das allgemeine Risiko eines Tauchganges bestand in gleicher Weise auch außerhalb dieser Studie.

4.2.1. Lungenfunktion (statische und dynamische Spirometrie)

Nach einer vorab durchgeführten Berechnung der Sauerstoff-Toxizität (Units of Pulmonary Toxicity Dose) wurde keine Lungenschädigung erwartet (Wright & Lambertsen, 1972; Harabin et al., 1987; Hamilton, 1989). Auch die Berechnung der Vitalkapazitäts-Verschlechterung (ΔVC) nach Harabin et al (1987) ließ Unterschiede kleiner als 0,1 % erwarten (Hamilton, 1989). Die errechneten Lungenfunktionseinbußen nach dem Tauchgang, waren bei der air28-Gruppe tendenziell größer. Dies zeigte sich darin, dass in der air28-Gruppe eine größere Anzahl von Einzelparametern tendenziell reduziert war (Tabelle 9 und 10).

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Studiengruppen durch die Spirometrie wurde anhand von Sollwerttabellen durchgeführt, die im klinischen Alltag zum Einsatz kommen. Die Sollwerte berücksichtigen Geschlecht, Alter, Größe und Gewicht eines Probanden (Quanjer, 1994).

Frühere Studien lieferten für nicht Berufs-Taucher um bis zu 120 % erhöhte Werte für die forcierte Vitalkapazität (FVC). Für das forcierte expiratorische Volumen nach 1 s (FEV 1) lagen im Mittel 117 % höhere Werte gegenüber der nicht tauchenden Bevölkerung vor (Crosbie et al., 1977; Suzuki, 1997; Skogstad et al., 2000). Auch die gegenwärtigen Studiengruppen überboten vor dem Tauchgang in beinahe allen Parametern die geforderten Sollwerte, was als ein Zeichen pulmonaler Fitness zu werten ist.

Bei beiden Atemgasgruppen ließen sich nach dem Tauchgang keine signifikanten restriktiven oder obstruktiven Verschlechterungen der Lungenfunktion feststellen. Betrachtet man aber die Messwerte für die restriktiven und die obstruktiven Variablen der air28-Gruppe, so waren diese tendenziell stärker verändert. Eine schwer zu erklärende Ausnahme bildete die VC, welche in der Luft-Gruppe stärker vermindert war. Obwohl diese Abnahme statistisch signifikant war, betrug die Verminderung lediglich $1,0 \pm 4,9$ % (Mittelwert \pm Standardabweichung) und hatte damit keine physiologische Relevanz.

Die Studienergebnisse entsprechen bei den geringfügigen Unterschieden der Atemgemisch-Zusammensetzung dem heutigen Kenntnisstand, nach welchem die Lungenfunktion bei erwachsenen Tauchern, die während eines Tauchganges Druckluft verwenden, stabil ist (Tetzlaff et al., 1999b). Die Teilnahme von Kindern war bei dieser Studie ausgeschlossen, da diese kein ausgewachsenes Bronchialsystem aufweisen. Es wäre mit bronchialer Hyperreagibilität und z.T. starken Einschränkungen der dynamischen Lungen-

funktion nach dem Tauchgang zu rechnen gewesen (Wollin, 2011). Auch Kälte und Tiefe eines Tauchganges haben nachteilige Auswirkungen auf die Lungenfunktion (Tetzlaff et al., 2001). Beide Faktoren sind in dieser Studie nicht als modulierende Faktoren anzusehen, da sich die Studientaucher in einem warmen Tauchklima (Wassertemperatur: 28-29 °C) und nur in geringer Tauchtiefe (≤ 25 m) befanden.

Die in der vorliegenden Studie erfassten Ergebnisse zeigten keine nachhaltige oder physiologisch stichhaltige Veränderung der Atemfunktion bei Verwendung von SUBEX air28. Die nach der Formel von Harabin et al (1987) zu erwartende ΔVC lag bei $< 0,1$ % in beiden Gruppen und damit um das bis zu 20-fache niedriger als die realen Ergebnisse dieser Studie (Luft-Gruppe $1,0 \pm 4,1$ %; air 28-Gruppe $2,4 \pm 11,6$ %).

Kurzfristige (< 3 h) O_2 -Anreicherungen auf 100 % bei einem Tauchgang (pO_2 : 1,5 bar) lösten keine signifikanten Veränderungen der Lungenfunktion aus (van Ooij et al., 2012). Allerdings ist eine langfristige Verschlechterung der Lungenfunktion bei Tauchen mit hohem Sauerstoffanteil durch kumulative Schäden beschrieben worden (Thorsen et al., 1990; Skogstad et al., 2002). Vor diesem Hintergrund wird darauf hingewiesen, dass die gegenwärtige Studie nur Aussagen zu einer einzigen Anwendung von air28 für einen Tauchgang mit 60 min Dauer und bei einer Tauchtiefe von ≤ 25 m zulässt.

Einflussfaktor Rauchen. Wie in Abbildung 24 dargestellt, waren die 'Parameter' der rauchenden Taucher im Vergleich zu denjenigen der Nichtraucher leicht reduziert. Es gibt derzeit nur wenige Untersuchungen zu tauchenden Rauchern. Studien mit spezieller Fragestellung erbrachten in einigen Parametern vergleichbare Ergebnisse. So war die Lungenfunktion vor und nach dem Tauchgang bei rauchenden Tauchern gegenüber den Nichtrauchern signifikant vermindert (inspir. Vitalkapazität; forcierte Vitalkapazität) (Sekulic & Tocilj, 2006).

Bei Tauchern mit einer hohen Anzahl Pack-Years (PY = 1 Schachtel Zigaretten pro Tag über ein Jahr) und der zusätzlichen Belastung durch O_2 -Radikale könnte jedoch das Risiko für einen deutlicheren Rückgang der Lungenfunktion erhöht sein (Dembert et al., 1984). Abgesehen von der Lungenschädigung bedeutet Rauchen einen möglichen Risikofaktor für schwerere DCS-Symptome (Wilmshurst et al., 1994; Buch et al., 2003).

Mit der vorliegenden Studie ließ sich nicht untersuchen, ob Tauchen in Kombination mit Rauchen die Lunge stärker schädigt. Hierfür wäre ein anderes Studiendesign mit einem längeren follow-up mit gegebenenfalls gematchten Paaren nötig gewesen.

Grenzen der Untersuchung. Eine Limitation der Lungenfunktionsergebnisse könnte darin bestehen, dass durch die Testung der Maximalleistung mit einem portablen Spirometer sehr

kleine Unterschiede nicht nachweisbar waren. Bei Feldversuchen ist jedoch die Verwendung von komplexeren Systemen wie Ganzkörper-Plethysmographen oder Impuls-Oszillometer kaum möglich.

Für das verwendete Spirometer wird eine Messungenauigkeit von $\pm 2\%$ und für das Manual Calibration Syringe wird eine Volumenabweichung von $0,25\%$ angegeben (Information der Herstellerfirma CareFusion), so dass physiologisch relevante Unterschiede messbar gewesen sein sollten.

4.2.2. Blasen-Detektion (Doppler-Ultraschall)

Die Reduktion des N_2 -Anteiles im Atemgas (air28) ging mit einer signifikanten Verminderung der Blasenanzahl einher. Dabei bestand ein Gefälle in der Blasenanzahl vom Hals-Messpunkt über den Arm- zum Bein-Messpunkt.

In einer Reihe von Studien wurden verschiedenste Faktoren wie z.B. Tauchtiefe, Aufstiegs geschwindigkeit, Alter, Körpergewicht, körperliches Training, Wassertemperatur, persistierendes Foramen ovale (PFO) und das Geschlecht als modulierende Faktoren untersucht, die das Zustandekommen einer Dekompressionserkrankung (DCI) oder die Anzahl von detektierbaren Gas-Blasen beeinflussen (Zwingelberg et al., 1987; Dixon et al., 1988; Rudge, 1990; Broome et al., 1995; Bove, 1998; Schwerzmann et al., 2001; Carturan et al., 2002; St Leger Dowse et al., 2002; Lee et al., 2003; Webb et al., 2003; Dujic et al., 2004; Lier et al., 2004; Marroni et al., 2004; Blatteau et al., 2005; Dujic et al., 2005; Germonpre et al., 2005; Blatteau et al., 2007; Honek et al., 2007; Boussuges et al., 2009; Hugon et al., 2009; Castagna et al., 2011; Vann et al., 2011; Blatteau et al., 2012).

In weiteren Studien wurde untersucht, zu welchem Zeitpunkt nach Ende des Tauchganges die höchste Blasenanzahl auftritt (Dujic et al., 2004; Blatteau et al., 2007; Blogg & Gennser, 2011; Castagna et al. 2011; Blatteau et al., 2012). Dabei wurden an verschiedenen Gefäßlokalisation wie z.B. präkordial (Dujic et al., 2004; Marroni et al., 2004; Blatteau et al., 2005; Blatteau et al., 2007; Castagna et al., 2011) und an der Vena subclavia (Sawatzky & Nishi, 1991; Jankowski et al., 2004) gemessen. Des Weiteren befassten sich Studien damit, mit welchem Doppler-System ('blind' oder 'image-assisted') sich Blasen am besten detektieren lassen (Eftedal & Brubakk, 1997; Brubakk & Eftedal, 2001; Pollock, 2007). Viele Fragen blieben ungeklärt, wodurch die Vergleichbarkeit von Ergebnissen stark eingeschränkt ist.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, können Gase während eines Tauchganges mit erhöhtem Umgebungsdruck in größerem Umfang in Flüssigkeiten und in Geweben des menschlichen Körpers physikalisch gelöst werden. Am häufigsten entwickeln sich bei einer

raschen Druckminderung Stickstoff-Blasen (Doolette & Mitchell, 2001). Die entstandenen venösen Stickstoff-Gas-Emboli lassen sich mittels gepulstem Doppler-Detektor nachweisen (Blatteau et al., 2005). Man vermutet, dass größere Stickstoff-Blasen aus Blasen-Vorläufern (Gas-Kerne) entstehen (Wisløff et al., 2004).

Verschiedene Gewebe weisen unterschiedliche Entsättigungszeiten auf. Dies wurde zuerst von Haldane et al. (1908) postuliert und von Bühlmann (1984) detailliert untersucht. Die Stickstoff-Verteilung und dessen Anreicherung in den verschiedenen Geweben ist vom Fettgehalt und der Durchblutung abhängig. In Geweben mit hoher Durchblutung wie dem Muskel kann sich Stickstoff relativ schnell anreichern, wird jedoch umgekehrt auch leicht von diesen Geweben wieder abgegeben. Im Gegensatz dazu lagert sich Stickstoff langsamer im Fettgewebe ein und löst sich dort in deutlich höherer Konzentration. Durch die geringere Durchblutung von Fettgewebe wird der Stickstoff dort schlechter wieder abgegeben und demnach auch verzögert über die Lunge eliminiert.

In dieser Studie ergaben sich für beide Atemgase im Hinblick auf die Anzahl der Taucher mit Inertgas-Blasen keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gasgemischen. Bei 93 % der Taucher der Luft-Gruppe und bei 89 % der Taucher der air28-Gruppe bestand also das Risiko, 'bubbles' im venösen Gefäßsystem zu verschleppen. Zwar verursacht eine Vielzahl von Blasen nicht notwendigerweise eine klinische Symptomatik (Schwerzmann & Seiler, 2001), allerdings nimmt die DCS-Wahrscheinlichkeit bei einer geringeren Blasenlast ab. Die Wahrscheinlichkeit hängt auch von der Persistenz eines Foramen ovale (PFO) ab, wodurch in seltenen Fällen paradoxe Embolien eine DCS oder Infarkte in den verschiedenen Organen und dem Gehirn hervorgerufen können (Bove, 1998; Schwerzmann et al., 2001; Lier et al., 2004; Germonpre et al., 2005; Honek et al., 2007). Ein PFO kommt bei ca. 30 % der Erwachsenen auch ohne kardiale Symptome vor (Bove, 1998; Lier et al., 2004). In einer Publikation wird vor einer Vergrößerung des PFO und einem erhöhtem DCS-Risiko bei fortgeführtem Tauchen gewarnt (Germonpre et al., 2005).

Innerhalb der ersten 60 min nach Tauchgangsende erreicht die Anzahl der Blasen ein Maximum und nimmt danach ab (Dujic et al., 2004; Blatteau et al., 2007; Castagna et al., 2011; Blatteau et al., 2012). In dieser Studie lag das Blasenmaximum bereits im ersten Intervall (30 – 45 min). Im zweiten Intervall (45 – 60 min) sank die Blasenanzahl bereits, und damit nahm das DCS-Risiko relativ früh nach Ende des Tauchganges ab. Als Ursache hierfür werden die moderate Tauchtiefe von maximal 25 m und die zeitliche Begrenzung des Tauchgangs auf 60 min angesehen.

Zwar war die Anzahl von Tauchern mit dem Nachweis von Gasblasen für beide Atemgas-Gruppen nicht signifikant unterschiedlich, jedoch war die Blasenanzahl in der

vorliegenden Studie signifikant vom Atemgas abhängig, welches sich im O₂-Anteil nicht drastisch unterschied (21 % vs 28 %). Die Unterschiede bestanden an den Messlokalisationen V. subclavia (1. Intervall) und an der V. femoralis (2. Intervall) und für die Summen-Betrachtung (V. jugularis interna plus V. subclavia plus V. femoralis; 1. Intervall). An diesen Lokalisationen war die Blasenanzahl bei der Luft-Gruppe der Hypothese entsprechend höher als bei der air28-Gruppe, was auf den höheren Stickstoffanteil der Luft im Vergleich zu air28 zurückgeführt wird.

Die Ergebnisse der drei verschiedenen Kompartimente (Kopf, Arm, Bein) geben Anlass, die Messlokalisationen zur Doppler-Blasendetektion bei Tauchern zu diskutieren, denn die drei verwendeten Messlokalisationen unterschieden sich in der Signalqualität deutlich voneinander. Der Kopf-Messpunkt (V. jugularis interna) war von vielen Störgeräuschen - auch Blasenduschen - überlagert. Am Arm-Messpunkt (V. subclavia) war das akustische Signal vom Durchzug kleiner Blasenduschen und somit auch das detektierte Signal weniger stark gestört. Am Bein-Messpunkt (V. femoralis) kam es kaum zu Störgeräuschen. Jedoch könnte hier die Blasenanzahl von der körperlichen Aktivität der Taucher abhängig gewesen sein, da die Auf- und Entsättigung eines Gewebes von der Durchblutung abhängig ist (Jankowski et al., 2004; Dujic et al., 2005).

Der ausgeprägte Unterschied in der Blasenanzahl zwischen den drei untersuchten Kompartimenten kommt durch die Gewebezusammensetzung zustande. In fettreichem, unbewegtem und geringer durchbluteten Gewebe (Einstromgebiet V. jugularis) reichert sich der Stickstoff demnach am meisten an, gefolgt von einem muskelreichen jedoch beim Urlaubstauchen weniger bewegten Kompartiment (Einstromgebiet V. subclavia) und dem muskelreichen am stärksten durchbluteten Gewebe (Einstromgebiet V. femoralis). Signifikante Differenzen bestanden daher zwischen dem Messpunkt der V. jugularis und der V. femoralis, und ebenso zwischen der V. subclavia und der V. femoralis. Insgesamt waren die Unterschiede des Kompartimente-Vergleiches in der air28-Gruppe deutlicher ausgeprägt als in der Luft-Gruppe, wofür die geringere Anreicherung von Stickstoff in der air28-Gruppe ursächlich erscheint. Die deutlich voneinander verschiedene Blasenlast an den drei Lokalisationen und die damit verbundenen verschiedenen Schlussfolgerungen lassen eine Standardisierung der Blasenmessung wünschenswert erscheinen. Dieser Wunsch bezieht sich nicht nur auf die Lokalisation sondern auch auf das Zeitfenster, in welchem die Messungen stattfinden.

Die Unterscheidung der Blasenanzahl in 'reine' Blasen oder die Mischung aus Blasen und Blasenduschen zeigte sich als nicht effektiv. Die Zahlenwerte waren zwar unterschiedlich, erlauben aber keine weitergehende Interpretation. Daher werden die

Blasenduschen in dieser Studie als Störgrößen betrachtet, welche die laminare Strömung des Blutes verändern.

Die zusätzliche Berechnung der üblichen Blasen-Scores (Spencer-Score, Spencer-Verteilung, erweitertes Spencer-Score) bestätigen die Ergebnisse der Quantifizierung der Blasenanzahl pro Minute. Daher ist die Frage berechtigt, ob der Mehraufwand bei zukünftigen Studien notwendig ist. Eine Präsentation von Ergebnissen mit Hilfe der Scores könnte dann sinnvoll werden, wenn es um die Vergleichbarkeit von Ergebnissen geht. Für diesen Zweck wäre es ebenfalls wünschenswert, wenn es zu einer Einigung auf ein einziges Score käme.

Diverse Faktoren haben einen Einfluss auf die Anzahl der Blasen. Nach neueren Untersuchungen lässt sich die Anzahl der Blasen offensichtlich durch eine 'Präkonditionierung' vermindern (Broome et al., 1995; Dujic et al., 2004; Jankowski et al., 2004; Wisløff et al., 2004; Dujic et al., 2005; Blatteau et al., 2007; Gempp & Blatteau, 2010; Castagna et al., 2011). Die Präkonditionierung ist dabei ein Mechanismus, bei dem ein Reiz (hier: körperliche Anstrengung) körpereigene Prozesse anstößt, die vor den Auswirkungen eines späteren Schadens schützt. So führt körperliche Betätigung 45 min vor einem Tauchgang (Castagna et al., 2011) oder 2 h (Blatteau et al., 2007) oder 20 h vor Tauchbeginn (Dujic et al., 2004), ebenso wie Übungen während eines Dekompressions-Stops (Dujic et al., 2005) zu einer Reduktion der Blasenanzahl im Vergleich zu Tauchgängen ohne zeitnahe körperliche Betätigung. Es wird vermutet, dass körperliche Anstrengung durch eine Verbesserung der Durchblutung von muskulärem und nicht-muskulärem Gewebe protektiv ist.

Auf einen weiteren umstrittenen Einflussfaktor auf die Blasenbildung wird im Folgenden eingegangen.

Einflussfaktor Geschlecht. Die Befunde zum Geschlechts-spezifischen Auftreten der DCS sind kontrovers. Während einerseits nach Aussage einer retrospektiven Studie das DCS-Auftreten bei Männern um das 2,6-fache gegenüber Frauen erhöht sein soll (St Leger Dowse et al., 2002), wird bei Frauen von einem erhöhten relativen Risiko gesprochen DCS zu erleiden (Dixon et al., 1988). Dies soll um das 4,3-fache höher liegen (Weien & Baumgartner, 1990). Andere Arbeitsgruppen bestätigen derartige Unterschiede nicht (Zwingelberg et al., 1987; Webb et al., 2003). Der Menstruations-Zyklus (Rudge, 1990; Lee et al., 2003) und orale Kontrazeptiva werden als modulierende Risikofaktoren diskutiert (Webb et al., 2003), obgleich keine belastbaren Konzepte zur Kausalität bestehen. In der vorliegenden Studie wurden diese beiden Aspekte jedoch nicht berücksichtigt.

Aufgrund eines oftmals höheren Körperfettanteiles bei Frauen und eines geringeren Anteils an Muskelmasse, hätten bei Frauen vermehrt Blasen auftreten können (Webb et al., 2003). In dieser Studie ließ sich dieser Befund nicht bestätigen, nach welcher bei Frauen häufiger Blasen nachgewiesen werden. Auch eine andere Studie verneinte solch einen Unterschied (Boussuges et al., 2009). Der BMI war in dieser Studie bei den Männern um etwa 3 Einheiten höher als bei den Frauen, was zunächst für einen höheren Anteil von Fettgewebe spricht. Weil aber keine Daten zur Verteilung von bradytrophem zu tachytrophem Gewebe vorliegen, lässt sich der Befund nicht abschließend klären.

In dieser Studie wurden bei Frauen insgesamt weniger als halb so viele Blasen wie bei den Männern gezählt. Zusätzlich ließen sich bei 15,8 % der Frauen aber nur bei 5,7 % der Männer überhaupt keine Blasen nachweisen. Andererseits kam es bei Männern zwischen dem 1. und 2. Intervall zu einer Atemgas-unabhängigen, rascheren Abnahme der Blasenanzahl. Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass bei Frauen die Blasenlast zwar niedriger ist aber länger persistiert, was sich damit erklären ließe, dass N_2 von einem langsam entsättigenden Gewebe (Fettgewebe) verzögert freigesetzt wird.

Ein weiterer Unterschied ergab sich im Kompartiment-Vergleich. Der Gewebe-Unterschied war bei Männern größer und zudem ergab sich ein signifikanter Blasenabfall von muskulär-unbewegtem (V. subclavia) zum muskulär-bewegtem Gewebe (V. femoralis). Die direkte Anreicherung des Körpers mit N_2 und somit der Einfluss des Atemgemisches nach dem Tauchgang scheint demnach bei Männern stärker ausgeprägt zu sein, ebenso wie das DCS-Risiko direkt nach dem Tauchgang. Sollten diese Geschlechter-Unterschiede bestätigt werden, sollten sie in Tauchtabellen und Tauchcomputer-Algorithmen berücksichtigt werden.

Bei retrospektiven Betrachtungen des Auftretens von DCS-Symptomen bei Männern und Frauen könnte ein hoher Behandlungs-Bias vorliegen, da Frauen laut deutscher Krankenkassen (Barmer GEK, Techniker Kasse TK; 2012) grundsätzlich häufiger ärztliche Beratung suchen. Männliche Taucher könnten also eine Tendenz zum Dissimulieren haben.

Grenzen der Untersuchung. Die Dopplersignale wurden lediglich akustisch ausgewertet. Für eine exakte Auszählung der Blasenanzahl wäre vermutlich ein kardiales, Ultraschall-gesteuertes Doppler-Bild geeigneter gewesen. Die Ergebnisse von 'blinden' und 'image-assisted' Doppler-Verfahren sind bei ruhenden Probanden jedoch gut vergleichbar (Brubakk & Eftedal, 2001). Lediglich untrainierte Untersucher benötigen ein Ultraschall-gesteuertes Doppler-Bild, um gleichwertige Ergebnisse zu erzielen (Eftedal & Brubakk, 1997).

Die Zukunft der hochwertigen Mikroblasen-Auswertung liegt derzeit beim 3-D-gesteuerten, kardialen Ultraschall, wobei die akustische Doppler-Messung als Grundwerkzeug weiterhin bestehen bleiben wird (Pollock, 2007).

4.2.3. Kognitive Leistung (Gedächtnis- und Aufmerksamkeitstest)

Die kognitive Leistungsfähigkeit war durch eine Erhöhung des O₂-Anteiles im Atemgemisch während des Tauchens verbessert. Bei den Frauen war dieser Unterschied (Luft vs. air28) stärker ausgeprägt, und insgesamt zeigten die Frauen eine bessere Gedächtnisleistung gegenüber den Männern.

Die narkotischen Effekte des Stickstoffs reduzieren in Abhängigkeit von der Konzentration im Atemgemisch die maximal erlaubte Dauer und Tiefe von Nullzeit-Tauchgängen, da sich N₂ in den verschiedenen Körpergeweben während des Tauchganges anreichert. Der steigende pN₂ beeinflusst die kognitive Leistungsfähigkeit (Behnke, 1951; Baddeley et al., 1968; Williamson et al., 1989; Todnem et al., 1990; Lettnin, 1994; Dalecki et al., 2012). Exekutive Funktionen und die intellektuelle Leistung, Zahlen Kopieren, manuelle Geschicklichkeit und Koordination, Aufmerksamkeit und Konzentration, Satz-Verständnis und Kurzzeit-Gedächtnis sowie die Reaktionszeit auf optische und akustische Signale sind unter Wasser beeinträchtigt (Behnke, 1951; Baddeley et al., 1968; Williamson et al., 1989; Lettnin, 1994; Dalecki et al., 2012). Zum Teil löst N₂ in Abhängigkeit von der Tiefe euphorische Zustände, übersteigertes Selbstvertrauen, Halluzinationen oder Störungen der Urteilsfähigkeit aus (Baddeley et al., 1968; Todnem et al., 1990; Lettnin, 1994).

Die neuronalen Funktionen können auch durch Einflüsse anderer Atemgase verändert werden. Hierbei ergeben sich einige Gemeinsamkeiten jedoch auch typische Unterschiede. Zu den Symptomen, welche bei steigendem Partialdruck durch die ZNS-Toxizität des Sauerstoffs entstehen, gehören Krampfanfälle, Aphasie, Parästhesie, Verwirrtheit, Muskel-Zuckungen oder Versteifungen, Desorientiertheit (Donald, 1947; Butler & Thalmann, 1984; Leitch, 1984; Butler, 1986; Butler & Thalmann, 1986).

Im Gegensatz zum Sauerstoff hat der Stickstoff euphorisierende, die intellektuelle Leistungsfähigkeit beeinträchtigende und narkotisierenden Eigenschaften. Diese ähneln bei niedrigem Partialdruck der Wirkung alkoholischer Genussmittel (z.B. Wein, Bier, Likör) und bei höherem pN₂ denen stark wirksamer psychotroper Substanzen (z.B. Marihuana, Heroin, diverse Arzneimittel). Dabei wäre der vollständige Verlust von Wahrnehmung und geistiger Fähigkeiten, Wahnerlebnisse, Betäubung und Bewusstlosigkeit zu nennen (Lettnin, 1994).

Kohlendioxid führt bei langsam zunehmendem Partialdruck zu Unbehagen und vertieften Atmungsexkursionen. Bei erhöhtem pCO₂ entwickeln sich Kopfschmerzen,

Pulsbeschleunigung, Schweißausbrüche, Herzklopfen, Atemnot, Angst, Schwindel und Ohrensausen (Lettnin, 1994). Ein erhöhter $p\text{CO}_2$ tritt häufig in Verbindung mit einem reduzierten $p\text{O}_2$ auf z.B. bei Lungenfunktionsstörungen. Tritt nicht der Tod durch O_2 -Mangel ein, ähneln diese Symptome denen einer massiven Panikattacke.

Helium (He) wurde in dieser Studie nicht im Atemgemisch verwendet, wird jedoch zur Vervollständigung kurz erläutert. Bei Verwendung von He kommt es, durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Gases, zu starkem Wärmeverlust und Abfall der Körperkerntemperatur über die Atmung. Bei einer Tauchausrüstung mit Sprachfunktion wird die Sprache wegen der hohen Schallgeschwindigkeit akustischer Wellen in Helium verzerrt (Donald-Duck-Effekt). Bei Helium-Tauchgängen kann sich in Tiefen ab 200 m ein High pressure nervous syndrome (HPNS) entwickeln. Es wird vermutet, dass das HPNS durch Kompression von Nervenzellen entsteht, wodurch typischen Symptom wie Zittern der Hände und des Körpers, Sehstörungen, Mikroschlaf, Schwindel, Übelkeit eintreten (Lettnin, 1994).

Um einen körperlichen Schaden durch das Tauchen abbilden und quantifizieren zu können, wurden Magnetresonanz-Tomographie (MRT)-Untersuchungen am Hirn durchgeführt. Hiermit wurden hyperintense Läsionen im weißen Hirngewebe von Tauchern gefunden, die keine DCS erlitten hatten (Reul et al., 1995; Yanagawa et al., 1998; Tetzlaff et al., 1999a). Tetzlaff et al. wies bei 60 % der Taucher und bei 45 % der Kontrollgruppe solche MR-Signalabnormalitäten nach. Gempp und Kollegen (2010) wiesen bei 43,7 % der Tauchern und bei 21,8 % einer Kontrollgruppe hyperintense Läsionen nach. Dabei bestand eine Assoziation zwischen einem PFO und dessen Größe und dem Auftreten von Läsionen (Knauth et al., 1997; Schwerzmann et al., 2001; Gempp et al., 2010). Jedoch scheint zwischen einer kumulierenden Reduktion der kognitiven Leistungsfähigkeit und den hyperintensiven Läsionen keine Korrelation zu bestehen (Klingmann & Tetzlaff, 2012). Solange es nicht zu einer DCS kommt, scheint also die N_2 -bedingte, kognitive Beeinträchtigung während des Tauchganges reversibel zu sein.

Die kognitive Leistungsfähigkeit, z.B. Aufmerksamkeit, Gedächtnis, exekutive Funktionen, Wahrnehmung, intellektuelle Leistungsfähigkeit, bestimmt das Verhalten in einer unbekanntem Situation, die Art der Gestikulation, die Geschwindigkeit der Reaktion und das Erkennen einer Gefahr. Daher könnte es bei einer Störung dieser Fähigkeiten dazu kommen, dass gerichtete Strategien in Gefahrensituationen modifiziert oder sogar ausgeschaltet werden (Williamson et al., 1989). Angst – besonders mit anschließender Panik – ist für die Reduktion der Kognition ein ausgesprochen wichtiger Risikofaktor (Mears & Cleary, 1980). Der Beginn des N_2 -Einflusses, die Einschränkung eigener kognitiver Leistungsfähigkeit und

möglicherweise drohende Gefahrensituationen werden vom Taucher selbst nicht unbedingt bemerkt.

In der vorliegenden Studie war die kognitive Leistungsfähigkeit (Gedächtnis und Aufmerksamkeit) in beiden Gruppen während des Tauchganges leicht vermindert. Diese Interpretation beruht darauf, dass im VLMT im Schnitt etwa 9 Begriffe erinnert werden. In dieser Studie waren es im Kurzzeit-Gedächtnis 7,4 Begriffe in der Luft-Gruppe und 7,9 Begriffe in der air28-Gruppe, im Langzeit-Gedächtnis waren es 6,4 Begriffe in der Luft-Gruppe und 6,8 Begriffe in der air28-Gruppe (vgl. Abb. 31 a) /Tab. 19). Allerdings fehlt in der vorliegenden Studie eine Probandengruppe, die mit demselben Test über Wasser getestet wurde, so dass der Unterschied vorsichtig interpretiert werden sollte.

Der N₂-Einfluss auf die Kognition war, der zuvor aufgestellten Hypothese entsprechend, auf die air28-Taucher weniger ausgeprägt. Die Taucher der air28-Gruppe erinnerten sich im Kurz- und im Langzeit-Gedächtnis geringfügig - jedoch nicht signifikant - an mehr Wörter. Dieses Ergebnis zeigt eine Übereinstimmung mit einer Überwasser-Studie, bei welcher die Hyperoxie-Gruppe im Vergleich zur Placebo-Gruppe in einem Gedächtnis- und Reaktions-Tests bessere Ergebnisse erzielte. Bei 2-minütiger Sauerstoff-Applikation 5 min vor, während und direkt nach der Wort-Präsentation wurden bessere Ergebnisse erreicht (Scholey et al., 1998; Scholey et al., 1999).

Die air28-Taucher hatten eine signifikant niedrigere Fehlerquote und weniger Perseverationen im Langzeit-Gedächtnis, und die Zahl der Teilnehmer, die Fehler machten, war niedriger. Beim Zahlenverbindungs-Test waren beide Gruppen zwar annähernd zeitgleich, die Teilnehmer der air28-Gruppe machten jedoch tendenziell weniger Fehler, was einer besser erhaltenen Aufmerksamkeit gegenüber den Teilnehmer der Luft-Gruppe entspricht.

Es darf daher angenommen werden, dass die kognitive Leistungsfähigkeit während des Tauchens mit erhöhtem O₂-Anteil verbessert ist. Hieraus könnte man ableiten, dass Taucher in Gefahrensituationen konzentrierter und adäquater reagieren könnten.

Einflussfaktor Geschlecht. Während der Durchführung des Tests ergab sich ein weiterer Einflussfaktor. Sowohl im Kurzzeit- als auch im Langzeitgedächtnis lieferten die Frauen signifikant bessere Ergebnisse als die Männer, und die air28-Taucherinnen lieferten bessere Ergebnisse als die Luft-Taucherinnen.

Eine Erklärung für dieses Ergebnis fällt nicht leicht. Bei einem Vergleich der demographischen Daten fällt auf, dass die Frauen im Durchschnitt 3 Tauchjahre und 170 Tauchgänge weniger Erfahrung hatten. Dieser Umstand müsste eigentlich dazu führen, dass

die Taucherinnen sich stärker auf das Tauchgeschehen als auf die Tests hätten konzentrieren müssen. Da aber Tauchanfänger von der Studie ausgeschlossen waren, wird der letzte Punkt vermutlich eine untergeordnete Rolle gespielt haben.

Ein weiterer, auffälliger Unterschied betrifft das Alter, welches bei den Frauen durchschnittlich ca. 6 Jahre niedriger war (37,6 vs 43,9 Jahre; $p=0,005$). Innerhalb dieser Altersklasse stellten Pauls und Kollegen die größten Geschlechtsunterschiede bei Tests mit Bezug auf nicht-räumliche-visuelle Fähigkeiten fest mit einem Vorteil für die Frauen (Pauls et al., 2013). Bei Tests mit Bezug auf verbale Fähigkeiten bestehen Hinweise auf einen Geschlechtsunterschied bei Erinnerungs- und Lernleistungen zwischen Frauen und Männern. So wurde in verschiedenen Studien nachgewiesen, dass Frauen über die gesamte Lebensspanne hinweg eine bessere Lern- und Erinnerungsleistung aufweisen als Männer (Hultsch et al., 1990; Larrabee & Crook, 1993). Abschließend ist erwähnenswert, dass sich die Umstände im Zusammenhang mit den kognitiven Geschlechtsunterschieden in Europa jedoch aufgrund der Lebensbedingungen und der Ausbildungsmöglichkeiten ändern, und die geschlechtsspezifische Erziehung mehr und mehr an Bedeutung verlieren wird (Weber et al., 2014).

Grenzen der Untersuchung. Der Gedächtnis-Test wurde ausschließlich während des Tauchens durchgeführt. Es hätte also sein können, dass diese Frauen bereits an Land und vor dem Tauchgang eine höhere Gedächtnisleistung als Männer aufwiesen. Auf eine dem Tauchgang voraus gehende Testung wurde verzichtet, um einen Lerneffekt zu vermeiden.

Nach dem Tauchgang wurde auf die Test-Wiederholung wegen eines sehr strengen Zeit-Managements verzichtet, denn letztlich waren die teilnehmenden Urlaubstaucher mit dem übrigen Protokoll bereits 4 h lang mit der Studie beschäftigt. Der Test wurde auch am Folgetag nicht wiederholt, weil dadurch diese kognitive Leistung über Nacht hätte trainiert werden können.

4.2.4. Vegetative Modulation der Herzfrequenz

Während des Tauchganges zeigte sich in der air28-Gruppe gegenüber der Luft-Gruppe eine etwas ausgeprägtere Tauch-Bradykardie. Die Herzfrequenz (HF) sank in beiden Gruppen in den ersten 36 min während des Tauchganges um ungefähr 1/5 zur Ausgangsfrequenz.

Die HF wird häufig als Maß für die körperliche Belastung herangezogen. So wird z.B. zur Bestimmung der oberen körperlichen Belastungsgrenze im Trainingsbereich die Formel $220 / \text{min} - \text{Lebensalter}$ verwendet (Astrand & Rodahl, 1986; Siebert et al., 2004). Jedoch bestehen große interindividuelle Unterschiede in der Ruhfrequenz, welche

über den Sympathikus und den Parasympathikus gesteuert wird. Der Anstieg der HF unter definierten Belastungsstufen ist aber recht gut vergleichbar (Leistungs-Puls-Index).

Übliches Freizeit-Tauchen mit Gerät entspricht leichter körperlicher Belastung vergleichbar mit Gymnastik oder Spaziergehen. Dadurch wird der Grundumsatz (ca. 6400 ♀, 7100 ♂ kJ /Tag) um ca. 300 - 400 kJ /h erhöht (Hick & Hick, 2006). Bei den vorliegenden Umgebungsbedingungen – gleichbleibender leichter körperlicher Belastung, angenehmer Wassertemperatur, guter Sicht und wenig Strömung – sollte die HF demnach über den Verlauf des Tauchganges konstant bleiben, wenn dieser für den Taucher keinen psychischen oder physischen Stress darstellt.

Jedoch kommt es während eines Tauchganges oftmals zur Bradykardie, bei der sich zweierlei Formen unterscheiden lassen. Eine als 'Tauchreflex' bezeichnete Bradykardie und die während eines Tauchgangs auftretende 'Tauch-Bradykardie'.

Bei dieser Studie konnte der Tauchreflex, wie er zu Beginn einer Apnoe- und Immersionsphase eintritt, nicht erfasst werden (Landsberg, 1975; Schipke & Pelzer, 2001; Alboni et al., 2011), weil dieser im Hinblick auf die HF ein relativ rascher Reflex ist, der im Bereich von wenigen Sekunden direkt bei der Immersion des Gesichtes effektiv wird (Caspers et al., 2011). Beim Tauchreflex, der auch als 'Sauerstoff-Sparmechanismus' angesehen wird (Landsberg, 1975; Alboni et al., 2011), kommt es zur reflektorischen Bradykardie. Ursächlich dafür werden das Fehlen von Atemexkursionen nach tiefer Inspiration und die Kältereiz-Stimulation der Gesichtsnerven des Nervus trigeminus durch den Wasserkontakt angesehen. Die Tauchreflex-Antwort ist demnach bei Schwimmern, die den Kopf über Wasser behalten oder bei Tauchern mit Vollgesichtsmaske reduziert (Tetzlaff et al., 2012).

Die Tauch-Bradykardie des menschlichen Körpers wird multifaktoriell über den Parasympathikus organisiert und moduliert (Lafay et al., 1997; Miwa et al., 1997; Neubauer et al., 2001; Molénat et al., 2004; Chouchou et al., 2009). Verschiedene Faktoren steigern das Schlagvolumen des Herzens und reduzieren die HF. Kalte Wassertemperatur und Volumenumverteilung im Sinne einer Zentralisation des Blutvolumens führen zu einem Anstieg des zentral-venösen Drucks, des arteriellen Drucks und einer Erhöhung des peripheren Widerstandes (Arborelius et al., 1972; Gauer, 1975; Risch et al., 1978a; Christie et al., 1990; Bonde-Petersen et al., 1992; Gabrielsen et al., 1993; Hayashi et al., 1997; Kinoshita et al., 2006). Hämofiltrative (Bearden et al., 1999) und vaskuläre Einflüsse (Gole et al., 2011), eine Steigerung des O₂-Gehalts im Atemgas (Hyperoxie) und eine Erhöhung des Umgebungsdruckes verstärken die Tauch-Bradykardie (Lund et al., 2000; Neubauer et al., 2001; Molénat et al., 2004; Shibata et al., 2005; Barbosa et al., 2010). Eine Beteiligung der

arteriellen Chemorezeptoren erscheint möglich, ist aber in Zusammenhang mit der HF-Modulation bei hyperbarer Hyperoxie nicht gesichert.

Die HF wurde in dieser Studie jeweils innerhalb von 6-min-Intervallen gemittelt, wodurch 10 Intervalle (Perzentile) gebildet wurden. In der air28-Gruppe zeigte sich eine etwas ausgeprägtere Tauch-Bradykardie im Verlauf des Tauchganges. Dies ist, der Hypothese folgend, möglicherweise zurückzuführen auf eine stärkere Aktivierung des parasympathischen Systems durch den erhöhten pO_2 (Lund et al., 2000; Shibata et al., 2005). Der marginale Unterschied der Tauch-Bradykardie gegenüber Luft-Gruppe wird auf den nur geringfügig erhöhten Sauerstoffanteil auf 28 % in der air28-Gruppe zurückgeführt. Die Abnahme der HF im Verlauf des Tauchens spricht demnach gegen eine erhöhte physische und psychische Belastung.

Letztendlich führte die Tauch-Bradykardie in dieser Studie zu einer HF-Reduktion von insgesamt 20 ± 10 /min und damit um etwa -20 % gegenüber dem Ausgangswert. Die HF sank während des Tauchganges in den ersten sechs von zehn 6-min-Intervallen (= 36 min) bei moderater körperlicher Aktivität jeweils gegenüber dem vorherigen Wert trotz variierender Tiefen signifikant ab und blieb auch während des Aufstieges konstant auf dem erniedrigten Niveau. Eine Abhängigkeit von der Tauchtiefe oder der Aufgabenstellung bestand somit in dieser Studie nicht.

Diese Abnahme kann vermutlich nicht allein auf die Tauch-Bradykardie sondern auch auf eine Abnahme der vor einem Tauchgang bestehenden Sympathikus-Aktivierung zurückgeführt werden. Da Hitze und hohe Luftfeuchtigkeit die HF vor dem Tauchgang auch ohne körperliche Aktivität generell moderat erhöht haben könnten.

Einflussfaktoren: Taucherfahrung, Geschlecht, Alter. In dieser Studie wurden mehrere Einflussfaktoren ausgeschlossen, die die HF-Reduktion während eines Tauchganges hätten beeinflussen können.

Die Taucherfahrung wurde über die Anzahl der Tauchgänge definiert: Taucher mit < 100 Tauchgängen galten als unerfahren und Taucher mit ≥ 100 Tauchgängen als erfahren. Der Umfang der HF-Reduktion war von der Taucherfahrung unabhängig. Dieser Befund unterstreicht erneut, dass es sich um Tauchgänge mit einem einfachen Profil und bei guten Bedingungen handelte. Auch das Geschlecht und das Alter hatten keinen Einfluss auf den Umfang der HF-Reduktion.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Hintergrund: Luft ist das günstigste, älteste, am besten erforschte und am meisten verwendete Standardgasgemisch beim Tauchen. Neben der traditionellen Nutzung von Luft als Atemgas werden in der letzten Zeit zunehmend Sauerstoff (O₂)- Stickstoff (N₂)-Gemische mit erhöhtem O₂-Anteil verwendet (=Nitrox-Gemische). Die Vorteile und Nachteile des Tauchens mit Nitrox-Gemischen sind aber unzureichend validiert.

Fragestellung: Der Einfluss von O₂-angereicherterem Atemgas (SUBEX air28) sollte bei Urlaubstauchern im Vergleich zu Luft untersucht werden. Der erhöhte oxidative Stress und die verminderte narkotische N₂-Wirkung wurde im Hinblick auf (1) die Lungenfunktion, (2) die N₂-Blasenbildung, (3) die kognitive Leistungsfähigkeit und (4) die Modulation der Herzfrequenz während des Tauchganges untersucht.

Material und Methode: In einer prospektiven, randomisierten, doppel-blinden Feldstudie wurden am Roten Meer (SUBEX-Tauchbasis, El Qusier, Ägypten) mit 108 fortgeschrittenen Urlaubstauchern (davon 38 Frauen) standardisierte Tauchgänge durchgeführt. Dabei wurden randomisiert zwei Gruppen gebildet (Luft und air28). Die Teilnehmer führten einen nicht dekompensationspflichtigen Freiwasser-Tauchgang mit einer Dauer von 62 ± 5 min (Tiefe: 24 ± 1 m) bei wenig Stress, guter Sicht, ohne Strömung und in angenehmer Wassertemperatur (~28-29 °C) durch. Der von verschiedenen Tauchorganisationen vorgegebene toxische pO₂ von 1,4 bar wurde damit nicht überschritten.

Mögliche negative Effekte von air28 auf die Lungenfunktion (statisch und dynamisch) wurden mittels Spirometrie vor und nach dem Tauchgang beurteilt. Das Auftreten von Inertgas-Blasen im venösen Blut-Kreislauf wurde in zwei Messintervallen (30-45 min; 45-60 min) nach dem Tauchgang durch Doppler-Ultraschall an drei Lokalisationen (Vena jugularis /subclavia /femoralis) quantifiziert. Die möglichen positiven Effekte von air28 auf die kognitive Leistungsfähigkeit wurden mittels Gedächtnis-Test ('visueller Lern- und Merkfähigkeitstest': short und long delay) und Aufmerksamkeits-Test (Zahlenverbindungs-Test) während des Tauchganges untersucht. Ebenso wurde die vegetative Modulation der HF durch den erhöhten O₂-Gehalt kontinuierlich über einen Pulsgurt während des Tauchganges gemessen.

Ergebnisse: Unter den oben berichteten Bedingungen ergaben sich bei den Tauchern der Luft-Gruppe und den Tauchern der air28-Gruppe keine messbar negativen Effekte auf die statische oder dynamische Lungenfunktion. Als Referenzparameter wurden die Vitalkapazität (VC) und der peak expiratory flow (PEF) verwendet.

Eine Reduzierung des N₂-Anteiles im Atemgas (von 79 auf 72 %) hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Anzahl der Taucher, bei denen Inertgas-Blasen nachweisbar waren (Luft: 92,6 %; air28: 88,9 %; p=0,371), aber die Gesamt-Anzahl der Gasblasen unterschied sich signifikant in 1. Intervall (Luft: 1845; air28: 948; p=0,047). 30 min nach Tauchende waren Inertgas-Blasen in allen drei venösen Gefäßen nachweisbar. Das Maximum lag im zweiten Intervall (45 und 60 min). Die Nachweisbarkeit der Blasen hing stark von der Messlokalisierung ab. Die meisten Blasen wurden in der V. jugularis (venöser Rückstrom aus fettreichem Gewebe) und die wenigsten in der V. femoralis (venöser Rückstrom aus gut durchblutetem, muskelreichem Gewebe) gezählt. Die Blasenanzahl war abhängig vom Geschlecht: Frauen hatten im 1. Intervall im Mittel ~53 % weniger Blasen im Vergleich zu den Männern (2. Intervall ~35 % weniger), und bei 15,8 % der Frauen waren keine Blasen nachweisbar (Männer 5,7 %; p=0,058).

In Bezug auf die Kognition zeigte air28 z.T. signifikante Vorteile gegenüber Luft. Es führte in beiden Tests zu einer Fehler-Reduktion (VLMT: long delay; p=0,037; ZVT: p=0,068) und erhöhte das Gedächtnis und die Aufmerksamkeit leicht. Unabhängig vom Atemgas erinnerten die Frauen mit deutlicher Signifikanz mehr Wörter im Gedächtnis-Test im Vergleich zu den Männern (p<0,001).

Zu Beginn des Tauchganges war die Herzfrequenz (HF) im Vergleich zu einer typischen Ruhe-HF um 20-30 Schläge /min erhöht. Während des Tauchganges nahm die HF in beiden Atemgasgruppen signifikant um ~20 % ab (p<0,001), so dass am Ende des Tauchganges die für Körperruhe erwartete HF erreicht wurde. Die Abnahme der HF war unabhängig vom Atemgemisch, Geschlecht, Alter und der Taucherfahrung.

Schlussfolgerungen: Eine moderate Erhöhung des O₂-Gehaltes führte zu keiner akuten Schädigung der Lungenfunktion. Zudem hatte die O₂-Anreicherung keinen Effekt auf die HF, eine Verstärkung der Tauch-Bradykardie trat nicht ein. Air28 verbesserte die kognitive Leistungsfähigkeit während des Tauchganges signifikant, im Speziellen durch Reduktion der kognitiven Fehlleistung. Zudem ist die Blasen-Last kurz nach dem Auftauchen signifikant reduziert.

Unter Berücksichtigung der genannten Bedingungen (Tauchtiefen bis 25 m und Tauchdauer von ~60 min) liefert SUBEX-air28 somit keine Anhaltspunkte für eine Gefährdung und bietet moderate Vorteile gegenüber Tauchen mit Luft.

5.1. Summary

Background: For diving with a breathing apparatus, air is the most frequently used breathing gas because it is inexpensive, and its potential risks are well established. More recently, air was enriched by oxygen: nitrox. Advantages and disadvantages of nitrox are less well established.

Aim: The effects of one particular nitrox breathing mixture containing 72 % nitrogen and 28 % oxygen (= SUBEX air28) were to be examined in recreational divers, and compared with air. Special emphasis was put on the increased oxidative stress / narcotic N₂-potency during hyperbaric conditions resulting in (1) possible pulmonary injury, (2) formation of gas bubbles, (3) cognitive performance and (4) modulation of heart rate (HF) during diving.

Material and Methods: A prospective, double-blinded field study was performed in the Red Sea (SUBEX-dive base, El Qusier, Egypt). 108 (38 females) advanced recreational divers participated in standardized dives and were randomized to either air or air28. The no-decompression dives lasted on average 62 ± 5 min and led to a depth of 24 ± 1 m. Thus, the level of oxygen toxicity of 1.4 pO₂, as recommended by several diving organizations, was not exceeded. The dives were performed with almost no stress because of the good visibility, the lack of currents, and the pleasant water temperature (~ 28 - 29 °C).

Possible adverse effects of air28 on the pulmonary function (static and dynamic) were assessed via spirometry before and after the dive. Formation of bubbles in venous blood was assessed twice (1. interval: 30-45 min; 2. interval: 45-60 min) after the end of the dive on three different locations (Vena jugularis /subclavia /femoralis) using Doppler ultra sound. To determine possible positive effects of air28 on cognitive competence, memory (visual didactic- and retentiveness-test) and alertness (number-connecting-test) were assessed during the dive. Finally, the effects of increased oxygen on the autonomic system were continuously assessed by monitoring the heart rate.

Results: Pulmonary function (static and dynamic) before and after the dive was not different between the air28 group and the air group, using vital capacity and peak expiratory flow as reference parameters.

Reduction of the N₂-fraction in breathing gas (from 79 % to 72 %) led to a slight difference in the total number of divers with bubbles (air: 92.6 %; air28: 88.9 %; $p=0.371$), but the total number of bubbles differed significantly in 1. interval (air: 1854; air28: 948, $p=0.047$). 30 min after the end of the dive, bubbles were detected in all three vessels, with the bubble

maximum between 45 and 60 min after dive. The bubble amount depended significantly on the anatomical location. Most bubbles were found in the jugular vein (draining lipid rich tissue) and the least number of bubbles was found in the femoral vein (draining muscle rich tissue). Bubble count depended on gender: females had in the 1. interval and in the 2. interval about 53% and about 35% less bubbles, respectively. Almost 16% of the females but only about 6% of the males were bubble-free ($p=0.058$).

Air28 improved the cognitive competence significantly compared with air: the number of errors in both tests was lower (VLMT: long delay; $p=0.037$; NCT: $p=0.068$), and memory and alertness were slightly better. Independent from the breathing gas, females remembered significantly more words of the memory test than males did ($p<0.001$).

Heart rate at the onset of the dive was increased by about 20 to 30 beats per minute compared with resting heart rates. In the course of the dive, heart rate decreased significantly by about 20 % in both breathing-gas-groups ($p<0,001$), such that resting rates were reached. The decrease in heart rate was not different between air and air28, and did not depend on gender, age or diving experience.

Conclusions: Moderately increasing the proportion of oxygen was not associated with transient pulmonary dysfunction. Also, increased oxygen had no effect on the heart rate, i.e. it did not intensify the diving bradycardia. Air28 did significantly improve the cognitive competence, in particular by reducing the number of errors. Air28 led to a significant reduction of the bubble load shortly after surfacing.

Under the conditions mentioned, this study demonstrates no adverse effects of air28 but moderate advantages compared to dives with air.

6. LITERATUR

Alboni P, Alboni M, Gianfranchi L. 2011. *Diving bradycardia: a mechanism of defence against hypoxic damage*. J Cardiovasc Med (Hagerstown); 12(6):422-7.

Anonymus. *Professor James Lorrain Smith*. 1931. BMJ; S. 773–776.

Arborelius M Jr, Ballidin UI, Lilja B, Lundgren CE. 1972. *Regional lung function in man during immersion with the head above water*. Aerosp Med; 43(6):592-8.

Astrand PO, Rodahl K. 1986. *Textbook of work physiology: physiological bases of exercise*. 3rd edn. New York: McGraw-Hill.

Baddeley AD, De Figueredo JW, Curtis JW, Williams AN. 1968. *Nitrogen narcosis and performance under water*. Ergonomics; 11(2):157-64.

Bader N, Bosy-Westphal A, Koch A, Rimbach G, Weimann A, Poulsen HE, Müller MJ. 2007. *Effect of hyperbaric oxygen and vitamin C and E supplementation on biomarkers of oxidative stress in healthy men*. Br J Nutr; 98(4):826-33.

Barbosa E, García-Manso JM, Martín-González JM, Sarmiento S, Calderón FJ, Da Silva-Grigoletto ME. 2010. *Effect of hyperbaric pressure during scuba diving on autonomic modulation of the cardiac response: application of the continuous wavelet transform to the analysis of heart rate variability*. Mil Med; 175(1):61-4.

Barth E, Bassi G, Maybauer DM, Simon F, Gröger M, Oter S, Speit G, Nguyen CD, Hasel C, Möller P, Wachter U, Vogt JA, Matejovic M, Radermacher P, Calzia E. 2008. *Effects of ventilation with 100% oxygen during early hyperdynamic porcine fecal peritonitis*. Crit Care Med; 36(2):495-503.

Bearden SE, Chevront SN, Ring TA, Haymes EM. 1999. *Oxidative stress during a 3.5 hour exposure to 120kPs pO2 in human divers*. Undersea Hyperb Med; 26(3): 159-64.

Behnke AR. 1951. *Decompression sickness following exposure to high pressures*. In *Decompression Sickness*. ed. Fulton JF, Saunders, Philadelphia; 53–89.

Behnke AR, Thomson RM, Motley EP. 1935. *The psychologic effects from breathing air at 4 atm pressure*. Am J Physiol; 112: 554–558.

Benedetti S, Lamorgese A, Piersantelli M, Pagliarani S, Benvenuti F, Canestrari F. 2004. *Oxidative stress and antioxidant status in patients undergoing prolonged exposure to hyperbaric oxygen*. Clin Biochem; 37(4):312-7.

Bennett MH, French C, Schnabel A, Wasiak J, Kranke P. *Normobaric and hyperbaric oxygen therapy for migraine and cluster headache*. 2008. Cochrane Database Syst Rev; (3):CD005219.

Bennett PB. 1969. *Measurement and mechanisms of inert gas narcosis*. J Occup Med; 11(5):217-22.

Bert, Paul (1943) [First published in French in 1878]. *Barometric pressure: Researches in Experimental Physiology*. Columbus, OH: College Book Company. Translated by: Hitchcock, Mary Alice; Hitchcock, Fred A.

- Blatteau JE, Boussuges A, Gempp E, Pontier JM, Castagna M, Robinet C, Galland FM, Bourdon L. 2007. *Haemodynamic changes induced by submaximal exercise before a dive and its consequences on bubble formation*. Br J Sports Med; 41:375–379.
- Blatteau JE, Gempp E, Galland FM, Pontier JM, Sainty JM, Robinet C. 2005. *Aerobic exercise 2 hours before a dive to 30 msw decreases bubble formation after decompression*. Aviat Space Environ Med.; 76(7):666-9.
- Blatteau JE, Hugon J, Gempp E, Castagna O, Pény C, Vallée N. 2012. *Oxygen breathing or recompression during decompression from nitrox dives with a rebreather: effects on intravascular bubble burden and ramifications for decompression profiles*. Eur J Appl Physiol.; 112(6):2257-65.
- Blogg SL, Gennser M. 2011. *The need for optimisation of post-dive ultrasound monitoring to properly evaluate the evolution of venous gas emboli*. Diving Hyperb Med;41(3):139-46.
- Bonde-Petersen F, Schultz-Pedersen L, Dragsted N. 1992. *Peripheral and central blood flow in man during cold, thermoneutral, and hot water immersion*. Aviat Space Environ Med; 63(5):346-50.
- Boussuges A, Retali G, Bodéré-Melin M, Gardette B, Carturan D. 2009. *Gender differences in circulating bubble production after SCUBA diving*. Clin Physiol Funct Imaging;29(6):400-5.
- Bove AA. 1998. *Risk of decompression sickness with patent foramen ovale*. Undersea Hyperb Med; 25(3):175-8.
- Boycott AE, Damant GCC, Haldane JS. 1908. *Prevention of compressed air illness*. J. Hygiene; 8(03): 342–443. doi:10.1017/S0022172400003399.
- Braun R, Burchard GD, Fröhlich E, Nothdurft HD. 2005. *Reise- und Tropenmedizin: Kursbuch für Weiterbildung, Praxis und Beratung*. Stuttgart: Schattauer; S.209-212, ISBN 3-7945-2286-9.
- Broome JR, Dutka AJ, McNamee GA. 1995. *Exercise conditioning reduces the risk of neurologic decompression illness in swine*. Undersea Hyperb Med; 22(1): 73-85.
- Brubakk AO, Eftedal O. 2001. *Comparison of three different ultrasonic methods for quantification of intravascular gas bubbles*. Undersea Hyperb Med;28(3):131-6.
- Buch DA, El Moalem H, Dovenbarger JA, Ugucconi DM, Moon RE. 2003. *Cigarette smoking and decompression illness severity: a retrospective study in recreational divers*. Aviat Space Environ Med;74(12):1271-4.
- Bühlmann A. 1984. *Decompression-Decompression Sickness*. Berlin New York: Springer-Verlag; ISBN 0-387-13308-9.
- Bühlmann AA, Völlm EB, Nussberger P. 2002. *Tauchmedizin*. 5. Auflage, Springer, ISBN 3-540-42979-4.
- Butler FK. 1986. *Central nervous system oxygen toxicity in closed circuit scuba divers III*. US Navy Experimental Diving Unit Report; No. 5-86.
- Butler FK, Thalmann ED. 1986. *Central nervous system oxygen toxicity in closed circuit scuba divers II*. Undersea Biomed Res; 13:193-223.

- Butler FK, Thalmann ED. 1984. *CNS oxygen toxicity in closed-circuit scuba diving*. Bachrach AJ, Matzen MM eds. Proc Eighth Symp Underwater Physiol. Bethesda, Md: Undersea Medical Society;15-30.
- Camporesi EM, Vezzani G, Bosco G, Mangar D, Bernasek TL. 2010, *Hyperbaric oxygen therapy in femoral head necrosis*. J Arthroplasty;25(6 Suppl):118-23.
- Caputo GM, Cavanagh PR, Ulbrecht JS, Gibbons GW, Karchmer AW. 1994. *Assessment and management of foot disease in patients with diabetes*. N Engl J Med; 331(13):854-60.
- Carraway MS, Piantadosi CA. 1999. *Oxygen toxicity*. Respir Care Clin N Am; 5(2):265-95.
- Carturan D, Boussuges A, Vanuxem P, Bar-Hen A, Burnet H, Gardette B. 2002. *Ascent rate, age, maximal oxygen uptake, adiposity, and circulating venous bubbles after diving*. J Appl Physiol;93(4):1349-56.
- Caspers C, Cleveland S, Schipke JD. 2011. *Diving reflex: can the time course of heart rate reduction be quantified?* Scand J Med Sci Sports;21(1):18-31.
- Castagna O, Brisswalter J, Vallee N, Blatteau JE. 2011. *Endurance exercise immediately before sea diving reduces bubble formation in scuba divers*. Eur J Appl Physiol;111:1047-54.
- Chouchou F, Pichot V, Garet M, Barthélémy JC, Roche F. 2009. *Dominance in cardiac parasympathetic activity during real recreational SCUBA diving*. Eur J Appl Physiol;106:345–352.
- Christie JL, Sheldahl LM, Tristani FE, Wann LS, Sagar KB, Levandoski SG, Ptacin MJ, Sobocinski KA, Morris RD. 1990. *Cardiovascular regulation during head-out water immersion exercise*. J Appl Physiol;69(2):657-64.
- Cianci PE, Lueders H, Lee H, Shapiro R, Sexton J, Williams C, Green B. 1988. *Adjunctive Hyperbaric Oxygen Reduces the Need for Surgery in 40-80% Burns*. J. Hyperbaric Med; 3(2):97–101.
- Clark JM, Lambertsen CJ. 1970. *Pulmonary Oxygen Tolerance in Man and Derivation of Pulmonary Oxygen Tolerance Curves*. EBSDC-IFEM. Philadelphia, PA: Environmental Biomedical Stress Data Center, Institute for Environmental Medicine, University of Pennsylvania Medical Center.
- Clark RA. 1998. *Open Water Diver; Manual*; Scuba Schools International Germany, Walldorf; Druckhaus Diesbach, Weinheim.; S. 137; ISBN: 3-928146-27-0.
- Cope A, Eggert JV, O'Brien E. 2011. *Retinal artery occlusion: visual outcome after treatment with hyperbaric oxygen*. Diving Hyperb Med;41(3):135-8.
- Crosbie WA, Clarke MB, Cox RA, McIver NK, Anderson IK, Evans HA, Liddle GC, Cowan JL, Brookings CH, Watson DG. 1977. *Physical characteristics and ventilatory function of 404 commercial divers working in the North Sea*. Br J Ind Med; 34(1):19–25.
- Dalecki M, Bock O, Schulze B. 2012. *Cognitive impairment during 5 m water immersion*. J Appl Physiol;113(7):1075-81. doi: 10.1152/jappphysiol.00825.2012.
- DAN. 2005. *Report on decompression illness diving fatalities and project dive exploration*. Divers Alert Network. Durham, NC, USA; ISBN 0-9673066-7-1.

- Dembert ML, Beck GJ, Jekel JF, Mooney LW. 1984. *Relations of smoking and diving experience to pulmonary function among U.S. Navy divers*. Undersea Biomed Res;11(3):299-304.
- Denoble PJ, Marroni A, Vann RD. 2011. *Annual fatality rates and associated risk factors for recreational scuba diving*. Recreational Diving Fatalities Workshop Proceedings. Workshop April 2010. Durham, N.C.: Divers Alert Network. ISBN:978-0-615-54812-8.
- Dixon GA, Krutz RW Jr, Fischer JR. 1988. *Decompression sickness and bubble formation in females exposed to a simulated 7.8 psia suit environment*. Aviat Space Environ Med; 59(12):1146-9.
- Donald KW. 1992. *Oxygen and the diver*. Harley Swan, UK
- Doolette DJ, Mitchell SJ. 2001. *The physiological kinetics of nitrogen and the prevention of decompression sickness*. Clin Pharmacokinet.; 40(1):1-14.
- Dujic Z, Duplancic D, Marinovic-Terzic I, Bakovic D, Ivancev V, Vailc Z, Eterovic D, Petri N-M, Wisloff U, Brubakk A. 2004. *Aerobic exercise before diving reduces venous gas bubble formation in humans*. J Physiol; 555(3): 637-642.
- Dujic Z, Palada I, Obad A, Duplancic D, Bakovic D, Valic Z. 2005. *Exercise during a 3-min decompression stop reduces postdive venous gas bubbles*. Med Sci Sports Exerc.; 37(8):1319-23.
- Dundar K, Gumus T, Ay H, Yetiser S, Ertugrul E.2007. *Effectiveness of hyperbaric oxygen on sudden sensorineural hearing loss: prospective clinical research*. J Otolaryngol;36(1):32-7.
- Edwards ML. 2010. *Hyperbaric oxygen therapy. Part 2: application in disease*. J Vet Emerg Crit Care (San Antonio);20(3):289-97.
- Eftedal O, Brubakk AO. 1997. *Agreement between trained and untrained observers in grading intravascular bubble signals in ultrasonic images*. Undersea Hyperb Med;24(4):293-9.
- Eid HS, El Sayed W. 2011. *The effect of hyperbaric oxygen therapy on improving bony stability in LeFort I maxillary advancement*. Undersea Hyperb Med; 38(2):117-26.
- Eschenfelder CC, Krug R, Yusofi AF, Meyne JK, Herdegen T, Koch A, Zhao Y, Carl UM, Deuschl G. 2008. *Neuroprotection by Oxygen in Acute Transient Focal Cerebral Ischemia Is Dose Dependent and Shows Superiority of Hyperbaric Oxygenation*. Cerebrovasc Dis; 25:193-201 (DOI: 10.1159/000113856).
- Finne EF, Olsvik PA, Berntssen MH, Hylland K, Tollefsen KE. 2008. *The partial pressure of oxygen affects biomarkers of oxidative stress in cultured rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) hepatocytes*. Toxicol In Vitro;22(6):1657-61.
- Fujimura T, Suzuki H, Shiomori T, Udaka T, Mori T. 2007. *Hyperbaric oxygen and steroid therapy for idiopathic sudden sensorineural hearing loss*. Eur Arch Otorhinolaryngol; 264(8):861-6.
- Gabel H, Janoff D. 1997. *Use of Oxygen-Enriched Mixtures in Recreational SCUBA Diving - Is the Public Being Informed of the Risks?* W.T. Royals, T.C. Chou, and T.A. Steinberg (Eds.) In: Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Eighth

Volume, ASTM STP 1319. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.; PA 34-41.

Gabrielsen A, Johansen LB, Norsk P. 1993. *Central cardiovascular pressures during graded water immersion in humans*. Eur J Appl Physiol; 75(2):581–585.

Gauer OH. 1975. *Recent advances in the physiology of whole body immersion*. Acta Astronaut;2(1-2):31-9.

Gempp E, Blatteau JE. 2010. *Preconditioning methods and mechanisms for preventing the risk of decompression sickness in scuba divers: a review*. Res Sports Med;18(3):205-18.

Gempp E, Sbardella F, Stephant E, Constantin P, De Maistre S, Louge P, Blatteau JE. 2010. *Brain MRI signal abnormalities and right-to-left shunting in asymptomatic military divers*. Aviat Space Environ Med;81(11):1008-12.

Germonpre P, Hastir F, Dendale P, Marroni A, Nguyen AF, Balestra C. 2005. *Evidence for increasing patency of the foramen ovale in divers*. Am J Cardiol;95(7): 912-5.

Gienow G, Gienow P. 2010. *Materia Medica der Urelemente Teil III*. Berlin: epubli GmbH.; S.254; ISBN 978-3-86931-621-5.

Gole Y, Gargne O, Coulange M, Steinberg JG, Bouhaddi M, Jammes Y, Regnard J, Boussuges A. 2011. *Hyperoxia-induced alterations in cardiovascular function and autonomic control during return to normoxic breathing*. Eur J Appl Physiol; 111(6):937-46.

Gronow G, Kähler W, Koch A, Klause N. 2005. *Benzoate hydroxylation: a measure of oxidative stress in divers*. Adv Exp Med Biol; 566:233-9.

Hamilton RW. 1989. *Tolerating exposure to high oxygen levels: Repex and other methods*. MTS Journal; 23(4):19-25.

Harabin AL, Homer LD, Weathersby PK, Flynn ET. 1987. *An analysis of decrements in vital capacity as an index of pulmonary oxygen toxicity*. J Appl Physiol; 63(3): 1130-5.

Hart GB, Strauss MB. 1990. *Gas Gangrene - Clostridial Myonecrosis: A Review*. J. Hyperbaric Med; 5(2):125-144.

Hayashi N, Ishihara M, Tanaka A, Osumi T, Yoshida T. 1997. *Face immersion increases vagal activity as assessed by heart rate variability*. Eur J Appl Physiol Occup Physiol; 76(5):394-9.

Helmstaedter C, Lendt M, Lux S. 2001. *VLMT*. Göttingen: Beltz Test GmbH.

Hick C, Hick A. 2006. *Intensivkurs Physiologie*. 5. Ed; Elsevier GmbH, Urban & Fischer, München; ISBN: 978-3-437-41892-1.

Higham J, Lück M. 2007. *Marine wildlife and tourism management: In search of scientific approaches to sustainability*. Wallingford, UK: CABI, Marine wildlife and tourism management; 1–19.

Hills BA, Butler BD. 1981. *Size distribution of intravascular air emboli produced by decompression*. Undersea Biomed Res;8(3):163-70.

- Honek T, Veselka J, Tomek A, Sránek M, Janugka J, Sefc L, Kerekes R, Novotný S. 2007. *Paradoxical embolization and patent foramen ovale in scuba divers: screening possibilities.* Vnitr Lek; 53(2):143-6.
- Hugon J, Barthelemy L, Rostain JC, Gardette B. 2009. *The pathway to drive decompression microbubbles from the tissues to the blood and the lymphatic system as a part of this transfer.* Undersea Hyperb Med;36(4):223-36.
- Hultsch DF, Hertzog C, Dixon RA. 1990. *Ability correlates of memory performance in adulthood and aging.* Psychol Aging.;5(3):356-68.
- Janero DR. 1990. *Malondialdehyde and thiobarbituric acid-reactivity as diagnostic indices of lipid peroxidation and peroxidative tissue injury.* Free Radic Biol Med; 9(6): 515-40.
- Jankowski LW, Tikuisis P, Nishi RY. 2004. *Exercise effects during diving and decompression on postdive venous gas emboli.* Aviat Space Environ Med; 75(6): 489-95.
- Jennings RD. 1969. *A behavioral approach to nitrogen narcosis.* Psychol Bull;(3): 216-24.
- Kinoshita T, Nagata S, Baba R, Kohmoto T, Iwagaki S. 2006. *Cold-water face immersion per se elicits cardiac parasympathetic activity.* Circ J;70(6):773-6.
- Klingmann C, Tetzlaff K. 2012. *Moderne Tauchmedizin; Handbuch für Tauchlehrer, Taucher und Ärzte.* Gentner Verlag, Stuttgart; 2. Auflage; S. 171-198,738; ISBN: 978-3-87247-744-6.
- Knauth M, Ries S, Pohimann S, Kerby T, Forsting M, Daffertshofer M, Hennerici M, Sartor K. 1997. *Cohort study of multiple brain lesions in sport divers: role of a patent foramen ovale.* BMJ; 314(7082):701–705.
- Koch AE, Kähler W, Wegner-Bröse H, Weyer D, Kuhtz-Buschbeck J, Deuschl G, Eschenfelder CC. 2008. *Monitoring of CBFV and time characteristics of oxygen-induced acute CNS toxicity in humans.* Eur J Neurol;15(7):746-8.
- Koch AE, Koch I, Kowalski J, Schipke JD, Winkler BE, Deuschl G, Meyne J, Kähler W. 2013. *Physical exercise might influence the risk of oxygen-induced acute neurotoxicity.* Undersea Hyperb Med.;40(2):155-63.
- Kot J, Sićko Z, Wozniak M. 2003. *Oxidative stress during oxygen tolerance test.* Int Marit Health; 54(1-4):117-26.
- Kramer BW, Lievens S, Been JV, Zimmermann LJ. 2010. *From classic to new broncho-pulmonary dysplasia.* Ned Tijdschr Geneesk;154:A1024.
- Kranke P, Bennett M, Roedel-Wiedmann I, Debus S. 2004. *Hyperbaric oxygen therapy for chronic wounds.* Cochrane Database Syst Rev;(2):CD004123.
- Lafay V, Boussuges A, Ambrosi P, Barthelemy P, Frances Y, Gardette B, Jammes Y. 1997. *Doppler-echocardiography study of cardiac function during a 36 atm (3,650 kPa) human dive.* Undersea Hyperb Med;24(2):67-71.
- Lampert T, Burger M. 2004. *Rauchgewohnheiten in Deutschland - Ergebnisse des telefonischen Bundes-Gesundheitssurveys 2003.* Gesundheitswesen; 66:511-7.
- Landsberg PG. 1975. *Bradycardia during human diving.* S Afr Med J; 49(15): 626-30.

- Larrabee GJ, Crook TH 3rd. 1993. *Do men show more rapid age-associated decline in simulated everyday verbal memory than do women?* Psychol Aging.;8(1):68-71.
- Lee V, St Leger Dowse M, Edge C, Gunby A, Bryson P. 2003. *Decompression sickness in women: a possible relationship with the menstrual cycle.* Aviat Space Environ Med; 74(11):1177-82.
- Leitch DR. 1984. *Cerebral oxygen toxicity during immersion and surface supported diving.* INM TECH Memo.
- Lettnin H. 1994. *Tauchen mit Mischgas (2. Auflage).* Springer-Verlag, Berlin.; ISBN 3-540-57822-6.
- Levett DZ, Millar IL. 2008. *Bubble trouble: a review of diving physiology and disease.* Postgrad Med J;84(997):571-8.
- Lier H, Schroeder S, Hering R. 2004. *Patent foramen ovale: an underrated risk for divers?* Dtsch Med Wochenschr;129(1-2):27-30.
- Löffler G. 2005. *Basiswissen Biochemie mit Pathobiochemie.* Springer: Berlin-Heidelberg-New-York.; 6. Auflage; S. 287- 326; ISBN: 3-540-23885-9.
- Löndahl M, Fagher K, Katzman P. 2011. *What is the role of hyperbaric oxygen in the management of diabetic foot disease?* Curr Diab Rep;11(4):285-93.
- Lund V, Kentala E, Scheinin H, Klossner J, Sariola-Heinonen K, Jalonen J. 2000. *Hyperbaric oxygen increases parasympathetic activity in professional divers.* Acta Physiol Scand; 170(1):39-44).
- Lund VE, Kentala E, Scheinin H, Klossner J, Helenius H, Sariola-Heinonen K, Jalonen J. 1999. *Heart rate variability in healthy volunteers during normobaric and hyperbaric hyperoxia.* Acta Physiol Scand;167(1):29-35.
- Marroni A, Bennett PB, Cronje FJ, Cali-Corleo R, Germonpre P, Pieri M, Bonuccelli C, Balestra C. 2004. *A deep stop during decompression from 82 fsw (25 m) significantly reduces bubbles and fast tissue gas tensions.* Undersea Hyperb Med;31(2): 233-43.
- Mears JD, Cleary PJ. 1980. *Anxiety as a factor in underwater performance.* Ergonomics;23(6):549-57.
- Menzel-Severing J, Siekmann U, Weinberger A, Roessler G, Walter P, Mazinani B. 2012. *Early hyperbaric oxygen treatment for nonarteritic central retinal artery obstruction.* Am J Ophthalmol;153(3):454-459.e2.
- Miller MR, Hankinson J, Brusasco V, Burgos F, Casaburi R, Coates A, Crapo R, Enright P, van der Grinten CP, Gustafsson P, Jensen R, Johnson DC, MacIntyre N, McKay R, Navajas D, Pedersen OF, Pellegrino R, Viegi G, Wanger J, ATS/ERS Task Force. 2005. *Standardisation of spirometry.* Eur Respir J;26(2):319-38.
- Miwa C, Sugiyama Y, Mano T, Iwase S, Matsukawa T. 1996. *Spectral characteristics of heart rate and blood pressure variabilities during head-out water immersion.* Environ Med;40(1):91-4.

- Miwa C, Sugiyama Y, Mano T, Iwase S, Matsukawa T. 1997. *Sympatho-vagal responses in humans to thermoneutral head-out water immersion*. *Aviat Space Environ Med*;68(12):1109-14.
- Miyamoto N, Matsui N, Inoue I, Seo H, Nakabayashi K, Oiwa H. 1991. *Hyperbaric diuresis is associated with decreased antidiuretic hormone and increased atrial natriuretic polypeptide in humans*. *Jpn J Physiol*;41(1):85-99.
- Molénat F, Boussuges A, Grandfond A, Rostain JC, Sainty JM, Robinet C, Galland F, Meliet J. 2004. *Haemodynamic effects of hyperbaric hyperoxia in healthy volunteers: an echocardiographic and Doppler study*. *Clin Sci (Lond)*;106(4):389-95.
- Most RS, Sinnock P. 1983. *The epidemiology of lower extremity amputations in diabetic individuals*. *Diabetes Care*;6(1):87-91.
- Muntau AC. 2009. *Intensivkurs Pädiatrie*. 5. München: Elsevier Urban & Fischer Verlag; S.10-11; ISBN 978-3-437-43392-4.
- Musa G, Dimmock K. 2012. *Scuba diving tourism: introduction to special issue*. *Tourism in Marine Environments; Special Issue*,8(1-2):1-5.
- Muth CM, Radermacher P. 2006. *Kompendium der Tauchmedizin*. 2. Köln: Deutscher Ärzteverlag.; S.14–15; ISBN 978-3-7691-1239-9.
- Mutlu I, Aydintug YS, Kaya A, Bayar GR, Suer BT, Gulses A. 2012. *The evaluation of the effects of hyperbaric oxygen therapy on new bone formation obtained by distraction osteogenesis in terms of consolidation periods*. *Clin Oral Investig*;16(5): 1363-70.
- Narkowicz CK, Vial JH, McCartney PW. 1993. *Hyperbaric oxygen therapy increases free radical levels in the blood of humans*. *Free Radic Res Commun*;19(2):71-80.
- Neubauer B, Tetzlaff K, Staschen CM, Bettinghausen E. 2001. *Cardiac output changes during hyperbaric hyperoxia*. *Int Arch Occup Environ Health*;74(2):119-22.
- Norsk P, Bonde-Petersen F, Warberg J. 1985. *Central venous pressure and plasma arginine vasopressin during water immersion in man*. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*;54(1):71-8.
- Obad A, Marinovic J, Ljubkovic M, Breskovic T, Modun D, Boban M, Dujic Z. 2010. *Successive deep dives impair endothelial function and enhance oxidative stress in man*. *Clin Physiol Funct Imaging*;30(6):432-8.doi: 10.1111/j.1475097X.2010.00962.x.
- Ong TF, Musa G. 2011. *An examination of recreational divers' underwater behaviour by attitude-behaviour theories*. *Current Issues in Tourism*; 14(8) DOI:10.1080/13683500.2010.545370.
- Oswald WD, Roth E. 1970. *ZVT-A*. Verlag für Psychologie Dr. Hogrefe, Göttingen. (2005, 3. überarb./ergänzte Auflage).
- Pauls F, Petermann F, Lepach AC. 2013. *Gender differences in episodic memory and visual working memory including the effects of age*. *Memory*;21(7),857–74.
- Pelaia P, Rocco M, De Blasi RA, Spadetta G, Alampi D, Araimo FS, Nicolucci S. 1995. *Evaluation of lipidic peroxidation during hyperbaric oxygen therapy. Protective role of N-acetylcysteine*. *Minerva Anestesiol*;61(4):133-9.

- Piantadosi CA. 2002. *Carbon monoxide poisoning*. N Engl J Med; 347(14):1054-5.
- Piepho T, Muth C-M, Heitkamp H-C, Tetzlaff K. 2008. *Krankheitsprävalenz und Tauchverhalten von Sporttauchern*. Dt. Zeitschrift für Sportmedizin;59:17-20.
- Pohl U. 2010. *Der Sauerstoff im Gewebe: Substrat, Signal und Noxe*. In: Schmidt RF, Lang F, Heckmann M: *Physiologie des Menschen*. Springer Verlag, 31. Auflage, pp. 763-777
- Pokan R, Förster H, Hofmann P, Hörtnagl H, Ledl-Kurkowski E, Wonisch M. 2004. *Kompendium der Sportmedizin: Physiologie, innere Medizin und Pädiatrie*. Wien, New-York: Springer; S.281-282; ISBN 3-211-21253-1.
- Pollock NW. 2007. *Use of ultrasound in decompression research*. Diving and Hyperbaric Medicine; 37:68-72.
- Quanjer PH, Tammeling GJ, Cotes JE, Pedersen OF, Peslin R, Yernault JC. 1994. *Lung volumes and forced ventilatory flows. Report Working Party Standardization of Lung Function Tests, European Community for Steel and Coal. Official Statement of the European Respiratory Society*. Eur Respir J;7(6):1197-8.
- Heiss G, Kochzius M, Alter C, Roder C. 2005. *Reef Check e.V. Studie zum Zustand der Riffe in der El Quadim Bucht*. El Quseir, Ägypten.
- Reiber GE. 1996. *The epidemiology of diabetic foot problems*. Diabet Med;13 Suppl 1:S6-11.
- Reul J, Weis J, Jung A, Willmes K, Thron A. 1995. *Central nervous system lesions and cervical disc herniations in amateur divers*. Lancet;345(8962):1403-5.
- Risch WD, Koubenec HJ, Beckmann U, Lange S, Gauer OH. 1978. *The effect of graded immersion on heart volume, central venous pressure, pulmonary blood distribution, and heart rate in man*. Pflugers Arch;374(2):115-8; (Quelle: 1978a).
- Risch WD, Koubenec HJ, Gauer OH, Lange S. 1978. *Time course of cardiac distension with rapid immersion in a thermo-neutral bath*. Pflugers Arch;374(2):119-20; (Quelle: 1978b).
- Rudge FW. 1990. *Relationship of menstrual history to altitude chamber decompression sickness*. Aviat Space Environ Med;61(7):657-9.
- Saugstad OD. 2003. *Bronchopulmonary dysplasia-oxidative stress and antioxidants*. Semin Neonatol; 8(1):39-49.
- Saugstad OD. 2010. *Oxygen and oxidative stress in bronchopulmonary dysplasia*. J Perinat Med; 38(6):571-7.
- Sawatzky KD, Nishi RY. 1991. *Assessment of inter-rater agreement on the grading of intravascular bubble signals*. Undersea Biomed Res;18(5-6):373-96.
- Schipke JD, Pelzer M. 2001. *Effect of immersion, submersion, and scuba diving on heart rate variability*. Br J Sports Med;35:174-180 doi:10.1136/bjsm.35.3.174.
- Scholey AB, Moss MC, Wesnes K. 1998. *Oxygen and cognitive performance: the temporal relationship between hyperoxia and enhanced memory*. Psychopharmacology (Berl); 140(1):123-6.

- 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(5):783-9.
- Schröder S, Schneider-Bichel D. 2010. *Wasserrettung und Notfallmedizin*. Fulda, Heidelberg, München: ecomed Hüthig, Jehle, Rehm; S.288-300, ISBN: 978-3-609-77483-1.
- Schwerzmann M, Seiler C. 2001. *Recreational scuba diving, patent foramen ovale and their associated risks*. *Swiss Med Wkly*;131(25-26):365-74.
- Schwerzmann M, Seiler C, Lipp E, Guzman R, Lövblad KO, Kraus M, Kucher N. 2001. *Relation between directly detected patent foramen ovale and ischemic brain lesions in sport divers*. *Ann Intern Med*;134(1):21-4.
- Sekulic D, Tocilj J. 2006. *Pulmonary function in military divers: smoking habits and physical fitness training influence*. *Mil Med*;171(11):1071-5.
- Shibata S, Iwasaki K, Ogawa Y, Kato J, Ogawa S. 2005. *Cardiovascular neuroregulation during acute exposure to 40, 70, and 100% oxygen at sea level*. *Aviat Space Environ Med*; 76(12):1105-10.
- Shiraishi M, Schou M, Gybel M, Christensen NJ, Norsk P. 2002. *Comparison of acute cardiovascular responses to water immersion and head-down tilt in humans*. *J Appl Physiol*; 92(1):264-8.
- Shykoff BE. 2008. *Pulmonary effects of submerged oxygen breathing in resting divers: repeated exposures to 140 kPa*. *Undersea Hyperb Med*;35(2):131-43.
- Siebert C, Breuer C, Miltner O, Krüger S. 2004. *Tipps und Tricks für den Sportmediziner: Problemlösungen von A-Z*. Springer: Berlin-Heidelberg-New-York.; S.119-123; ISBN: 3-540-44245-6.
- Siems WG, Sommerburg O, Mayer H, Grune T. 1998. *Die wichtigsten Radikalquellen im menschlichen Organismus*. *Pharmazeutische Zeitung*;19:11-25.
- Skogstad M, Thorsen E, Haldorsen T. 2000. *Lung Function Over the First 3 Years of a Professional Diving Career*. *Occup. Environ. Med*; 57:390-395.
- Skogstad M, Thorsen E, Haldorsen T, Kjuus H. 2002. *Lung Function Over Six Years Among Professional Divers*. *Occup. Environ. Med*; 59:629-633.
- Smith JL, M.A., M.D. 1899. *The pathological effects due to increase of oxygen tension in the air breathed*. From the Pathological Laboratory, Queen's College, Belfast.
- Spencer MP. 1976. *Decompression limits for compressed air determined by ultrasonically detected blood bubbles*. *J Appl Physiol*;40(2):229-35.
- Spencer MP, Clarke HF. 1972. *Precordial monitoring of pulmonary gas embolism and decompression bubbles*. *Aerosp Med*;43(7):762–767.
- St Leger Dowse M, Bryson P, Gunby A, Fife W. 2002. *Comparative data from 2250 male and female sports divers: diving patterns and decompression sickness*. *Aviat Space Environ Med*; 73(8):743-9.

SUBEX. 2006. *The Art of Diving - So gut wie sicher - SUBEX air28*. Herausgeber: Johann Vifian. <http://www.subex.org/TaAir28.aspx?Nav=Tauchen>.

Suzuki S. 1997. *Diver's Lung Function: Influence of Smoking Habit*. J Occup Health; 39:95–99.

Tanaka T, Nitta Y, Morimoto K, Nishikawa N, Nishihara C, Tamada S, Kawashima H, Nakatani T. 2011. *Hyperbaric oxygen therapy for painful bladder syndrome/interstitial cystitis resistant to conventional treatments: long-term results of a case series in Japan*. BMC Urol; 11:11.

Tetzlaff K, Friege L, Hutzelmann A, Reuter M, Höll D, Leplow B. 1999. *Magnetic resonance signal abnormalities and neuropsychological deficits in elderly compressed-air divers*. Eur Neurol; 42(4):194-9; (Quelle: 1999a).

Tetzlaff K, Friege L, Koch A, Heine L, Neubauer B, Struck N, Mutzbauer TS. 2001. *Effects of ambient cold and depth on lung function in humans after a single scuba dive*. Eur J Appl Physiol; 85(1-2):125-9.

Tetzlaff K, Klingmann C, Muth CM, Piepho T, Welslau W. 2012. *Checkliste Tauchtauglichkeit*. Gentner Verlag, Stuttgart; 2. Auflage; ISBN: 978-3-87247-681-4.

Tetzlaff K, Staschen CM, Koch A, Heine L, Kampen J, Neubauer B. 1999. *Respiratory pattern after wet and dry chamber dives to 0.6 MPa ambient pressure in healthy males*. Respir Physiol; 118(2-3):219-26; (Quelle: 1999b).

Thalman ED, DAN Assistant Medical Director. 2007. *If You Dive Nitrox You Should Know About OXTOX*. 1980-2007 Divers Alert Network.

Thorsen E, Segadal K, Kambestad B, Gulsvik A. 1990. *Divers' lung function: small airways disease?* Br J Ind Med; 47(8):519-23.

Todnem K, Nyland H, Kambestad BK, Aarli JA. 1990. *Influence of occupational diving upon the nervous system: an epidemiological study*. Br J Ind Med; 47(10):708-14.

Tripathi KK, Moorthy A, Karai RC, Rao G, Ghosh PC. 2011. *Effect of hyperbaric oxygen on bone healing after enucleation of mandibular cysts: a modified case control study*. Diving Hyperb Med; 41(4):195-201.

van Ooij PJ, van Hulst RA, Houtkooper A, van der Weide TJ, Sterk PJ. 2012. *Lung function before and after oxygen diving: a randomized crossover study*. Undersea Hyperb Med; 39(3):699-707.

Vann RD, Butler FK, Mitchell SJ, Moon RE. 2011. *Decompression illness*. Lancet; 377(9760):153-64,

Visser GH, Van Hulst RA, Wieneke GH, Van Huffelen AC. 1996. *Transcranial Doppler sonographic measurements of middle cerebral artery flow velocity during hyperbaric oxygen exposures*. Undersea Hyperb Med; 23(3):157-65.

Wanger J, Clausen JL, Coates A, Pedersen OF, Brusasco V, Burgos F, Casaburi R, Crapo R, Enright P, van der Grinten CP, Gustafsson P, Hankinson J, Jensen R, Johnson D, Macintyre N, McKay R, Miller MR, Navajas D, Pellegrino R, Viegi G. 2005. *Standardisation of the measurement of lung volumes*. Eur Respir J; 26(3): 511-22.

- Webb JT, Kannan N, Pilmanis AA. 2003. *Gender not a factor for altitude decompression sickness risk*. *Aviat Space Environ Med*;74(1):2-10.
- Weber D, Skirbekk V, Freund I, Herlitz A. 2014. The changing face of cognitive gender differences in Europe. *Proc Natl Acad Sci USA*.111(32),11673–8.
- Weien RW, Baumgartner N. 1990. *Altitude decompression sickness: hyperbaric therapy results in 528 cases*. *Aviat Space Environ Med*;61(9):833-6.
- Weiss JN. 2010. *Hyperbaric oxygen therapy and age-related macular degeneration*. *Undersea Hyperb Med*;37(2):101-5.
- Wilder J. 1931. *Das „Ausgangswert-Gesetz“, ein unbeachtetes biologisches Gesetz und seine Bedeutung für Forschung und Praxis*. *Zeitschrift für Neurologie*; 317-338, DOI: 10.1007/BF02864142.
- Williamson AM, Clarke B, Edmonds CW. 1989. *The influence of diving variables on perceptual and cognitive functions in professional shallow-water (abalone) divers*. *Environ Res*; 50(1):93-102.
- Wilmshurst P, Davidson C, O'Connell G, Byrne C. 1994. *Role of cardiorespiratory abnormalities, smoking and dive characteristics in the manifestations of neurological decompression illness*. *Clin Sci (Lond)*;86(3):297-303.
- Wisløff U, Richardson RS, Brubakk AO. 2004. *Exercise and nitric oxide prevent bubble formation: a novel approach to the prevention of decompression sickness?* *J Physiol*;555(Pt 3):825-9.
- Wollin P, Christmann M, Kroker A, Zielen S. 2011. *Lung function testing in children before and after an age-adapted SCUBA dive in a swimming pool*. *Pneumologie*; 65(5):308-13.
- Wright WB, Lambertsen CJ. 1972. *Use of the University of Pennsylvania, Institute for Environmental Medicine procedure for the calculation of cumulative pulmonary oxygen toxicity*. *US Navy Experimental Diving Unit Research Report*; 2-72.
- Yanagawa Y, Okada Y, Terai C, Ikeda T, Ishida K, Fukuda H, Hirata F, Fujita K. 1998. *MR imaging of the central nervous system in divers*. *Aviat Space Environ Med*; 69(9):892-5.
- Yildiz S, Kiralp MZ, Akin A, Keskin I, Ay H, Dursun H, Cimsit M. 2004. *A new treatment modality for fibromyalgia syndrome: hyperbaric oxygen therapy*. *J Int Med Res*;32(3):263-7.
- Yu WK, Chen YW, Shie HG, Lien TC, Kao HK, Wang JH. 2011. *Hyperbaric oxygen therapy as an adjunctive treatment for sternal infection and osteomyelitis after sternotomy and cardiothoracic surgery*. *J Cardiothorac Surg*;6:141.
- Zamboni WA, Riseman JA, Kucan JO. 1990. *Management of Fournier's Gangrene and the role of Hyperbaric Oxygen*. *J. Hyperbaric Med*;5(3):177-186.
- Zwingelberg KM, Knight MA, Biles JB. 1987. *Decompression sickness in women divers*. *Undersea Biomed Res*;14(4):311-7.

7. Erklärungen zur Eröffnung des Promotionsverfahrens

7.1. Erklärungen laut Anlage 1 zur Promotionsordnung

Technische Universität Dresden - Medizinische Fakultät Carl Gustav Carus
Promotionsordnung vom 24. Juli 2011
Erklärungen zur Eröffnung des Promotionsverfahrens

1. Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

2. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

Betreuer: Professor Dr. A Deußen, Institut für Physiologie, TU Dresden
Betreuer: Professor Dr. JD Schipke, Forschungsgruppe Experimentelle Chirurgie,
Univ. Düsseldorf
Support: Dipl.-Math. U Range, Institut für Medizinische Informatik und Biometrie
(IMB), TU Dresden, Beratung bei der statistischen Auswertung
Support: Dr. H Schmitz-Peiffer, Institut für Neuropsychologie, TU Dresden,
Beratung bei der Auswahl der kognitiven Leistungstests

3. Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

4. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

5. Die Inhalte dieser Dissertation wurden in folgender Form veröffentlicht:

Siehe 8.2: Kongressbeiträge und Seminare
Siehe 8.3: Abstracts
Siehe 8.4: Veröffentlichungen

6. Ich bestätige, dass es keine zurückliegenden erfolglosen Promotionsverfahren gab.

7. Ich bestätige, dass ich die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Technischen Universität Dresden anerkenne.

8. Ich habe die Zitierrichtlinien für Dissertationen an der Medizinischen Fakultät der Technischen Universität Dresden zur Kenntnis genommen und befolgt.

Ort, Datum Anne-Kathrin Brebeck

7.2. Erklärungen laut Anlage 2 zur Promotionsordnung

Hiermit bestätige ich die Einhaltung der folgenden aktuellen gesetzlichen Vorgaben im Rahmen meiner Dissertation

- das zustimmende Votum der Ethikkommission bei Klinischen Studien, epidemiologischen Untersuchungen mit Personenbezug oder Sachverhalten, die das Medizinproduktegesetz betreffen

Aktenzeichen der zuständigen Ethikkommission: **EK271092009**

- die Einhaltung der Bestimmungen des Tierschutzgesetzes
Aktenzeichen der Genehmigungsbehörde zum Vorhaben/zur Mitwirkung
- **entfällt** -
- die Einhaltung des Gentechnikgesetzes Projektnummer
- **entfällt** -
- die Einhaltung von Datenschutzbestimmungen der Medizinischen Fakultät und des Universitätsklinikums Carl Gustav Carus.

Ort, Datum

Anne-Kathrin Brebeck

8. Anhang

8.1. Beteiligte

Doktorandin: Anne- Kathrin Brebeck, TU Dresden

Betreuer: Prof. Dr. A Deußen, Institut für Physiologie, TU Dresden

Betreuer: Prof. Dr. JD Schipke, Forschungsgruppe Experimentelle Chirurgie, Universität Düsseldorf

Sponsor: Prof. Dr. C Balestra, Environmental & Occupational Physiology Laboratory, Haute Ecole Paul-Henri Spaak, Brüssel, geliehen: Hadeco ES-1000SPII

Sponsor: Prof. Dr. A Deußen, Institut für Physiologie, TU Dresden, geliehen: Jaeger Master Scope TP-Spirometer der Fa. CareFusion

Sponsor: Prof. Dr. A Koch und Dr. W Kähler, Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine in Kronshagen, Sektion Maritime Medizin am Institut für Experimentelle Medizin, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Support: Dipl.-Math. U Range, Institut für Medizinische Informatik und Biometrie (IMB), TU Dresden, Beratung bei der statistischen Auswertung

Support: Dr. H Schmitz-Peiffer, Institut für Neuropsychologie, TU Dresden, Beratung bei der Auswahl der kognitiven Leistungstests

Sponsor: Johann Vifian, SUBEX - The Art Of Diving, El Qusier, Ägypten

Sponsor: Ursula Wolfsberger, Johnson outdoors, geliehen: Galileo Sol der Firma Uwaterc

8.2. Kongressbeiträge und Seminare

- **25.08.2011:** 37th Annual Meeting of the European Underwater & Baromedical Society (EUBS) (Danzig)
 - Heart rate during recreational SCUBA-diving
 - Recreational SCUBA-diving with enriched air nitrox: pulmonary injury?
 - Cognitive performance during SCUBA-diving using O₂-enriched air

- **14.10.2011:** 19. Tagung der Angewandten und Klinischen Physiologie der Deutschen Physiologischen Gesellschaft (Leipzig)
 - Studie zum besseren Verständnis des Einflusses von Sauerstoff-angereicherter Luft auf die Bläschenbildung und die Herzfrequenz bei Urlaubstauchern

- **26.11.2011:** Seminar für Tauchmedizin (Essen)
 - Ist Nitrox gut für Taucher?

- **24.03.2012:** 91th Annual Meeting der Deutschen Physiologischen Gesellschaft (Dresden)
 - Effects of oxygen enriched air on recreational diver - a field study

- **26.10.2013:** 9. Symposium für Tauchmedizin (Hannover)
 - Tauchen mit Nitrox

- **28.11.2015:** Seminar für Tauchmedizin (Essen)
 - Der Taucher und der Rausch

8.3. Abstracts

8.3.1. Recreational SCUBA-diving with enriched air nitrox: pulmonary injury?

AK Brebeck¹, T Muth², A Koch³, W Kähler³, C Balestra⁴, A Deussen¹, JD Schipke⁵

¹Institute of Physiology, Technical University Dresden, DE

²Institute of Occupational Medicine and Social Medicine, DE

³German Naval Medical Institute, Kiel-Kronshagen, DE

⁴Environmental & Occupational Physiology Laboratory,

Haute Ecole Paul-Henri Spaak, 1160, Brussels, BE

⁵Research Group Experimental Surgery, University Hospital Düsseldorf, DE

Aim: Hyperoxia can induce pulmonary injury via an increase in oxidative stress. The main objective was to investigate, whether oxygen enriched air (=air28) during diving induces pulmonary injury.

Methods: In a prospective study on 108 volunteers (female: 38) in the Red Sea (SUBEX, El Qusier, ET) static and dynamic pulmonary measures assessed (Jaeger Modern PC-Spirometer, Cardinal Health) before and after almost identical dives (depth: 24±1 m; duration: 62±5 min). 54 volunteers each were randomly allocated to either the air group or the air28 group (pO₂: 28%). As representative measures, we chose: vital capacity (VC), forced expiratory volume in 1 s (FEV1) and peak expiratory flow (PEF).

Results: The pre-dive VC in the entire cohort was 5,0 l, i.e. 8% higher than nominal. Post-dive VC was almost unaltered (all: 98 %; air: 99 %; air28: 98 %). Likewise, dynamic measures were almost unaltered: FEV1: all: 77±7 %; air: 78±7 %; air28: 76±6 % (MD±SD). Pre-dive PEF was slightly above nominal values (+3 %) (all: 8,8±2,2 l/s; air: 8,5±1,8 l/s; air28: 9,1±2,6 l/s), and post-dive PEF was almost unaltered (all: +1 %; air: +5 %; air28: -2 %).

Conclusion: In the relatively large group of SCUBA divers, decompression free dives with either air or air28 at agreeable conditions did not remarkably affect static or dynamic measures of pulmonary function. Limited usage of oxygen enriched air (air28) in decompression free dives within maximum operating depths seems not to be associated with measurable, functional pulmonary changes. Repetitive usage over extended periods might provide different outcomes.

8.3.2. Study for better understanding the effects of O₂-enriched air on bubble formation in recreational divers

AK Brebeck¹, JD Schipke², C Balestra³, and A Deussen¹

¹Institute of Physiology, Technical University Dresden, DE

²Research Group Experimental Surgery, University Hospital Düsseldorf, DE

³Environmental & Occupational Physiology Laboratory, Haute Ecole Henri Spaak, Brussels, BE

Background: The path is narrow between advantages and disadvantages of increased pO₂ and decreased pN₂ in breathing gases. In one hand, enriching air with oxygen will increase the oxidative stress which is considered as imbalance between production and manifestation of ROS and a biological system's ability to readily detoxify the reactive intermediates or to repair the resulting damage (Finne et al. 2008; Obad et al. 2010). On the other hand, increasing the pO₂ will increase the parasympathetic activity (Lund et al. 2000; Kot et al.

2003). The increased pO_2 affects both the CNS (Paul-Bert-Effect; Thalmann 2007) and lungs (Lorrain-Smith-effect; Smith et al. 1899). In turn, reduction of pN_2 will reduce formation of N_2 -bubbles, and thus the emergence of decompression sickness (DCS; Pokan et al. 2004; Boussuges et al. 2009; Vann et al. 2011). In addition, reduction of N_2 will reduce N_2 -narcosis, i.e. it will affect cognition (memory & alertness; Lettnin 1994).

Aim: Better understand the effects of oxygen-enriched air (air28=Nitrox28) on recreational divers. The hypotheses was tested, that bubble formation in air28 divers would be lower than in air divers in an open-water study (single centre, prospective, randomized, double blind (breathing gases), and standardized protocol for all measurements).

Methods: 108 recreational divers of a resort (= SUBEX dive base; El Qusier; ET) were recruited. They were randomized into an air and an air28 group. Dives were performed in the Red Sea with standardized dive profile (≤ 25 m; ~ 60 min). Inclusion criteria: age from 18 to 70 years, no beginners, medical diving fitness. For bubble detection, Doppler measurements were performed on 3 different locations (jugular, subclavian, femoral vein) both 30-45 min and 45-60 min after surfacing.

Results: Demographics. Volunteers from AT, CH, DE. Marital status comprised: singles, unmarried/married couples, divorced. Professions were: students, self-employed, employees, academics, pensioners. 32% were smoker and 68% were non-smoker. Nutritional status: normal (BMI = 18) to adipositas (BMI = 39). From no sports to athletics. 6% volunteers with DCS before onset of this study.

Between the two groups, no differences were found with respect to age, BMI, number of previous dives, active dive years, and maximum depth.

Bubbles. More bubbles were found in the 30-45 min window ($\sim 5\%$; n.s.) for both air and air28. Bubble count much depended on the anatomical site: It was low in the femoral vein (air: 61% and air28: 20%; $p < 0.05$) and high in the jugular vein (air and air28: 100%). Summarized bubble count gave for air: 1656 and for air28: 810 ($p = 0.050$).

Discussion: In 2008, 7.000.000 recreational divers were active worldwide, and 500.000 more are training every year (Levett & Millar 2008). Nitrox is increasingly used by both recreational divers and their dive guides (Gabel & Janoff 1997). Thus, usage of Nitrox may become a problem of quantity.

Reduction of the N_2 proportion is favored, as unwanted bubble trouble and N_2 narcosis could be reduced. However, increase in the O_2 proportion is associated with increased ROS formation affecting the CNS and the pulmonary system. Yet, increased O_2 proportions will likely help to improve cognitive performance and oxygenation of hypoxic/ischemic cells.

In this open-water study on 108 recreational divers quiet, no-compression dives induced bubble formation. Bubble counts depended on the anatomic site with an higher incidence of bubbles in the upper body regions. Most importantly, it was significantly lower in air28 divers compared with air divers.

Conclusion: Under the conditions outlined, air28 helps reducing bubble formation and thus prevents from DCS. In addition, it is expected that the toxic potential of the increased O_2 is low.

8.3.3. Cognitive performance during SCUBA-diving using O_2 -enriched air

AK Brebeck¹, H Schmitz-Pfeiffer², JD Schipke³, A Deussen¹

¹Institute of Physiology, Technical University Dresden, DE

²Institute of Neurologie, Technical University Dresden, DE

³Research Group Experimental Surgery, University Hospital Düsseldorf, DE

Aim: It was investigated, whether O₂-enriched breathing gases would modify memory and/or alertness during scuba diving.

Methods: In a prospective study, 108 (38 females) advanced divers performed in the Red Sea (= SUBEX dive base; El Qusier; ET) a Visualized Learn and Memory Test (VLMT: short delay plus long delay) and a Number Connecting Test (NCT: 1-90) during standardised dives, lasting 62±5 min and leading to a maximum depth of 24±1 m. The blinded volunteers dived in pairs using either air or nitrox28 (=air28).

Results: Number of correctly remembered words for short delay (air: 7.4±1.9; air28: 7.9±2.0) and for long delay (air: 6.4±2.2; air28: 6.8±2.2) differed only slightly. Likewise, the duration to complete the NCT was not different (air: 87.1±30.3; air28: 84.7±26.7). If fouls in this test were taken in account, there was a tendency for better results with air28 (p=0.068). The number of remembered words and the duration to complete the NCT did neither depend on diving experience nor on age.

Conclusion: Reduction of the N₂-portion in the breathing mixture from 78 to 71 % seems not to affect the cognitive performance in advanced divers in convenient water. It is, however, remembered that enriching the breathing air with O₂ increases its toxic potential.

8.3.4. Heart rate during recreational SCUBA-diving

AK Brebeck¹, T Muth², A Koch³, W Kähler³, C Balestra⁴, A Deussen¹, JD Schipke⁵

¹Institute of Physiology, Technical University Dresden, DE

²Institute of Occupational Medicine and Social Medicine, DE

³German Naval Medical Institute, Kiel-Kronshagen, DE

⁴Environmental & Occupational Physiology Laboratory,

Haute Ecole Paul-Henri Spaak, 1160, Brussels, BE

⁵Research Group Experimental Surgery, University Hospital Düsseldorf, DE

Background: Heart rate (HR) during SCUBA diving is modified by a couple of partially opposing factors. Sympathetic activity could be increased via physical and psychological stress. Fluid loss during the 60 min dive could equally increase HR. Immersion increases the intrathoracic blood volume and reduces HR. Submersion as well, will decrease HR via the diving bradycardia as will do hyperoxia.

Aim: SCUBA dives were performed to test the following hypotheses: HR decreases during diving with compressed air / Nitrox. The decrease depends on breathing gas but not on diving experience and gender.

Methods: In a prospective, randomized study in the Red Sea (SUBEX, El Qusier, ET), HR in 108 (female: 38) volunteers was assessed during standardized dives. One of the blinded divers used air and the other air28=Nitrox28. The dive duration was divided in 10 equidistant periods, and HR was averaged within each of these.

Results: The 54 dives lasted on average 62±5 min (MD±SD) leading to a maximum depth of 24±1 m. HR for the entire cohort equalled 98±14 /min at dive begin and 79±10 /min at end of dive. The average HR decrease did neither depend on the breathing gas (air: 97±16 vs 80±12 /min; air28: 100±12 vs 78±9 /min), nor on the diving experience nor on the gender (air: 98±14 vs 79±10 /min, air28: 99±14 vs 81±10 /min).

Conclusion: Extended, calm dives with agreeable conditions decreased HR in this study by about 20 %. These decreases did not depend on breathing gases, diving experience or gender.

8.4. Veröffentlichungen

Routledge Handbook of Ergonomics in Sport and Exercise; Chapter 7; p. 71-91

Environmental factors for fatigue and injury in breath hold / SCUBA diving

Jochen D. Schipke¹, Lucia Donath², Anne-Kathrin Brebeck³ and Sinclair Cleveland⁴

¹ University Hospital Duesseldorf, Duesseldorf,

² Heinrich-Heine-University, Duesseldorf,

³ Carl-Gustav-Carus University, Dresden,

⁴ Heinrich-Heine-University, Duesseldorf

8.5. Beiträge in Zeitschriften

Caisson; Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin 28.Jg. Juni 2013, Nr. 2

Kommentar zu:

Cabrera MP, Chihuilaf RH. *Antioxidants and the integrity of ocular tissues*. Vet Med Int. 2011; 2011: 905153.

Kommentar zu:

Nachman-Clewner M, Giblin FJ, Dorey CK, Blanks RH, Dang L, Dougherty CJ, Blanks JC. *Selective degeneration of central photoreceptors after Hyperbaric Oxygen in normal and metallothionein-knockout mice*. Invest Ophthalmol Vis Sci. Jul 2008; 49(7): 3207–3215.

Caisson; Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin 29.Jg. April 2014, Nr. 1

Kommentar zu:

Malik A, Golnik K. *Hyperbaric Oxygen Therapy in the Treatment of Radiation Optic Neuropathy*. Journal of Neuro-Ophthalmology 2012;32:128–131

8.6. Danksagung

Für die Formung dieses komplexen Dissertations- Themas, Beratung und Betreuung danke ich recht herzlich Herrn Prof. A. Deußen, Institut für Physiologie, TU Dresden und Herrn Prof. JD. Schipke, Forschungsgruppe Experimentelle Chirurgie, Universitätsklinikum Düsseldorf.

Desweiteren möchte ich Johann Vifian danken, dem Chef der SUBEX-Tauchbasen, Entwickler von „THE ART OF DIVING“ und dem Atemgemisch air28, welcher die Rahmenbedingungen stellte und mir die Untersuchungen an seiner Tauchbasis in Ägypten in El Qusier ermöglichte. Zusätzlicher Dank geht damit auch an das SUBEX-Team und das Team des Red Sea Environmental Center.

Ebenso möchte ich mich für die Unterstützung durch das Schifffahrts-Medizinischen- Institutes in Kronshagen, Institut für Physiologie Universität Kiel von PD Dr. A. Koch und Dr. W. Kähler bedanken.

Desweiteren möchte ich mich für die Bereitstellung folgender Geräte bei verschiedenen Unterstützern bedanken: So möchte ich Frau Ursula Wolfsberger (Johnson outdoors Team) für den Galileo Sol der Firma Uwatec danken. Professor T. Balestra für den Hadeco ES-1000SPII und Prof. A. Deußen für das Jaeger MasterScope TP-Spirometer der Fa. CareFusion.

Desweiteren danke ich recht herzlich Dr. H. Schmitz-Peiffer, Institut für Neuropsychologie, TU Dresden, für die Hilfe bei der Auswahl der beiden kognitiven Tests aus einer Vielzahl nicht Unterwasser realisierbarer Test.

Für die freundliche und kompetente Beratung bei der statistischen Auswertung möchte ich Frau Dipl.-Math. U. Range, Institut für Medizinische Informatik und Biometrie (IMB), TU Dresden, danken.

Zudem möchte ich mich bei allen Tauchern für die angenehme und kooperative Unterstützung bei der Durchführung der Tauchgänge und verschiedenen Untersuchungen bedanken.

Last but not least gilt mein herzlicher Dank meinen Eltern für die liebevolle und moralische Unterstützung und Motivation.