

Aus der Medizinischen Klinik mit Schwerpunkt für Infektiologie und
Pneumologie
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Auswirkungen von Sauerstoff-angereichertem Atemgas auf
Sporttaucher

- eine Feldstudie -

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

André Zenske

.....

aus Langen

Datum der Promotion: 25. Juni 2017

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Abstrakt	5
2. Einleitung	8
2.1 Einfluss hoher Sauerstoffpartialdrücke auf die Atemwege	8
2.2 Endothelfunktion beim Tauchen mit Nitrox	11
2.3 Mikroblasenbildung bei Tauchgängen	12
2.4 Stickstoffnarkose bei Tauchgängen mit Nitrox	15
2.5 Einfluss hoher Sauerstoffpartialdrücke auf das vegetative Nervensystem	16
2.6 Fragestellungen	17
3. Methodik	18
3.1 Probanden, Ein- und Ausschlusskriterien	18
3.2 Tauchgänge	19
3.2.1 Ausrüstung	19
3.2.2 Atemgase	19
3.2.3 Ablauf der Tauchgänge	20
3.2.4 Tauchgewässer	24
3.3 Untersuchungsraum	26
3.4 Lungenfunktion	28
3.5 Endothelfunktion	30
3.6 Stickstoffblasen	34
3.7 Kognitive Kompetenz	37

3.7.1 Merkfähigkeit	37
3.7.2 Konzentrationsfähigkeit	39
3.8 vegetatives Nervensystem/Herzfrequenzvariabilität	41
3.9 Statistik	45
4. Ergebnisse	46
4.1 Lungenfunktion	46
4.1.1 Spirometrie	46
4.1.2 Oszillometrie	49
4.2. Endothelfunktion	51
4.2.1 Maximaler Fluss	51
4.2.2 Ausgleichende Mehrdurchblutung	53
4.2.3 Reaktive Hyperämie	54
4.3 Stickstoffblasen	54
4.4 Kognitive Kompetenz	56
4.4.1 Merkfähigkeit	57
4.4.2 Konzentrationsfähigkeit	57
4.5 vegetatives Nervensystem/Herzfrequenzvariabilität	58
5. Diskussion	61
6. Literatur	78

7. Eidesstattliche Versicherung	89
8. Danksagung	90
9. Kongressbeiträge	91
9.1 Mainz	
9.2 Wiesbaden	
9.2 Genf	
10. Finanzielle Unterstützung	91
GTÜM	
11. Lebenslauf	92

Abstrakt

Einleitung

Das Sporttauchen ist eine beliebte Freizeitbeschäftigung mit stetig steigender Teilnehmerzahl. Laut Tauchsportindustrieverband gibt es z. Z. in Deutschland ca. 406.000 Sporttaucher.

Immer häufiger wird neben Druckluft auch Nitrox genutzt. Bei diesem Gasgemisch ist der Sauerstoffanteil höher als 21 %. Bisher wurde nicht detailliert untersucht, ob dieser erhöhte Sauerstoffanteil einem gesunden Taucher im Rahmen konservativer Sporttauchgänge schaden kann.

Methodik

An dieser Studie nahmen 25 erfahrene Taucher teil. Sie absolvierten im Walchensee zwei Tauchgänge, je einen mit Druckluft und einen mit Nitrox40 auf jeweils 25 m Tiefe und mit einer Grundzeit von 25 min. Vor den Tauchgängen wurde die Elastizität der Unterarmgefäße mittels Fluss-vermittelter Dilatation (FMD) bestimmt und eine Lungenfunktionsmessung mit Hilfe der Spirometrie und Oszillometrie durchgeführt. Ein Brustwand-EKG wurde abgeleitet, um über die Herzfrequenzvariabilität (HRV) Änderungen des autonomen Nervensystems zu erfassen. Während der Tauchgänge wurden Aufmerksamkeits- und Merkfähigkeitstests durchgeführt. Nach den Tauchgängen wurden die Elastizität der Gefäße und die Lungenfunktion erneut erfasst. Zu den Zeitpunkten 30, 60 und 90 min nach Tauchgangsende wurde mittels Doppler-Sonographie die Anzahl der Mikroblasen in der V. jugularis interna bestimmt.

Ergebnisse

In der herkömmlichen Spirometrie zeigten sich nur geringe Unterschiede zwischen Nitrox40 und Druckluft. Die forcierte Einsekundenkapazität (FEV_1) war in der Nitrox-Gruppe gegenüber der Druckluft-Gruppe nicht signifikant vermindert. Der expiratorische

Spitzenfluss (PEF) war nach Nitrox-Atmung geringfügig niedriger als nach Druckluft. In der Oszillometrie hingegen zeigte sich eine Zunahme der peripheren Widerstände nach Nitrox-Atmung von durchschnittlich 9 %. Die Reactance nahm nach Nitrox-Atmung um durchschnittlich 11 % ab. Die Elastizitätsmessungen der Unterarmgefäße zeigten nach Druckluft-Tauchgängen eine geringfügige Zunahme des Spitzenflusses um 4,4 %. Nach Nitrox-Tauchgängen war die Gefäßelastizität deutlich reduziert. Der Spitzenfluss war um durchschnittlich 21,2 % vermindert und die Zeit bis zum maximalen Fluss war verlängert. Die Doppler-Sonographie zeigte sowohl nach Druckluft-, als auch nach Nitrox-Tauchgängen Mikroblasen in der Vena jugularis interna. Die Anzahl dieser Stickstoffblasen war nach Nitrox-Tauchgängen um 39 % reduziert. Sowohl der Konzentrations- als auch der Merkfähigkeitstest ergaben deutliche Unterschiede zu Gunsten von Nitrox. Die Merkfähigkeit war bei Nitrox-Tauchgängen um 34 % besser als bei Druckluft-Tauchgängen, die Konzentrationsfähigkeit war um 8,8 % besser erhalten. Die HRV hatte am Ende des Tauchganges gegenüber dem Anfang zugenommen. Eine Abnahme der Herzfrequenz lässt sich durch eine Aktivierung des Parasympathikus erklären, der bei der Nitrox-Gruppe stärker ausgeprägt war.

Zusammenfassung/Schlussfolgerung

Die vorliegende Studie weist Vor- und Nachteile bei der Verwendung von Nitrox nach. Zu den Nachteilen zählen eine Zunahme der peripheren Atemwegswiderstände und eine Abnahme der Gefäßelastizität. Als Vorteile zeigen sich eine deutlich verminderte Mikroblasenanzahl, eine besser erhaltene Konzentrations- und Merkfähigkeit und eine erhöhte Parasympathikus-Aktivität. Nitrox erweist sich unter den beschriebenen Bedingungen als ein zweiseitiges Schwert.

Introduction

Sport diving is a popular leisure activity with an increasing number of participants. According to the German diving industries there are more than 406.000 recreational divers even in Germany. Nitrox is a more and more frequently used alternative breathing gas mixture with more than 21 % oxygen. So far there were no detailed investigations with recreational divers whether this increased oxygen content can lead to injuries during conservative sport dives in healthy divers.

Methods

During this study 25 divers undertook two identical dives, one with compressed air and the other with nitrox40 to a depth of 25 m with a bottom time of 25 min. Before and after diving the elasticity of forearm vessels was tested by flow-mediated-dilatation, lung function was investigated by spirometry and oscillometry, micro bubbles were detected by Doppler ultrasound in the vena jugularis interna at 30, 60 and 90 min after surfacing. During the dives an ECG was taken to investigate the heart rate variability (HRV) and a nitrogen narcosis test was performed.

Results

Diving with nitrox40 lead to an increased peripheral pulmonary resistance of 9 %, the reactance decreased about 11 %. The elasticity of the forearm vessels increased 4,4 % after compressed air diving and decreased 21 % after nitrox. Breathing nitrox lead to a reduction of the number of micro bubbles of 39 %. Using nitrox improved memory (34 %) and alertness (8,8 %). The HRV increased during the dive. The decreasing heart frequency shows a stronger activation of the parasympathetic nervous system during nitrox40 diving.

Conclusion

This study shows both advantages and disadvantages using nitrox40. As disadvantages we can see the increasing peripheral pulmonary resistance und the decreasing elasticity of blood vessels. Advantages are the significantly reduced number of micro bubbles, a better received memory and alertness and the increased activity of the parasympathetic nervous system. Nitrox appears as a double-edged sword.

2. Einleitung

Das Sporttauchen ist eine beliebte Freizeitbeschäftigung mit stetig steigender Teilnehmerzahl. Laut Tauchsportindustrieverband gibt es allein in Deutschland ca. 406.000 Sporttaucher¹.

Dazu kommt eine nicht unerhebliche Anzahl von professionellen Berufstauchern, Militäртаuchern und semiprofessionellen Rettungs- und Einsatztauchern der Feuerwehr, des THW und von Hilfsorganisationen, wie Wasserwacht oder DLRG.

Seit ca. etwa 20 Jahren werden im Sporttauchen neben der Druckluft auch alternative Atemgase verwendet. Häufige Verwendung findet Nitrox. Dieses Kunstwort setzt sich aus den Bestandteilen **Nitrogen** und **Oxygen** zusammen. Nitrox ist eine mit Sauerstoff (O₂) angereicherte Atemluft, wobei Sauerstoffanteile zwischen 21 % und 40 % üblich sind. Das Tauchen mit Nitrox erfreut sich zunehmender Beliebtheit, denn es bietet eine Reihe von Vorteilen, wie z.B. eine verlängerte Nullzeit: Taucher können länger in einer Tiefe bleiben, ohne beim Auftauchen Dekompressionsstopps einhalten zu müssen.

Viele Taucher berichten, sich nach Nitrox-Tauchgängen deutlich erholter zu fühlen als nach vergleichbaren Luft-Tauchgängen. Diese Gründe führten zu einem unkritischen Umgang mit diesem alternativen Atemgas. Auf einigen Tauchbasen und Safari-Schiffen wird zum Teil nur noch Nitrox angeboten, Tauchgänge mit Luft sind dort also nicht mehr möglich.

2.1 Einfluss hoher Sauerstoffpartialdrücke auf die Atemwege

Beim Tauchen mit Nitrox werden - in Abhängigkeit von der Anreicherung – Gasgemische mit wesentlich höheren O₂-Konzentrationen geatmet als bei Tauchgängen mit Druckluft. Mit zunehmender Tauchtiefe steigt der Druck an. Nach dem Gesetz von Dalton erhöhen sich dadurch auch die Partialdrücke der Atemgase². Bei einem Tauchgang auf z. B. 25 m Tiefe mit Luft beträgt der O₂-Partialdruck (pO₂) 0,735 bar, den gleichen Partialdruck würde man unter normobaren Bedingungen durch eine Erhöhung der O₂-Konzentration auf 73,5 % erreichen. Wird nun beim gleichen Tauchgang Nitrox40 – ein Atemgas mit 40

% Sauerstoff - verwendet, so beträgt der pO_2 auf 25 m Tiefe bereits 1,4 bar. Dieser Wert ist unter normobaren Bedingungen nicht zu erreichen.

Seit längerer Zeit ist aus der Intensivmedizin bekannt, dass hohe Sauerstoffkonzentrationen zu Schäden an der Lunge führen. Diese pulmonale Sauerstofftoxizität wurde auch unter dem Begriff Lorrain-Smith-Effekt bekannt³. Das Ausmaß der Schädigung ist abhängig von der O_2 -Konzentration, also dem pO_2 und der Einwirkzeit⁴.

Bei hohem, oxidativen Stress entstehen in den Mitochondrien vermehrt reaktive Sauerstoff-Spezies (ROS). Diese verursachen neben einem interstitiellen Lungenödem auch Schädigungen der Alveolen mit Bildung von Atelektasen⁵. Als Ursache dieser Atelektasen konnte im Tierversuch eine Oxidation des Surfactants nachgewiesen werden⁶. An Mäuselungen kam es nach einer Hyperoxie zu einer Leukozytose, sowie einer deutlichen Erhöhung proinflammatorischer Zytokine⁷.

Unklar ist, inwieweit die Hyperoxie beim Tauchen mit Nitrox zu einer relevanten Lungenschädigung führen kann. Regelmäßig werden von Tauchern pO_2 -Werte von 1,4 bis zu 1,6 bar über zum Teil erhebliche Einwirkzeiten toleriert. Die wenigsten Taucher äußern jedoch Missempfindungen oder Beschwerden nach Nitrox-Tauchgängen. Ganz im Gegenteil fühlen sich die meisten Taucher nach Nitrox-Tauchgängen körperlich fit – ein Umstand, der sehr zur Verbreitung dieses Atemgases beigetragen hat.

Insgesamt existieren zu dieser Fragestellung nur wenige an Freizeittauchern durchgeführte Studien. Viele Ergebnisse stammen von Druckkammerversuchen oder wurden im militärischen Bereich an jungen, gut trainierten Männern durchgeführt^{8,9}.

Bei der Untersuchung der Lunge kann man die zwei wesentlichen Funktionen des Organs testen: die Diffusion der Atemgase und die Ventilation. Van Ooij PJ und Mitarbeiter (2012) postulierten, dass die Diffusionskapazitäten von Stickstoffmonoxid (NO) und Kohlenmonoxid (CO) dann sensitivere Messgrößen als die Vitalkapazität wären, wenn eine Lungenschädigung durch Hyperoxie nachgewiesen werden soll. In ihren Versuchen ließen sie elf Versuchspersonen einen 3-Stunden-Tauchgang bei 1,5 bar absolvieren, bei dem entweder Luft oder 100 %-iger Sauerstoff geatmet wurde. Im Anschluss wurden über einen Zeitraum von 26 Stunden mehrmals die Diffusionskapazität von CO und NO sowie

die Vitalkapazität bestimmt. Die Autoren fanden keine signifikanten Unterschiede¹⁰ zwischen den verwendeten Atemgasen. Diese Studie lieferte also unter den genannten Bedingungen keinen Nachweis für eine pulmonale Sauerstofftoxizität. Weil die Teilnehmer an dieser Studie tatsächlich im Wasser waren, bot diese Studie einen entscheidenden Vorteil gegenüber vielen Untersuchungen, die in der Druckkammer durchgeführt worden waren. Ein Jahr zuvor hatten van Ooij PJ und Kollegen gezeigt, dass der Einfluss hoher O₂-Partialdrücke auf die Lunge der Taucher deutlich ausgeprägter war, wenn die Taucher während Submersion – also unter Wasser – atmeten. Nach 3 Stunden Sauerstoffatmung bei 1,5 bar und Submersion waren sowohl die Diffusionskapazität für CO als auch die Vitalkapazität der Taucher deutlicher reduziert als nach 3 Stunden Sauerstoffatmung im Trockenen bei 1,5 bar Gesamtdruck¹¹.

Neben den Untersuchungen in der Druckkammer gab es auch Studien im Freigewässer. Knapp 50 Taucher absolvierten mit einem O₂-Kreislaufgerät einen einzelnen Tauchgang im flachen Wasser (Pochekutova und Korenbaum 2011). Die spirometrischen Untersuchungen ergaben, dass nach diesen Tauchgängen sowohl die forcierte Einsekundenkapazität als auch die funktionelle Vitalkapazität vermindert waren. Die Abnahmen waren allerdings nur mäßig ausgeprägt, so dass beide Größen noch im Normbereich lagen¹². Fock und Mitarbeiter (2013) untersuchten eine Gruppe von technischen Tauchern, die über acht bis zwölf Tage lange Tauchgänge mit geschlossenen Kreislaufgeräten absolvierten. Dabei erreichten oder überschritten manche Taucher sogar die nach der REPEX Methode (hierbei wird mit Hilfe einer Tabelle, abhängig von pO₂ und Einwirkzeiten, die kumulative „Sauerstoffbelastung“ über mehrere Tage hinweg für den ganzen Körper in sogenannten OTUs - Oxygen Tolerant Units – berechnet) berechnete maximale O₂-Gesamtdosis. In ihren Untersuchungen fanden sie jedoch bei den Tauchern keine Veränderungen der Lungenfunktion¹³.

Bei den genannten Untersuchungen wurden die Versuchspersonen extrem belastet. Ein gewöhnlicher Sporttauchgang findet jedoch nicht in einer Druckkammer statt und dauert normalerweise nicht 180 min sondern zwischen 40 und 60 min. Im Sporttauchbereich wird nicht mit 100 %-igem Sauerstoff getaucht. Eine Überschreitung der O₂-Höchstdosis nach REPEX ist technisch nicht möglich, da hierfür viel größere Atemgasvorräte nötig sind, als sie im Sporttauchen mitgeführt werden. Insofern sind die Ergebnisse aus den genannten Studien interessant, weil sie Hinweise darauf geben können, welchen

Belastungen sich Sporttaucher aussetzen. Die Ergebnisse können aber nicht die Realität des Sporttauchens abbilden. Da die Anzahl der Personen, die Nitrox zum Sporttauchen verwendet, wesentlich höher ist als die der Militäertaucher, besteht hier Forschungsbedarf.

In der vorliegenden Studie wurden Sporttaucher untersucht, die normale Nullzeittauchgänge absolvierten. Die Hypothese lautete: Die Atmung von Nx40 führt zu keiner signifikanten Reduktion der Lungenfunktion im Vergleich zur Atmung von Luft bei einem Sporttauchgang innerhalb der Nullzeitgrenze auf 25 m Tiefe.

2.2 Endothelfunktion beim Tauchen mit Nitrox

Mit zunehmender Tauchtiefe steigt der Umgebungsdruck. Nach dem Gesetz von Dalton erhöhen sich dadurch auch die Partialdrücke der Atemgase. Bei einer Tauchtiefe von 40 m beträgt der pO_2 1,045 bar, wenn Druckluft geatmet wird. Dieser Wert entspricht etwa einem pO_2 bei Atmung von 100 %-igem Sauerstoff an der Wasseroberfläche.

Seit langem ist bekannt, dass hohe pO_2 -Werte das Blutgefäßsystem des Menschen schädigen können¹⁴. Der hohe pO_2 führt zur vermehrten Bildung reaktiver Sauerstoff-Spezies (ROS). Diese schädigen das Endothel und dort im Speziellen die Mitochondrien, was zu einer verminderten Bioverfügbarkeit des vasodilatierenden Stickstoffmonoxids (NO) führt¹⁵. Bei einer Untersuchung zur Gefäßelastizität wurden zwei Probandengruppen gebildet. Die eine Gruppe atmete Luft bei einem simulierten Tauchgang in einer Druckkammer bei 2,8 bar, die andere Gruppe atmete unter normobaren Bedingungen 60 % Sauerstoff. Damit betrug bei beiden Probandengruppen der pO_2 0,6 bar. Die Autoren beschrieben bei der Druckkammer-Gruppe eine signifikante Reduktion der Fluss-vermittelten-Dilatation (FMD) und zeigten so, dass ein einzelner Tauchgang mit Luft zu einer Verminderung der endothelialen Funktion führen kann¹⁶.

Bei besonders tiefen Tauchgängen wird häufig Trimix als Atemgas verwendet, welches aus Sauerstoff, Stickstoff und Helium besteht. Der O_2 -Anteil wird so gewählt, dass der pO_2 auf der angestrebten Tiefe höchstens 1,2 bis 1,4 bar beträgt. Der N_2 -Anteil wird ebenfalls klein gehalten, um eine Beeinträchtigung des Tauchers durch die N_2 -Narkose möglichst auszuschließen. Der Rest des Gemisches besteht aus Helium. Dieses inerte Gas hat eine sehr niedrige narkotische Potenz und lässt sich durch seine geringe Dichte

auch unter hohem Umgebungsdruck leicht atmen. Ein gebräuchliches Gemisch für den Tiefenbereich zwischen 60 und 75 m ist Trimix 15/55. Es besteht aus 15 % O₂, 30 % N₂ und 55 % He¹⁷.

Obad und Kollegen (2010) untersuchten die endotheliale Funktion (A. brachialis) an sieben gesunden Tauchern nach aufeinander folgenden Trimix-Tieftauchgängen auf Tiefen zwischen 55 und 80 m. An jedem Folgetag ergaben sich zunehmend schlechtere Werte für die Gefäßelastizität¹⁸. Marinovic und Kollegen (2012) untersuchten ebenfalls zwei Gruppen von Tauchern. Die eine Gruppe mit zehn Tauchern unternahm drei Tage lang hintereinander Tauchgänge mit Nitrox36 auf 18 m. Die Kontrollgruppe unternahm die gleichen Tauchgänge mit Luft. Die Autoren fanden eine signifikante Reduktion der FMD nach den Nitrox-Tauchgängen¹⁹. Entsprechende Untersuchungen wurden für das Sättigungstauchen angestellt. Dabei handelt es sich um eine besondere Form des Berufstauchens, bei der die Taucher über Tage bis Wochen durchgehend hohen Drücken ausgesetzt sind. Sie leben während ihres Einsatzes in einer Druckkammer unter dem Druck, der auch auf ihrer Arbeitstiefe herrscht. Erst nach Erfüllung ihres Arbeitsauftrages erfolgt die Dekompression, welche mehrere Tage dauern kann. Nach Brubakk und Kollegen (2014) entstehen beim Sättigungstauchen durch die andauernde Hyperoxie vermehrt reaktive Sauerstoff-Spezies (ROS). Diese könnten unter Anderem zu einer endothelialen Dysfunktion führen²⁰.

In den erwähnten Studien wurden Taucher unter Extrembedingungen untersucht: Tieftauchen mit Trimix, Sättigungstauchen oder Druckkammer. Ein Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin zu untersuchen, ob das Gefäßendothel durch einen einzelnen, konservativen Sporttauchgang mit Nx40 im Freigewässer geschädigt wird.

2.3 Mikroblasenbildung bei Tauchgängen

Beim Tauchen mit Drucklufttauchgerät (DTG) wird Luft unter dem jeweiligen Umgebungsdruck geatmet. Pro 10 m Wassertiefe erhöht sich der umgebende Wasserdruck um 1 bar, so dass auf 10 m Tiefe ein Gesamtdruck von 2 bar herrscht. Die Partialdrücke der einzelnen Gase in der Atemluft steigen parallel zum Gesamtdruck an. Ein Taucher, der sich mit einem DTG in 20 m Tiefe aufhält, atmet also Luft (20,9 O₂ und

78 % N₂) mit einem pO₂ von 0,209 x 3,0 bar = 0,627 bar und einem pN₂ von 0,78 x 3,0 bar = 2,34 bar. Nach dem Gesetz von Henry²¹ ist bei gleichbleibender Temperatur und im Sättigungszustand die Menge eines in einer Flüssigkeit gelösten Gases direkt proportional zum Druck dieses Gases über der Flüssigkeit. Daher löst sich während der Kompressions- und Isopressionsphase des Tauchganges mehr Gas im organischen Gewebe als an der Wasseroberfläche. Das Aufsättigen des Körpers geschieht nicht nur druck- sondern auch zeitabhängig.

Der menschliche Körper besteht aus zahlreichen verschiedenen Geweben mit unterschiedlichen Sättigungskinetiken. Um ihr Verhalten bei Änderungen der Umgebungsdrücke zu simulieren, wurden „Kompartimente“ eingeführt, die sich unterschiedlich schnell aufsättigen und mit Halbwertszeiten zwischen 4 min und über 600 min entsättigen. Entsprechend den Eigenschaften exponentieller Funktionen werden alle Kompartimente nach etwa dem Sechsfachen der Halbwertszeit des langsamsten Kompartiments vollständig gesättigt sein. Abb. 1 zeigt mit einem 16 Kompartimente-Modell die Auf- und Entsättigung für einen Druckluft-Tauchgang auf 25 m Tiefe und einer Grundzeit von 25 min.

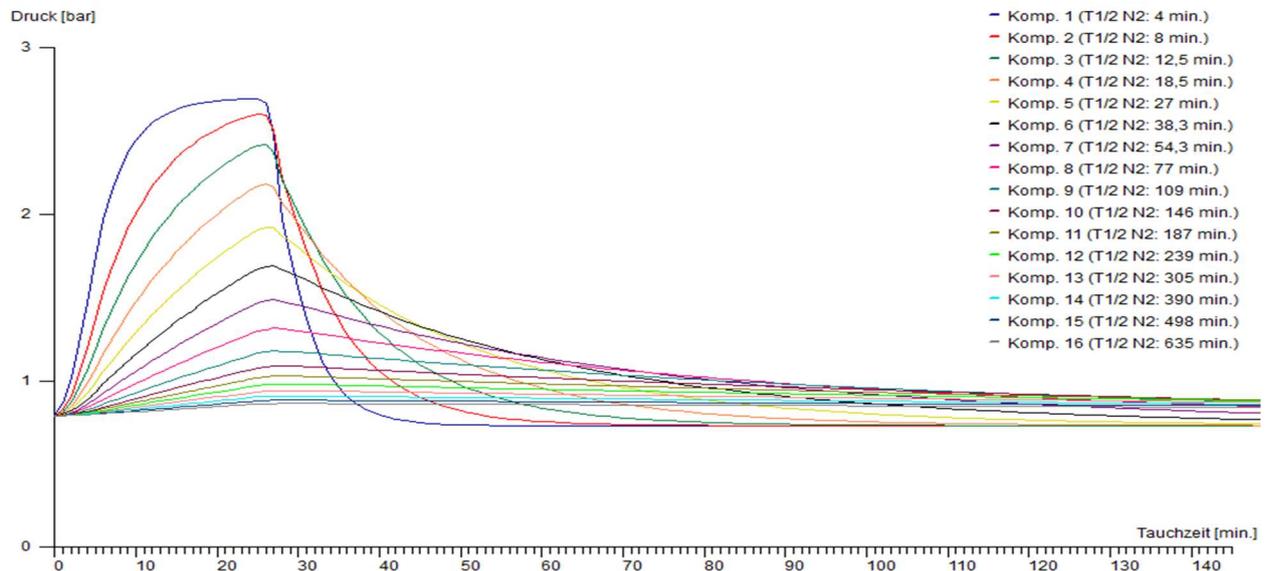


Abb. 1: Auf- und Entsättigung der 16 Kompartimente bei einem 25-m-Tauchgang mit einer Grundzeit von 25 min. Rechts: Halbwertszeiten der einzelnen Kompartimente; Graph erstellt mit Visual Decompression – Version 3.1.0, Peter Rachow, Karlsruhe

Beim Auftauchen verringert sich der Umgebungsdruck und der Partialdruckgradient kehrt sich um, so dass die Partialdrücke in den Geweben des Körpers höher als im Atemgas

sind. Folglich diffundieren die gelösten Gase aus den Geweben ins Blut, gelangen zur Lunge und werden dort abgeatmet. Entscheidend für den Prozess der Auf- und Entsättigung sind die Inertgase, allen voran der Stickstoff. Natürlich sättigen sich die Gewebe auch mit Sauerstoff auf, doch da dieser verstoffwechselt wird, spielt er eine untergeordnete Rolle.

Wird der Umgebungsdruck zu schnell reduziert, dann können langsame Gewebe übersättigt werden. Unter diesen Bedingungen kann es dazu kommen, dass N₂-Moleküle im Gewebe – also auch im Blut – Bläschen bilden. Die entstandenen Gasblasen verstopfen kleinste Gefäße. Zusammen mit der durch sie lokal aktivierten Blutgerinnung können sie zur Dekompressionskrankheit (DCS) führen^{22,23}.

Um das Auftreten der symptomatischen Gasblasen zu verhindern, wurden Tauchtabelle entwickelt, denen man entnehmen kann, ab wann gefahrlos aufgetaucht werden kann (Erstbeschreiber war John Scott Haldane „The Prevention of Compressed Air Disease,” in Journal of Hygiene, 8 (June 1908))²⁴. Bei späteren Untersuchungen wurden aber bei Tauchern mit Hilfe des Doppler-Ultraschall-Verfahrens dennoch kleine Gasblasen im venösen Blut nachgewiesen, obwohl die Taucher nach den aktuellen Sicherheitsregeln und Tabellen aufgetaucht und symptomfrei waren. Man nennt Blasen, die keine Symptome verursachen, Mikroblasen²⁵. Offenbar lassen sich nach allen Tauchgängen – mit Ausnahme von sehr flachen, kurzen Tauchgängen – Mikroblasen im venösen System finden. Da jede Mikroblase beim Auftauchen größer und damit symptomatisch werden kann gilt es, ihre Anzahl und Größe möglichst gering zu halten.

Das Inertgas, welches beim Tauchen mit Druckluft Probleme bereitet, ist der Stickstoff. Eine Reduktion des Stickstoffanteiles im Atemgas wäre daher sinnvoll. Führt man also einen Tauchgang mit Luft und den gleichen mit Nitrox durch, so würde beim Nitrox-Tauchgang weniger Stickstoff in den Körper aufgenommen. Folglich müsste beim Auftauchen weniger Stickstoff abgegeben werden und das Risiko einer Gasblasenbildung reduziert sein.

Tatsächlich zeigte eine Druckkammer - Untersuchung an neun Personen, dass Nitrox mit dafür angepassten Dekompressionsplänen das Risiko einer DCS gegenüber Luft senken kann²⁶. In anderen Druckkammer-Versuchen wurde über die Messung aktivierter Thrombozyten indirekt nachgewiesen, dass bei der Verwendung von Nitrox weniger

Blasen als bei Luft vorhanden waren²³. Auch in einer Studie mit zehn Tauchern, die mit Luft oder Nx36 mehrere Tage hintereinander auf 18 m tauchten wurden bei der Luft-Gruppe signifikant mehr Gasblasen als bei der Nx36-Gruppe gefunden¹⁹. Im Gegensatz zu den vorherigen Studien steht eine Untersuchung, bei der 24 Taucher mit Luft auf 18,0 m Tiefe oder mit Nitrox32 auf 22,5 m Tiefe tauchten. Unter diesen Bedingungen ergab sich für die Anzahl der Blasen kein Unterschied²⁷.

Die Mehrzahl der Studien liefert Ergebnisse, die mit der Vorstellung übereinstimmen, dass die Verminderung der N₂-Belastung – bei Verwendung von Nitrox – zur verminderten Bildung von N₂-Bläschen beiträgt.

Es war ein Ziel dieser Studie zu untersuchen, ob die Verwendung von Nx40 bei Tauchgängen auf 25 m Tiefe mit einer Dauer von insgesamt knapp 40 min in einem Bergsee zu einer signifikanten Reduktion der Mikroblasen gegenüber Luft führt. Dafür unternahmen 25 Taucher den gleichen standardisierten Tauchgang einmal mit Luft und einmal mit Nx40.

2.4 Stickstoffnarkose bei Tauchgängen mit Nitrox

Bereits 1826 wurden von Tauchern, die in größere Tiefen tauchten, merkwürdige Veränderungen ihrer Stimmung oder ihrer Aufmerksamkeit berichtet. 1935 wurde dann von Albert Behnke der Verursacher dieser Symptome entdeckt – der Stickstoff²⁸. Heute ist bekannt, dass ab einer Tauchtiefe von mehr als 30 m ($pN_2 \sim 3,1$ bar) mit dem Auftreten eines Tiefenrausches zu rechnen ist^{28,29,30}. Im englischsprachigen Raum wird dieser Zustand recht dramatisch als „rapture of the deep“ bezeichnet³¹.

Beim Tauchen mit Druckluft ergibt sich nach dem Gesetz von Dalton auf einer Tiefe von 30 m ein pN_2 von 3,12 bar. Ab diesem Partialdruck ist offensichtlich mit Symptomen der N₂-Narkose zu rechnen. Mit zunehmendem pN_2 steigt auch die Schwere der Symptome³², die sehr variabel sein können. Zu ihnen gehören: Euphorie oder Schwierigkeiten, Entscheidungen zu treffen²⁸, verminderte Merkfähigkeit³³ bis hin zum Verlust des Bewusstseins²⁸. Im Gegensatz hierzu berichtet eine Studie über Tauchgänge auf 33 bis 42 m, in der die Taucher mit zunehmender Tiefe bemerkten, wie ihre Merk-

und Entscheidungsfähigkeiten abnehmen³⁴. Das würde bedeuten, dass ihre metakognitiven Fähigkeiten weitgehend erhalten waren.

Der Mechanismus der N₂-Narkose ist noch nicht abschließend bekannt⁹. Im Wesentlichen werden folgende zwei Theorien vertreten. Nach der führenden Theorie diffundiert Stickstoff bei zunehmender Tauchtiefe und damit steigendem pN₂ in die Lipiddoppelschicht der Membranen von Nervenzellen. Dies führt zu einem „Anschwellen“ der Membranen, durch welche die Neurotransmitter nur erschwert diffundieren können^{35,36,37}. Dies beeinträchtigt die Signaltransduktion und führt zu den Symptomen des Tiefenrausches. Nach der zweiten Theorie diffundieren die N₂-Moleküle in die Nervenzellen und verändern durch direkte Interaktion mit Kanalproteinen die Signaltransduktion^{35,38}. Bedenkt man, dass beim Tauchen mit Nitrox der N₂-Anteil zu Gunsten des Sauerstoffes reduziert wird, so führt die Atmung von Nitrox zu einem geringeren pN₂. Ein Beispiel: Bei einer Tauchtiefe von 25 m (Gesamtdruck: 3,5 bar) beträgt der pN₂ bei Luftatmung ca. 2,8 bar. Bei gleicher Tiefe und Verwendung von Nx40 (40 % O₂ und 60 % N₂) beträgt der pN₂ nur 2,1 bar. Somit müsste die Atmung von Nitrox zu einer Reduktion der Intensität der Stickstoffnarkose führen. Hobbs (2014) untersuchte diese Annahme unter Verwendung von Nitrox30 (30 % O₂ und 70 % N₂) und beschrieb etwas überraschend, dass sich die Merkfähigkeit mit zunehmender Tiefe zwar verschlechterte, aber nicht davon abhing, ob die Taucher Luft und Nitrox30 atmeten³³.

Ein weiteres Ziel unserer Studie war es zu untersuchen, ob die Atmung von Nx40 gegenüber Druckluft zu einer signifikanten Reduktion der Stickstoffnarkose führt. Hierzu wurden während gewöhnlicher Sporttauchgänge auf 25 m Tiefe zwei Untersuchungen durchgeführt, um Veränderungen kognitiver Fähigkeiten zu erfassen.

2.5 Einfluss hoher Sauerstoffpartialdrücke auf das vegetative Nervensystem

Bei einem gesunden Herzen lässt sich die genaue Herzfrequenz nicht vorhersagen: Sie ist durch eine Variabilität gekennzeichnet. Diese Herzfrequenz-Variabilität (HRV) ist das Ergebnis einer neuronalen Kontrolle, welche durch das autonome Nervensystem hervorgerufen wird^{73,74,75}. Die Variabilität ist ein wichtiger Mechanismus für die Adaptation und die Flexibilität.

Eine Reihe von kardialen und nicht-kardialen Erkrankungen⁷⁶⁻⁷⁹ ist durch den Verlust einer komplexen Variabilität gekennzeichnet. Entsprechend ergibt sich zunehmend ein periodisches Verhalten. Die physiologische HRV geht z. B. bei Patienten Minuten bis Monate vor dem plötzlichen Herztod verloren^{80,81,82} und eine reduzierte HRV ist ein anerkannter Risiko-Faktor bei Postinfarkt-Patienten^{83,84,85}

Man kann die HRV als das Ergebnis verschiedener physiologischer Störgrößen auf die kardiovaskuläre Balance und dagegen arbeitende Antworten betrachten. Sollte das autonome Nervensystem einen bedeutsamen Einfluss auf die HRV haben^{77,86}, dann sollten Maße der HRV entweder das physiologische Wechselspiel zwischen den regulatorischen Mechanismen des Herzens widerspiegeln⁸⁷ oder klinische Informationen über den Status des autonomen Nervensystems liefern⁸⁸.

Da Submersion und Tauchen mit Gerät psychologischen Stress erzeugen, sollte das sympathische Nervensystem aktiviert werden. Andererseits sollte das parasympathische System über den Tauchreflex aktiviert werden^{89,90}. Eine zusätzliche parasympathische Aktivierung erfolgt offensichtlich über eine Erhöhung des Sauerstoff-Partial-Druckes^{91,92,93}. Daher wird die Hypothese aufgestellt, dass während des Tauchens mit Gerät die HRV durch eine simultane sympathische und parasympathische Aktivierung zunehmen sollte. Die Verwendung eines mit Sauerstoff angereicherten Atemgases – Nitrox40 - sollte im Vergleich zu normaler Atemluft zu einer zusätzlichen parasympathischen Aktivierung führen.

2.6 Fragestellungen

Unter Berücksichtigung der oben genannten Literatur wurden in der vorliegenden Studie folgende Fragestellungen untersucht:

Führt die Atmung von Nx40 gegenüber Luft bei konservativen Sporttauchgängen zu einer

- Veränderung der Lungenfunktion?
- Schädigung des Gefäßendothels?
- Reduktion der Mikrobblasen im Blut der Taucher?
- Reduktion der Stickstoffnarkose?
- erhöhten parasympathischen Aktivität?

3. Methodik

3.1 Probanden: Ein- und Ausschlusskriterien

In der vorliegenden prospektiven, randomisierten Doppelblind-Feldstudie sollte untersucht werden, welchen Einfluss die Atmung von Nx40 gegenüber Luft auf gesunde Taucher hat. Zu diesem Zweck wurde in ausführlichen Vorbefragungen die Zielgruppe für die Versuche ermittelt. Es zeigte sich, dass im vorgesehenen Tauchgewässer hauptsächlich Männer zwischen 18 und 55 Jahren regelmäßig mit Nitrox tauchen.

Folgende Einschlusskriterien wurden festgelegt: Alter zwischen 18 und 55 Jahren, gültige Tauchtauglichkeitsuntersuchung, Ausbildung und abgeschlossene Prüfung mindestens zum CMAS*/VDST*-Taucher, Nitrox-Tauchschein und Taucherfahrung von ≥ 50 Tauchgängen im Kaltwasser. Ausgeschlossen wurden Taucher, bei denen akute Erkrankungen oder Verletzungen einem Tauchgang am Versuchstag entgegenstanden. Ausgeschlossen wurden auch Personen mit einem Tauchgang/einer Überdruckexposition in den letzten 48 h vor den Versuchstauchgängen oder nach Alkoholkonsum vor den Versuchen.

An den Versuchen nahmen schließlich insgesamt 25 erfahrene Taucher teil, drei Frauen und 22 Männer. Allen war der Tauchplatz aus früheren Tauchgängen gut bekannt. Nachfolgende Tab.1 zeigt die biometrischen Daten der Probanden.

Messgröße	Geschlecht	Durchschnitt	Spannweite
Alter (Jahre)	Frauen	35,3	27 - 44
	Männer	39,3	20 - 53
Gewicht (kg)	Frauen	75,3	69,9 - 85,6
	Männer	85,7	70,4 - 120,5
Körpergröße (m)	Frauen	1,68	1,62 - 1,78
	Männer	1,77	1,62 - 1,92
BMI (kg/m ²)	Frauen	26,3	25,5 - 27,0
	Männer	26,8	22,8 - 36,3

Tab.1: Biometrische Daten zu den 25 Versuchsteilnehmern

Die Versuchsteilnehmer verfügten über eine Taucherfahrung von durchschnittlich 677 (Männer) und 880 (Frauen) Tauchgängen.

Die Tauchgänge und geplanten Untersuchungen waren im Vorfeld der Studie vor der Ethik-Kommission der Charité Berlin vorgestellt und durch diese genehmigt worden.

3.2 Tauchgänge

3.2.1 Ausrüstung

Zur Durchführung der Tauchgänge verwendete jeder Proband eine vollständige Tauchausrüstung. Diese bestand aus ABC-Ausrüstung (Maske, Schnorchel, Flossen), Trockentauchanzug mit warmer Unterkleidung, Bleigürtel, Jacket, 15 l Druckluft-, oder Nitroxtauchgerät, Tauchcomputer und zwei unabhängige, kaltwassertaugliche Atemregler. Mit dieser Ausrüstung wurden die allgemein anerkannten Standards für sicheres Tauchen im Kaltwasser erfüllt. Jeder Taucher führte mit insgesamt 3000 bar (=15 l×200 bar) ausreichend Atemgas für die Tauchgänge mit sich - inklusive einer großzügigen Sicherheitsreserve.

3.2.2 Atemgase

Die Tauchgeräte wurden durch den Studienleiter (André Zenske) gestellt und am Abend vor den Tauchgängen im Ausbildungszentrum für Mischgastauchen (Geretsried, BY) (Abb. 2) von zertifiziertem Fachpersonal befüllt und analysiert.



Abb. 2: Das Ausbildungszentrum für Mischgastauchen (Quelle: www.mischgastauchen.de)

Dieses Ausbildungszentrum verfügt über eine mehr als zehnjährige Erfahrung in der Herstellung von verschiedenen Mischgasen, unter anderem also auch von Nitrox mit verschiedenen Sauerstoffanteilen.



Abb. 3: Füllraum des Ausbildungszentrums für Mischgastauchen in Geretsried; links: Atemluftkompressor mit Luftdepot; rechts: Mischanlage mit O₂- und He-Speicherflaschen (Quelle: www.mischgastauchen.de)

Die Kompressoren des Zentrums werden regelmäßig gewartet und die gesamte Füllanlage entspricht den Auflagen der Gewerbeaufsicht. Die Atemluft entspricht gesichert dem aktuellen Standard DIN EN 12021. Damit war sichergestellt, dass die Reinheit der Atemgase hoch war und der O₂-Anteil im Nx40 tatsächlich bei 40 % lag. Zur O₂-Analyse wurde ein Gerät der Marke GOX 100 T (Fa. GHM-Greisinger, Regenstauf, DE) verwendet.

3.2.3 Ablauf der Tauchgänge

Die Taucher sollten unter realen Bedingungen einen Tauchgang im Freigewässer durchführen. Die Tauchgänge entsprachen einem üblichen Sporttauchgang, d. h. sie waren weder ausgesprochen lang, noch besonders tief es handelte sich um Nullzeit-Tauchgänge. Die Tauchgänge erfolgten entweder mit Luft oder mit Nx40, wobei die Zuteilung der Atemgase sowohl für die Probanden, als auch für die Untersuchenden unbekannt war. Nur das Personal an der Kompressoranlage kannte die Zuordnung. Die Zuteilung der Tauchgeräte erfolgte randomisiert. Am Ende der Studie erfolgte die

Auflösung und die Atemgase wurden den Tauchern und anderen Messdaten zugeordnet. Jeder Taucher absolvierte pro Tag einen Tauchgang. Die Oberflächenpause bis zum nächsten Tauchgang betrug ≥ 24 h.

Bei der Planung der Tauchgänge mussten mehrere Faktoren berücksichtigt werden. Da die Tauchgänge auch mit Nx40 durchgeführt werden sollten, spielte die Maximaltiefe eine große Rolle, denn es sollten mögliche toxische Schäden durch einen zu hohen pO_2 vermieden werden. Sowohl der Verband Deutscher Sporttaucher (VDST) als auch die International Association of Nitrox and Technical Divers (IANTD) empfehlen, im kalten Wasser einen pO_2 von 1,4 bar nicht zu überschreiten. Bei einem fiO_2 von 40 % bei Verwendung von Nx40 entspricht dies einer Maximaltiefe von 25 m³⁹.

Zusätzlich musste die maximale Tauchzeit festgelegt werden. Gemäß den im Sporttauchen bekannten Standards für sicheres Tauchen sollten Nullzeit-Tauchgänge durchgeführt werden. Also Tauchgänge, die nicht dekompensationspflichtig sind. Bei dekompensationsfreien Tauchgängen kann der Taucher am Ende der Grundzeit ohne Pausen auf verschiedenen Dekompensationsstufen zur Oberfläche zurückkehren. Zur Bestimmung der Nullzeit oder einer nötigen Dekompensationszeit wurde die Drucklufttabelle aus der BGV C 23 herangezogen. Dies ist die Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit, Unfallverhütungsvorschrift Taucherarbeiten in der Fassung vom 1. Januar 2001. Die darin enthaltene Dekompensationstabelle für Druckluft-Tauchgänge gestattet eine Anpassung an die entsprechende Höhe des Tauchgewässers über N. N.. Nach der Tabelle kann man in einem Höhenbereich von 500 m bis 1000 m - der Walchensee liegt auf 805 m - für eine gewünschte Tiefe von „real“ 25 m die Spalte „30 m Tiefe“ verwenden. Für die Studie wurde eine Grundzeit von 25 min geplant, um nach 5 min Abstieg 20 min in der Tiefe zur Verfügung zu haben. Die Grundzeit betrug damit 25 min. Aus der Tabelle BGV C 23 ergibt sich nach der Höhen-Korrektur eine maximale Dekompensationspflicht von 5 min auf 3 m Tiefe. Diese kurze Pause war auf Grund der Taucherfahrung aller Teilnehmer gut zu tolerieren. Somit standen die Maximaltiefe mit 25 m und die maximale Grundzeit mit 25 min fest.

Die Nullzeit ist bei Verwendung von Nx40 deutlich länger als bei Verwendung von Luft. Rechnet man die BGV C 23 Tabelle auf Nx40 um, dann entspricht eine reale Tauchtiefe von 25 m mit Nx40 einer theoretischen Tauchtiefe von 17 m mit Luft. Die Nullzeit würde

für Nx40 knapp 60 min betragen und wäre somit deutlich länger als die Nullzeit mit Luft auf 25 m. Um vergleichbare Tauchprofile und damit die gleiche Druckexposition zu erhalten, wurden alle Tauchgänge so durchgeführt, als würde Druckluft geatmet.

Die einzelnen Tauchgänge waren wie folgt strukturiert. Maximaltiefe 25 m, Grundzeit 25 min, Abstieg mit 5 m/min auf 25 m, 20 min auf 25 m, danach Aufstieg mit maximal 10 m/min, drei Sicherheitsstopps mit 1 min auf 9 m, 3 min auf 6 m und 5 min auf 3 m. Die Taucher waren also maximal 25 m tief und beendeten nach ca. 39 min ihre Tauchgänge (Abb.4).

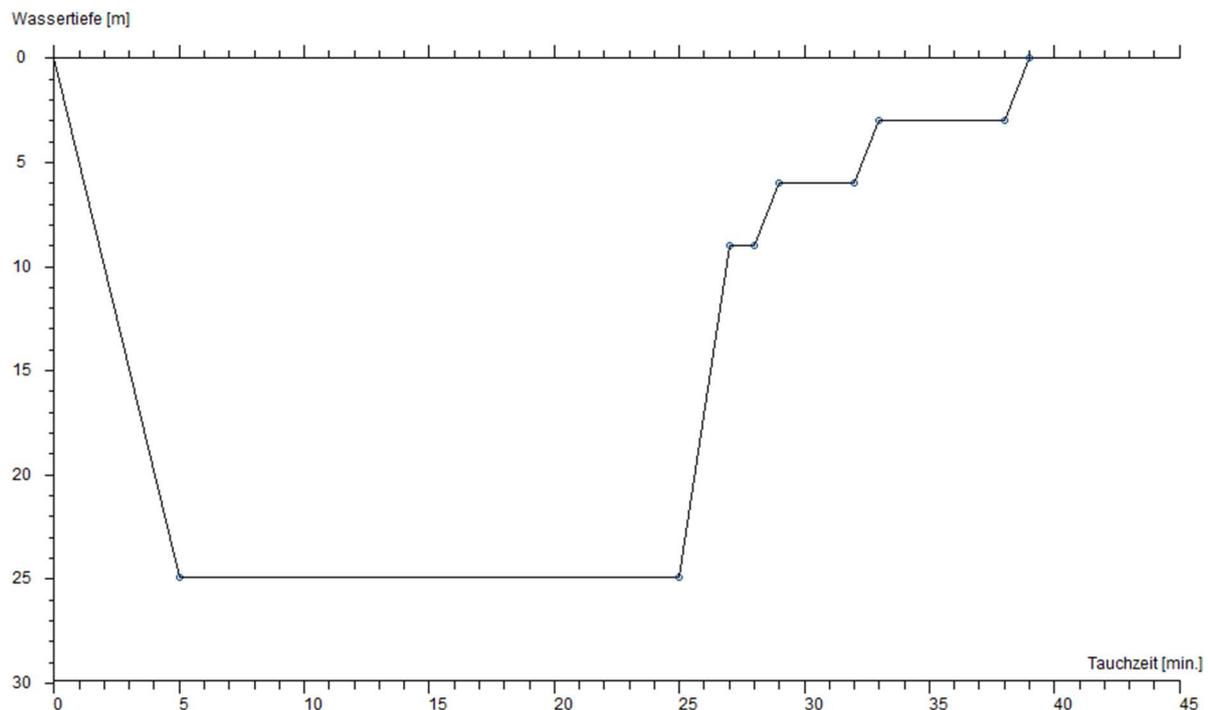


Abb. 4: Der Studientauchgang, 25 m Tiefe und 39 min Tauchzeit, erstellt mit Visual Decompression – Version 3.1.0, Peter Rachow, Karlsruhe

Durch dieses Tauchprofil war sichergestellt, dass die Taucher die letzten 10 m Tiefe sehr langsam auftauchten und somit kein Risiko einer DCS eingingen. Dieses Vorgehen entsprach auch der Realität, denn die meisten Süßwassertaucher verbringen mindestens ein Drittel ihrer Tauchzeit im Flachwasser, da es dort deutlich wärmer als in der Tiefe ist. Die so geplanten Tauchgänge entsprachen ziemlich genau einem gewöhnlichen Sporttauchgang. Alle Taucher führten das gleiche Tauchprofil durch. Dies wurde durch den verantwortlichen Tauchgruppenführer sichergestellt, der jeweils ein erfahrener Tauchlehrer war.

Eine Taucherguppe bestand aus fünf Tauchern: ein Tauchgruppenführer und vier Studienteilnehmer. Der Tauchgruppenführer verwendete für die exakte Einhaltung des Tauchprofils einen Tauchcomputer (OSTC Mk2; Heinrichs Weikamp; Freiburg). Dieses Modell gestattete am Ende des Tauchganges eine Auswertung der Tauchgangsdaten.

Die mit Luft oder Nx40 durchgeführten Tauchgänge wurden genutzt, um mögliche narkotische N₂-Effekte auf kognitive Fähigkeiten zu erfassen. Daher erhielten die Taucher nach Beendigung des 5 min Abstieges und mit Erreichen der Tiefe von 25 m Tafeln (Abb. 5) mit 15 Wörtern. Die Taucher hatten dann 2 min Zeit, um diese zu lesen und sich zu merken.

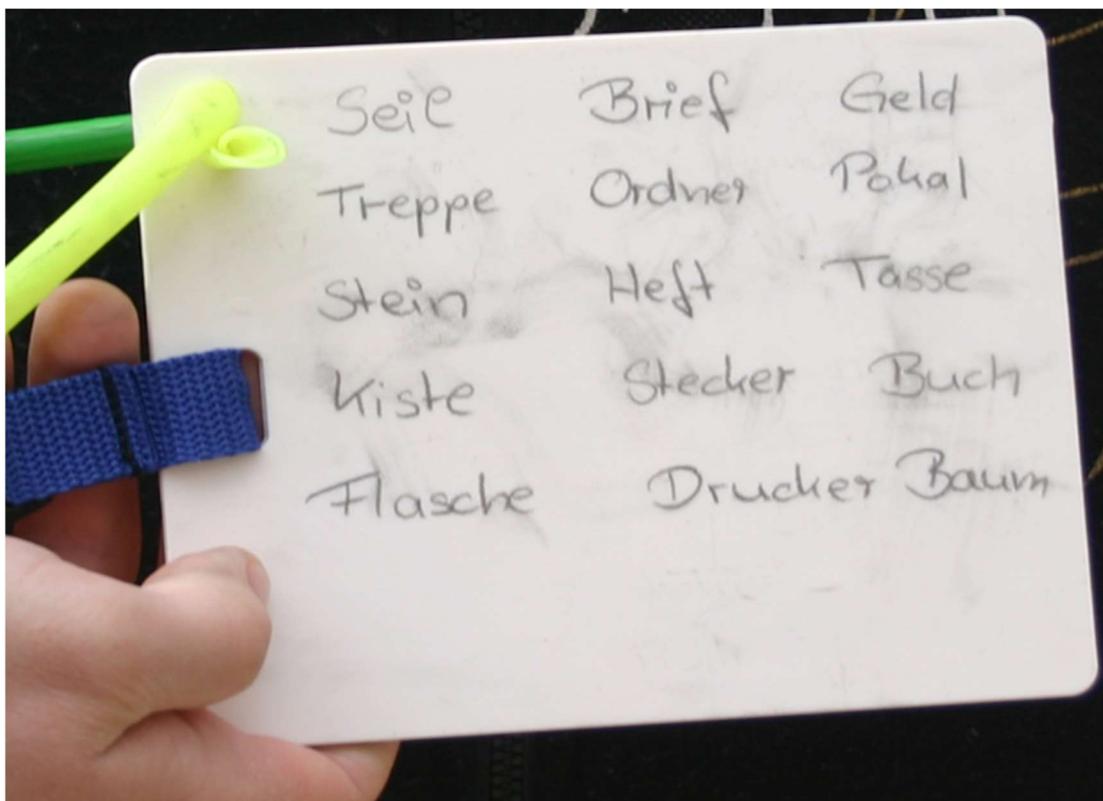


Abb. 5: Schreiftafel mit Wörtern zum Testen der Merkfähigkeit

Die nächsten 7 min galten dem entspannten Tauchen über Grund. Zur Hälfte der Zeit auf 25 m Tiefe erhielten die Taucher andere Schreiftafeln, auf denen sie einen Zahlenverbindungstest (Abb. 6) absolvieren mussten – auch für diesen Test hatten sie 2 min Zeit.

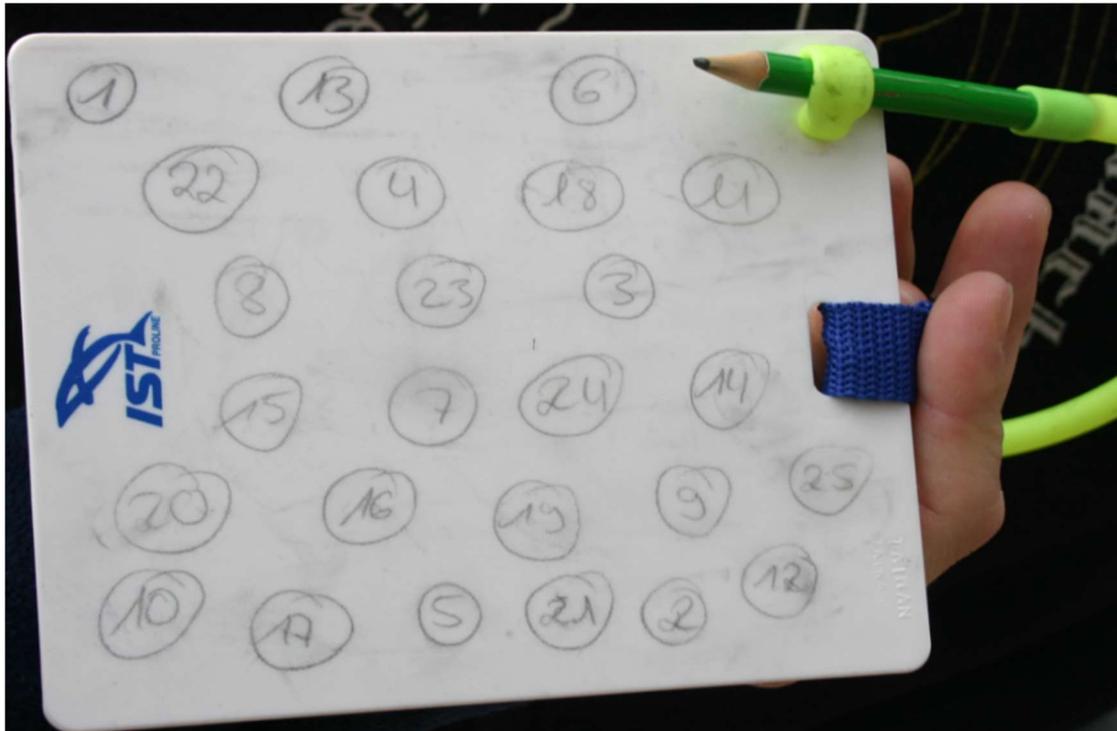


Abb. 6: Schreiftafel mit 25 willkürlich angeordneten Zahlen für den Zahlenverbindungstest

Die folgenden 7 min wurden wiederum zum entspannten Tauchen genutzt und in den letzten Minuten sollten die Probanden diejenigen Wörter auf eine Tafel schreiben, an die sie sich noch erinnern konnten – hierfür hatten sie erneut 2 min Zeit. Bei diesem Studientauchgang wechselten sich – wie bei einem normalen Tauchgang von Sporttauchern - Phasen der leichteren Anstrengung mit denen der Ruhe ab. Der Aufstieg erfolgte nach der beschriebenen Reihenfolge.

3.2.4 Tauchgewässer

Der Walchensee liegt im Bayerischen Voralpenland auf einer Höhe von 805 m über N. N. und gilt nach allen üblichen Tauchtabellen als Bergsee. Sein Wasser besitzt Trinkwasserqualität und ist ausgesprochen klar. Der Walchensee ist während des ganzen Jahres ein beliebtes Tauchgewässer. Die Wassertemperatur betrug während der Studie ca. 10 °C an der Oberfläche und ca. 5 °C auf 25 m Tiefe. Die Außentemperatur betrug je nach den Tauchterminen zwischen - 1 °C und + 12 °C.

Der ausgewählte Tauchplatz trägt den Namen „Galerie dazwischen“. Dieser Name rührt einerseits daher, dass er in der Nähe der bekannten „Galerie“ liegt – ein Tauchplatz mit einer senkrecht in die Tiefen führenden Felswand, der Tauchtiefen von über 100 m ermöglicht. Andererseits rührt der Name daher, dass er sich zwischen zwei Steinschlagtunneln befindet. Der Tauchplatz befindet sich am Westufer des Walchensees und ist durch die unmittelbare Nähe zur B 11 mit der kompletten Tauchausrüstung sehr gut zu erreichen (Abb. 8). Dadurch waren die Wechselzeiten zwischen Tauchplatz und Untersuchungsraum kurz.



Abb. 8: Der Tauchplatz liegt unmittelbar an der B 11 (siehe Markierung), Quelle: <https://www.google.de/maps>

An diesem Tauchplatz gibt es keine Gefahrenquellen, wie z. B. Fischernetze, Strömungen oder Schiffsverkehr. Direkt am Tauchplatz befindet sich ein Parkplatz, der ca. 20 Fahrzeugen Platz bietet. Auf diesem Parkplatz konnten sich die Taucher bequem und sicher umziehen (Abb. 9). Vom Parkplatz aus mussten sie dann über eine Treppe zum Wasser heruntersteigen. Dort waren Ein- und Ausstiegspunkt deutlich sichtbar markiert.



Abb. 7: Parkplatz direkt an der B 11 nur wenige Schritte vom See entfernt. Ein Versuchsteilnehmer kurz vor dem Tauchgang

Ein direkt vom Ufer weg steil abfallender Hang gestattete innerhalb von 5 min auf 25 m abzutauchen. Der Winkel, mit dem der Abhang in die Tiefe führte und die Bodenstruktur ermöglichten es, sich bei möglichen Problemen hin zu knien, ohne weiter in die Tiefe zu rutschen. Der Untergrund bestand aus Felsbrocken, Sand, Geröll und einigen Baumstämmen. Daher war das Risiko gering, die Sicht durch aufgewirbelten Schlamm einzutrüben. Die Taucher hatten somit immer eine optische Referenz, um die geforderte Tiefe sorgfältig einzuhalten. Bei Sichtweiten zwischen 10 m und 15 m konnten die Gruppenführer alle Taucher immer im Blick behalten und bei möglichen Problemen helfen.

3.3 Untersuchungsraum

Die Zentrale für die Versuchsserie bildete das Hotel Karwendelblick (Abb. 9). Es liegt direkt am Walchensee in der Ortschaft Urfeld, Hausnummer 15 (82432 Kochel/Walchensee). Dieses Hotel diente den Helfern, Untersuchern und den Probanden als Unterkunft. Zu dem Hotel gehört auch ein Festsaal (7 m x 12 m), der für die Untersuchungen genutzt werden konnte. Hier wurden sämtliche Untersuchungsgeräte

und Stationen aufgebaut. So entstanden weder für die Helfer noch für die Probanden unnötige Wege oder Zeitverluste.

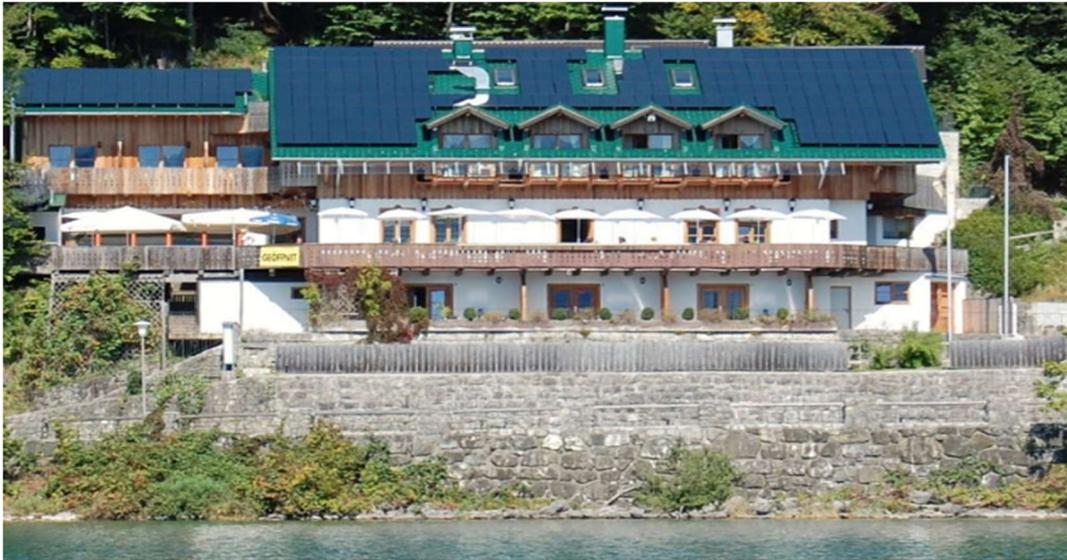


Abb. 9: Hotel Karwendelblick in Urfeld am Walchensee (Quelle: www.hotel-karwendelblick.de)

Der Saal verfügte über eine Fußbodenheizung und gewährleistete auch bei niedrigen Außentemperaturen eine gleichbleibende Temperatur von 22°C. Diese Arbeitstemperatur war nicht nur für die Versuchsteilnehmer angenehm, sondern auch für die einwandfreie Funktion der elektronischen Messgeräte wichtig. Ein weiterer Vorteil dieses Untersuchungsortes bestand in der unmittelbaren Nähe zum Tauchplatz. Somit konnten die Verzögerungen nach Ende des Tauchganges bis zum Untersuchungsbeginn minimiert werden. Man erreicht den Tauchplatz mittels PKW in zwei Minuten Fahrtzeit (Abb.10)

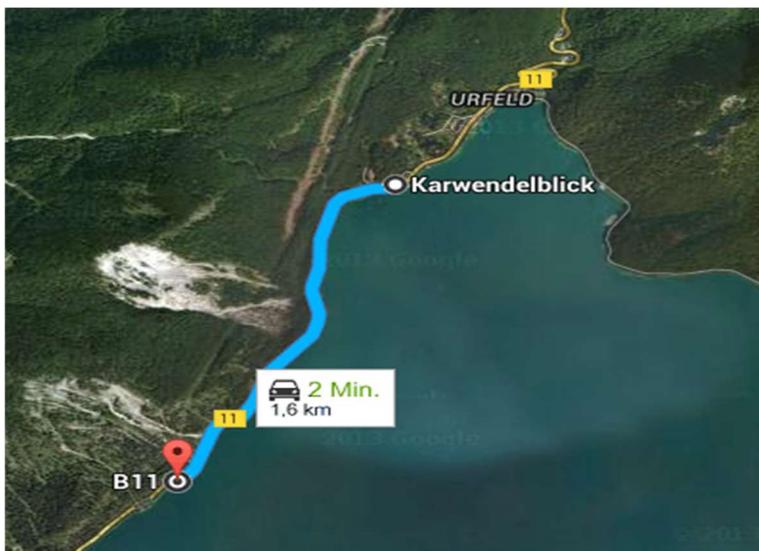


Abb. 10: Lage des Hotels „Karwendelblick“, in welchem die Versuchsteilnehmer untergebracht waren und in dem umfangreiche Messungen vorgenommen wurden. Einen wesentlichen Vorteil bot die kurze Entfernung zwischen Hotel und Tauchplatz (rote Markierung). Quelle: <https://www.google.de/maps>

3.4 Lungenfunktion

Mit diesem Teil der Studie sollte untersucht werden, ob die Atmung von Nx40 gegenüber gewöhnlicher Luft bei sonst identischen Tauchgängen zu messbaren Veränderungen der Lungenfunktion gesunder Taucher führt. Die Lungenfunktion wurde mittels mehrerer Messparameter und mit zwei unterschiedlichen Messmethoden analysiert. Besonderes Augenmerk wurde auf Strömungswiderstände und auf mögliche periphere Obstruktionen gelegt. Diese sind beim Tauchen dann wichtig, wenn ein Taucher beim Auftauchen große Volumina schnell ausatmen muss, um ein Barotrauma der Lunge zu verhindern.

Die Spirometrie ist ein einfach anzuwendendes und etabliertes Messverfahren, sie liefert jedoch nur Aussagen zu Lungenvolumina oder Strömungsgeschwindigkeiten⁴⁰. Die weitere Differenzierung, ob eine gemessene Obstruktion eher zentral oder peripher liegt, ist mit dieser Methode nicht exakt möglich. Mit Hilfe der Spirometrie wurden die Einsekunden-Kapazität (FEV_1), der maximale Fluss (PEF) und die Vitalkapazität (VC) bestimmt (MasterScreen IOS; Fa. Carefusion, Hoechberg, DE).

Zur genaueren Lokalisation von Obstruktionen fand als zweites Verfahren die Impulsoszillometrie (IOS; Abb. 11) Verwendung. Die IOS ist ebenfalls eine nicht-invasive, sensitive Methode, mit der auch geringe Veränderungen in den peripheren Atemwegen, also den kleinen Bronchiolen, frühzeitig diagnostiziert werden können⁴¹. Bei diesem Verfahren werden der normalen Atmung des Probanden oszillierende, multifrequente Schalldruckwellen⁴² überlagert. In Abhängigkeit vom Querschnitt der luftführenden Atemwege werden die Schalldruckwellen unterschiedlich stark und zu unterschiedlichen Zeiten reflektiert.

Mit der Oszillometrie und der entsprechenden Software können verschiedene Parameter gemessen werden. Zu ihnen gehören der R5-Wert (Oszillation bei 5 Hz), der den Widerstand in der peripheren Lunge angibt, der R20-Wert (Oszillation bei 20 Hz), der den Widerstand der proximalen großen Atemwege beschreibt. Der X5-Wert quantifiziert die Reactance^{40,43} der peripheren Lunge. Die Reactance ist abhängig von der Resonanzfrequenz der Lunge und lässt Rückschlüsse auf deren Elastizität zu. Die Reactance bei 5 Hz liefert Informationen über die Dehnbarkeit der Lungenperipherie und ergänzt somit die durch den R5-Wert gewonnenen Informationen.



Abb. 11: Proband bei der Impulsoszillometrie. Die Hände müssen fest auf den Wangen aufliegen, damit diese nicht mitschwingen. Der Messkopf ist in der richtigen Höhe montiert, um dem Probanden eine entspannte Ruheatmung zu ermöglichen. Dieses Messgerät wurde mit Hilfe spezieller Software auch als Spirometer verwendet.

Weil die Frequenz der Schalloszillationen im Vergleich zur Atemfrequenz relativ hoch ist, spielt diese bei der Messung nahezu keine Rolle. Daher ist dieses Verfahren weitgehend unabhängig von der Mitarbeit des Probanden, wie sie bei der Spirometrie erforderlich ist. Der zu untersuchende Proband muss lediglich ruhig und entspannt gleichmäßig ein- und ausatmen. Im Extremfall ist die Messung auch während Apnoe durchführbar. Die Untersuchung ist für den Teilnehmer wenig anstrengend und nicht unangenehm; er verspürt lediglich ein leichtes Klopfen oder Vibrieren in der Lunge.

Versuchsablauf. An jedem Tauchtag erfolgten eine Messung vor dem Tauchgang und eine unmittelbar danach. Durch den kurzen Weg vom Tauchplatz bis zum Untersuchungsraum war sichergestellt, dass die Untersuchung nach dem Tauchgang spätestens 15 bis 20 min nach dem Auftauchen stattfinden konnte. Beide Untersuchungen waren identisch und gestalteten sich folgendermaßen. Das IOS-Messgerät mit welchem später auch die spirometrischen Messungen durchgeführt wurden stand auf einem Tisch vor dem Probanden, der auf einem Stuhl in aufrechter

Haltung mit aufrechtem Hals saß; die Füße standen fest auf dem Boden. Die Höhe des Mundstückes des Messgerätes wurde vor jedem Messmanöver optimal positioniert. Jeder Proband verfügte für jeden Versuch über ein Einmalmundstück mit Bakterienfilter. Zuerst wurde die Oszillometrie durchgeführt. Hierzu wurde die Nase des Probanden ebenfalls mit einer Nasenklammer verschlossen. Der Teilnehmer wurde aufgefordert, das Mundstück fest mit den Lippen zu umschließen, gleichmäßig ruhig ein- und auszuatmen und seine Handflächen auf seine Wangen zu legen. Mit diesem Manöver wurde verhindert, dass die Wangen des Probanden mitschwingen und die Messung verfälschen konnten. Nach einigen ruhigen Atemzügen und Gewöhnung des Probanden an das Gerät wurde die Messung gestartet. Das oszillometrische Messintervall betrug 60 s. Die Daten aus denen sich mittels Software die Messwerte R5, R20 und X5 errechnen ließen, wurden während der Messung auf der Festplatte des Gerätes gespeichert.

Direkt nach der Oszillometrie erfolgte die Spirometrie. Der Proband wurde jetzt aufgefordert, die Hände auf den Oberschenkeln abzulegen. Begonnen wurde der spirometrische Messzyklus ebenfalls mit wenigen ruhigen Atemzügen. Der Proband wurde dann aufgefordert, so tief wie möglich einzuatmen und nach Erreichen der maximalen Inspiration ohne Pause so schnell wie möglich maximal auszuatmen. Beendet wurde dieser Messzyklus durch den erneuten Beginn der Einatmung. Nach diesem Manöver atmete der Proband ruhig weiter. Dieser Messzyklus wurde dreimal hintereinander durchgeführt, auf einem Monitor angezeigt und ebenfalls auf der Festplatte des Gerätes gespeichert. Von den drei aufeinanderfolgenden Messungen wurden jeweils die besten Werten in die Auswertung genommen. Bei Verdacht auf verminderte Mitarbeit wurden die Messungen mit erhöhter Stimulation wiederholt. Bei der Spirometrie wurden die Daten von FEV₁, PEF und Vitalkapazität erfasst.

3.5 Endothelfunktion

In dieser Studie wurde auch der Einfluss von erhöhtem oxidativen Stress auf die Gefäße gesunder Taucher nach gewöhnlichen Sporttauchgängen mit Nx40 untersucht.

Die Messung der Durchblutung wird mit Hilfe einer Laser-Doppler-Technik vorgenommen. Mit diesem Verfahren wird letztlich nicht die Durchblutung, sondern die

Fließgeschwindigkeit gemessen. Bei gleichbleibendem Gefäßquerschnitt sind beide Größen proportional zueinander.

Mit einer Blutdruckmanschette am Oberarm wurde die Durchblutung distal der Manschette für die Dauer von 5 min unterbrochen. Während dieser Zeit akkumulierten im ischämischen Unterarm Metabolite und Kohlendioxid. Nach Ablassen des Druckes aus der Manschette kam es bei maximal weiten Gefäßen zur reaktiven Hyperämie, deren Umfang vom Zustand des Endothels abhängt. Die Endothelfunktion kann in Echtzeit mit Hilfe der flussvermittelten Dilatation (FMD) gemessen werden⁴⁴. Dieses etablierte Messverfahren kam bereits bei mehreren, tauchmedizinischen Studien zur erfolgreichen Anwendung^{16,18,19}. Das Verhältnis der reaktiven Mehrdurchblutung zur präischämischen Durchblutung wird als Maß der endothelialen Funktion herangezogen.

Oxidativer Stress kann in Form von Sauerstoffradikalen die Funktion des Gefäßendothels schädigen²⁰. Würde also ein erhöhter oxidativer Stress zur Schädigung der Endothelfunktion geführt haben, dann wäre die reaktive Hyperämie nach Nx40-Tauchgängen gegenüber Luft-Tauchgängen reduziert.

Zur FMD Messung wurde das Laser-Doppler-Gerät PeriFlux 5000, PF 5010 LDPM Unit (Firma Perimed, Barsinghausen, DE) verwendet. Die Laserdopplersonde, PROBE 457 (ebenfalls Firma Perimed) verfügte über eine integrierte Heizung, welche die Sonde und damit die Haut am Messpunkt auf 40 °C erwärmte. Somit wird eine gleichbleibend gute Durchblutung im Messareal gewährleistet.

Versuchsablauf. Die Probanden unterzogen sich nach einer Ruhepause von 30 min vor den Tauchgängen einer ersten Messung der reaktiven Hyperämie. Zu Beginn der Messung saß der Proband in angenehmer Haltung an einem Tisch, vor ihm war die Messtechnik aufgebaut, neben ihm saß der Untersucher. Für eine exakte Zeiterfassung war eine Stoppuhr am Messplatz vorhanden. Die Messungen wurden an der volaren Unterarmmuskulatur vorgenommen. Die Stelle, an der die Messung durchgeführt werden sollte, wurde sorgfältig ausgewählt und mit einem Kugelschreiberkreis auf der Haut markiert. So konnten die Messungen vor und nach den Tauchgängen jeweils an derselben Stelle durchgeführt werden. Bei der Auswahl des zu untersuchenden Gebietes wurde darauf geachtet, dass die Laser-Doppler-Sonde nicht über sicht- oder tastbaren Gefäßen oder auf stark behaarter Haut positioniert wurde. Die Sonde wurde mittels

Klebeband direkt auf der Haut des Probanden fixiert. Am Oberarm der gleichen Seite wurde eine manuelle Blutdruckmanschette angelegt; sie diente bei der Untersuchung als Blutsperre (Abb. 12).

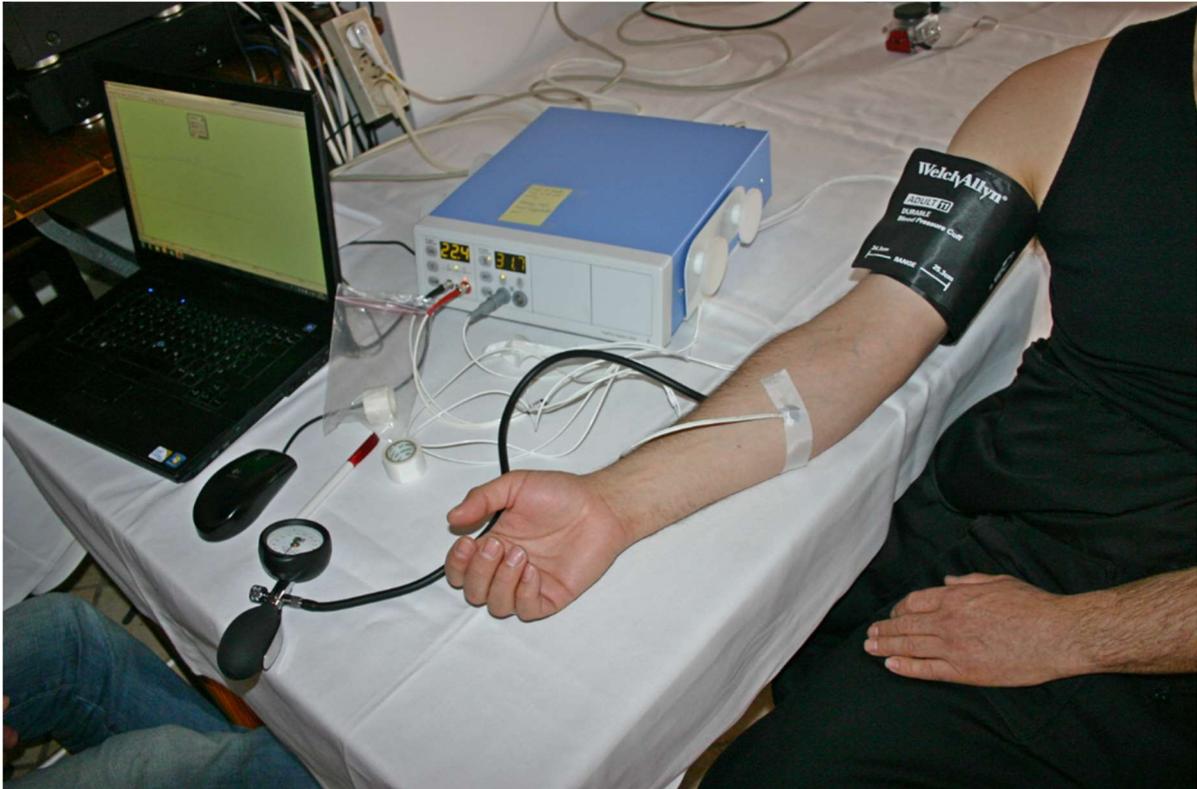


Abb. 12: Die Laser-Doppler-Sonde klebt auf dem Unterarm, die Blutdruckmanschette umschließt den Oberarm, der Proband sitzt entspannt und wartet auf den Beginn der Messung.

Die Probanden wurden ermahnt, völlig ruhig und entspannt zu sitzen, da Bewegungen zu Messartefakten führen konnten. Sobald das Messgerät einen stabilen Durchblutungswert anzeigte, konnte mit der Aufzeichnung der Messwerte begonnen werden. Zunächst wurde mit der Laser-Doppler-Sonde eine Minute lang die Ruhedurchblutung im Unterarm gemessen. Es folgte die Ischämie-Phase. Dafür wurde die Blutdruckmanschette schnell bis zu einem Druck von 220 bis 240 mmHg befüllt und geschlossen, so dass die Durchblutung auf Null zurückging. Dieser Zustand konnte am Monitor beobachtet und während der gesamten Ischämie Zeit kontrolliert werden. Die Ischämiezeit betrug 5 min. Der Arm des Probanden färbte sich zunehmend blau-blass. Diese Untersuchung war zwar unangenehm, wurde aber von allen Probanden gut toleriert. Nach der Ischämie wurde der Druck aus der Blutdruckmanschette abgelassen, und es folgte die Phase der reaktiven Hyperämie. Diese wurde ebenfalls mittels Laser-

Doppler-Sonde erfasst. Sowohl die maximale Durchblutung (peak flow) als auch die Zeit bis zum Erreichen der maximalen Durchblutung wurden erfasst und auf der Festplatte des Messgerätes gespeichert. Nach Ablassen des Druckes aus der Blutdruckmanschette wurde die Durchblutung über weitere 5 min gemessen. Nach dieser Zeit war die Durchblutung weitgehend normalisiert (Abb. 13).

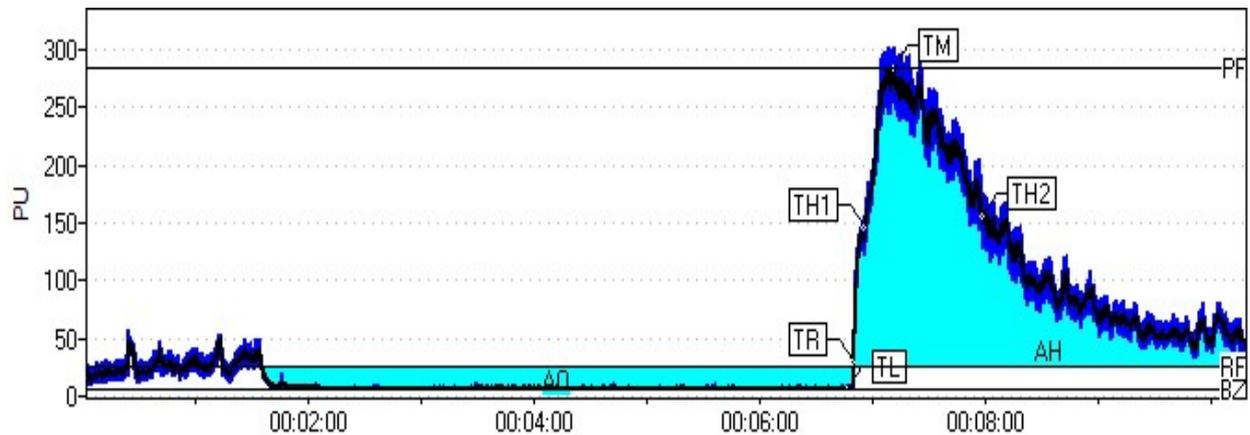


Abb. 13: Typische Flusskurve von links nach rechts: Ruheblutfluss, Ischämiephase und reaktive Hyperämie. Die Markierung „TM“ zeigt den maximalen Spitzenfluss; vom Ende der Ischämiephase bis hier wird die time to PF gemessen. RF steht für Ruheblutfluss und BZ für biologische Nulllinie.

Im Anschluss unternahmen die Probanden den Tauchgang und kehrten danach in den Untersuchungsraum zurück. Es folgten zunächst andere Untersuchungen. Etwa 90 min nach Ende des Tauchganges erfolgte die zweite Messung zur endothelialen Funktion. Durch die lange Wartezeit wurde sichergestellt, dass die Probanden ca. 90 min lang ruhig und entspannt in einem angenehm temperierten Raum saßen. Somit konnte ausgeschlossen werden, dass die Messwerte durch mögliche Fehlerquellen verfälscht wurden. Zu diesen gehören: Vasokonstriktion durch Hypothermie nach dem Tauchgang, Vasodilatation durch körperliche Anstrengung – z. B. durch Tragen der schweren Tauchausrüstung, Vasodilatation nach heißem Duschen, Vasokonstriktion durch Coffein und Nikotin und Vasodilatation durch Alkoholkonsum. Der Ablauf der zweiten Messung der reaktiven Hyperämie war identisch mit dem der ersten Messung. Die Laser-Doppler-Sonde wurde an derselben Stelle (Kugelschreibermarkierung) auf die Haut geklebt, wie bei der ersten Messung

3.6 Stickstoffblasen

In diesem Teil der Studie sollte untersucht werden, ob eine Reduktion des N₂-Anteils im Atemgas zu einer Reduktion der Mikroblasen im Blut der Taucher führt. Hierzu wurde die Anzahl der Mikroblasen nach den Tauchgängen mittels Doppler-Sonographie^{45,25} gemessen. Zur Anwendung kam ein handliches, batteriebetriebenes Gerät (Abb.14), welches sich für den mobilen Einsatz gut eignete (D 900; Huntleigh Healthcare, Kempen, DE). Dieses Gerät war mit einem 4 MHz Schallkopf ausgestattet.



Abb. 14: Doppler-Sonographie-Gerät mit 4 MHz Schallkopf

Mikroblasen wurden in der Vena jugularis interna sinistra Doppler-sonographisch erfasst (Abb. 15). Dieses Gefäß wurde ausgewählt, weil es aufgrund seiner Größe und seines typischen Verlaufs, dorsolateral der A. carotis, leicht zu finden war. Außerdem drainiert die V. jug. int. einen Großteil der zerebralen Durchblutung und bot somit die Möglichkeit, nach Mikroblasen zu suchen, die in diesem empfindlichen Gewebe (ZNS) entstanden waren.



Abb. 15: Lagerung des Probanden während der Mikroblasen-Messung. Der Proband liegt entspannt auf dem Rücken mit leicht zur kontralateralen Seite gewendetem Kopf.

Versuchsablauf. Zur Untersuchung wurden die Probanden liegend mit leicht zur rechten Seite gedrehtem Kopf gelagert. Die Haut am Hals der Probanden wurde großzügig mit Ultraschallgel bedeckt. Die Schallkopfsonde wurde mit einem Winkel von ca. 45° zur Hautoberfläche, parallel zum Verlauf der Vene nach kranial gerichtet, auf den Hals der Probanden aufgesetzt. Nachdem die Vene eindeutig und sicher identifiziert war – dies war aufgrund der Anatomie und des gänzlich anderen Strömungsgeräusches im Vergleich zur direkt benachbarten Arteria carotis gut möglich – begann die Zählung der am Schallkopf vorbei treibenden Mikroblasen. Im pulssynchronen, gleichmäßig wehenden, fauchenden Strömungsgeräusch der Vene ließen sich die Mikroblasen deutlich durch ein lautes, scharfes Knacken oder Glucksen identifizieren. Gelegentlich kam es vor, dass nicht nur einzelne Blasen am Schallkopf vorbeitrieben, sondern ein ganzer Schwall von Blasen. Diese Erscheinungen wurden im Folgenden als Blasenschwall bezeichnet und gesondert gezählt. Die Zählung wurde bei jedem Taucher unter Zuhilfenahme einer Stoppuhr immer 60 s lang durchgeführt und das Ergebnis in einer Tabelle notiert. Diese Untersuchung wurde bei jedem Taucher einmal vor dem Tauchgang durchgeführt, um auszuschließen, dass sich bereits vor dem Tauchgang N₂-Blasen im Organismus befanden. Die Wahrscheinlichkeit war jedoch gering, da die

Teilnehmer zugesichert hatten, unmittelbar vor den Studientauchgängen keine Tauchgänge durchzuführen oder sich einer hyperbaren Umgebung auszusetzen. Da das Auftreten von Mikroblasen nach einem Tauchgang einer gewissen zeitlichen Dynamik unterliegt, erfolgten nacheinander drei Messungen: Die erste begann 30 min, die zweite 60 min und die letzte 90 min nach dem Auftauchen.



Abb. 16: Doppler-Ultraschall-Untersuchung eines Probanden. Er liegt entspannt mit leicht zur kontralateralen Seite rotiertem Kopf. Die innerhalb von 60 s an der Sonde vorbei strömenden Mikroblasen werden sofort notiert.

Jede Probandengruppe bestand aus vier Personen. Da immer nur ein Proband nach dem anderen untersucht werden konnte, fanden die Untersuchungen in folgenden Zeitintervallen statt – 26 bis 34 min, 56 bis 64 min und 86 bis 94 min nach dem Ende des Tauchganges.

Es wurde darauf geachtet, dass die Probanden direkt nach dem Auftauchen ihre Tauchausrüstung ablegten, ins Auto stiegen und zum Untersuchungsraum fahren, um keine Zeit zu verlieren. Die Taucher wurden bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes – bis 120 min nach dem Auftauchen – zur Ruhe ermahnt. Die dreifache Doppler-Untersuchung nach 30, 60 und 90 min wurde sowohl nach den Lufttauchgängen, als auch nach denen mit Nx40 durchgeführt. Da das verwendete Atemgas randomisiert und verblindet zugeordnet wurde, war weder den Tauchern, noch dem Untersucher bekannt, welches Gas geatmet worden war. Die Verblindung wurde erst am Ende der Studie aufgehoben.

Nach keinem der Tauchgänge kam es zu irgendwelchen Zeichen einer DCS. Alle vorsorglich bei jedem Taucher durchgeführten, neurologischen Untersuchungen (5 min Neurocheck, durchgeführt am Ende des Untersuchungszeitraumes) blieben ohne pathologischen Befund.

3.7 Kognitive Kompetenz

In diesem Teil der vorliegenden Studie sollte untersucht werden, ob Nx40 bei Tauchgängen auf 25 m zu einer messbaren Verringerung der N₂-Narkose führt. Die narkotischen Wirkungen des Stickstoffs werden von jedem Taucher anders wahrgenommen, im Extremfall kommt es zum Tiefenrausch. Um mögliche narkotische Auswirkungen zu objektivieren, wurden zwei unterschiedliche kognitive Tests durchgeführt.

3.7.1 Merkfähigkeit

Als eine kognitive Leistung sollte das Erinnerungsvermögen während eines Tauchganges mit Luft oder Nx40 getestet werden. Während eines Sporttauchganges werden normalerweise keine Aufzeichnungen mitgeführt. Der Taucher muss sich aber bestimmte Eckdaten seines Tauchganges merken können. Zu diesen gehören die geplante Tauchtiefe, Zeit, Richtung, markante Orientierungspunkte unter Wasser oder auch der Flaschendruck, bei welchem mit dem Aufstieg begonnen werden soll. Diese

Informationen muss sich der Taucher über die Zeit des Tauchganges merken, also über das Kurzzeitgedächtnis hinaus.

Gebräuchliche Tests zur Beurteilung von Merkfähigkeit und Gedächtnis lassen sich nicht ohne weiteres unter Wasser anwenden: der Proband sitzt nicht entspannt in einem Untersuchungsraum an einem Tisch. Es war ein Test nötig, der auch unter Wasser gut umgesetzt werden konnte. Die besonderen Unterschiede waren: Dunkelheit (in 25 m Tiefe ist es deutlich dunkler als direkt unter der Wasseroberfläche), Kälte (die Taucher trugen dicke Handschuhe, mit denen Geschicklichkeit und Motorik stark eingeschränkt waren) und Schwerelosigkeit (der Test musste freischwebend im Wasser zu absolvieren sein). In Voruntersuchungen stellte sich heraus, dass am effektivsten mit Schreibtafeln gearbeitet werden konnte. Dies sind speziell für den Unterwassergebrauch entwickelte „Notizblöcke“ (siehe Abb. 5 und Abb. 6).

Als Qualität, die sich die Probanden merken musste, wurden einfache Begriffe ausgewählt, da das am ehesten den Anforderungen eines Tauchganges entspricht. Dies zeigt folgendes Beispiel: Ziel des Tauchganges ist das Tauchen an einem Atowrack, am Ein- und Ausstiegspunkt liegt unter Wasser ein großer Baum, beim Erreichen der Tiefe muss man hinter einem Felsen nach rechts abbiegen, um das Wrack zu erreichen. Der Taucher muss sich in diesem Beispiel die Begriffe Atowrack, Baum und Felsen merken, um seinen Tauchgang wie geplant durchzuführen. Daran angelehnt wurden 15 einfache Wörter ausgewählt. Mehr als 15 Begriffe ließen sich nicht auf den Schreibtafeln unterbringen. Bei mehr Wörtern hätte die Schrift so klein sein müssen, dass sie bei der Dunkelheit unter Wasser nicht mehr gut zu lesen gewesen wären.

Versuchsablauf. Im ersten Test sollte die Merkfähigkeit getestet werden. Hierzu bekam jedes Probandenteam nach Erreichen der Tiefe von 25 m jeweils eine Schreibtafel gereicht, auf der 15 zusammenhangslose Wörter standen. Die Probanden hatten 60 s Zeit, diese Begriffe zu lesen und sich zu merken. Danach mussten sie die Schreibtafeln wieder an ihren Gruppenführer abgeben. Am Ende der Grundzeit - 18 min nachdem sie die Schreibtafeln mit den Wörtern abgegeben hatten – hatten die Taucher erneut 60 s Zeit, die erinnerten Wörter aufzuschreiben. Die Wörter wurden auf den persönlichen Schreibtafeln notiert, die jeder Taucher bei sich führte. Sie befanden sich während der gesamten Grundzeit in 25 m Tiefe, d. h. sowohl Lesen und Merken als auch die

Wiedergabe der Begriffe erfolgte in dieser Tiefe (Abb. 17). Nach dem Auftauchen wurden die persönlichen Schreiftafeln eingesammelt und ausgewertet. Einen ähnlichen Versuchsaufbau mit 15 Wörtern verwendet der verbale Lern- und Merkfähigkeitstest (VLMT von Helmstaedter C. et al., Beltz Test GmbH, Göttingen 2001).

Gewertet wurde die Anzahl der richtig erinnerten Wörter. Dieser Test wurde bei beiden Tauchgängen durchgeführt, also einmal mit Luft und einmal mit Nx40. Um einen Lerneffekt zu vermeiden wurden bei beiden Tauchgängen unterschiedliche, aber gleich schwierige Wörter verwendet, z.B. Haus, Auto, Baum, Flugzeug.

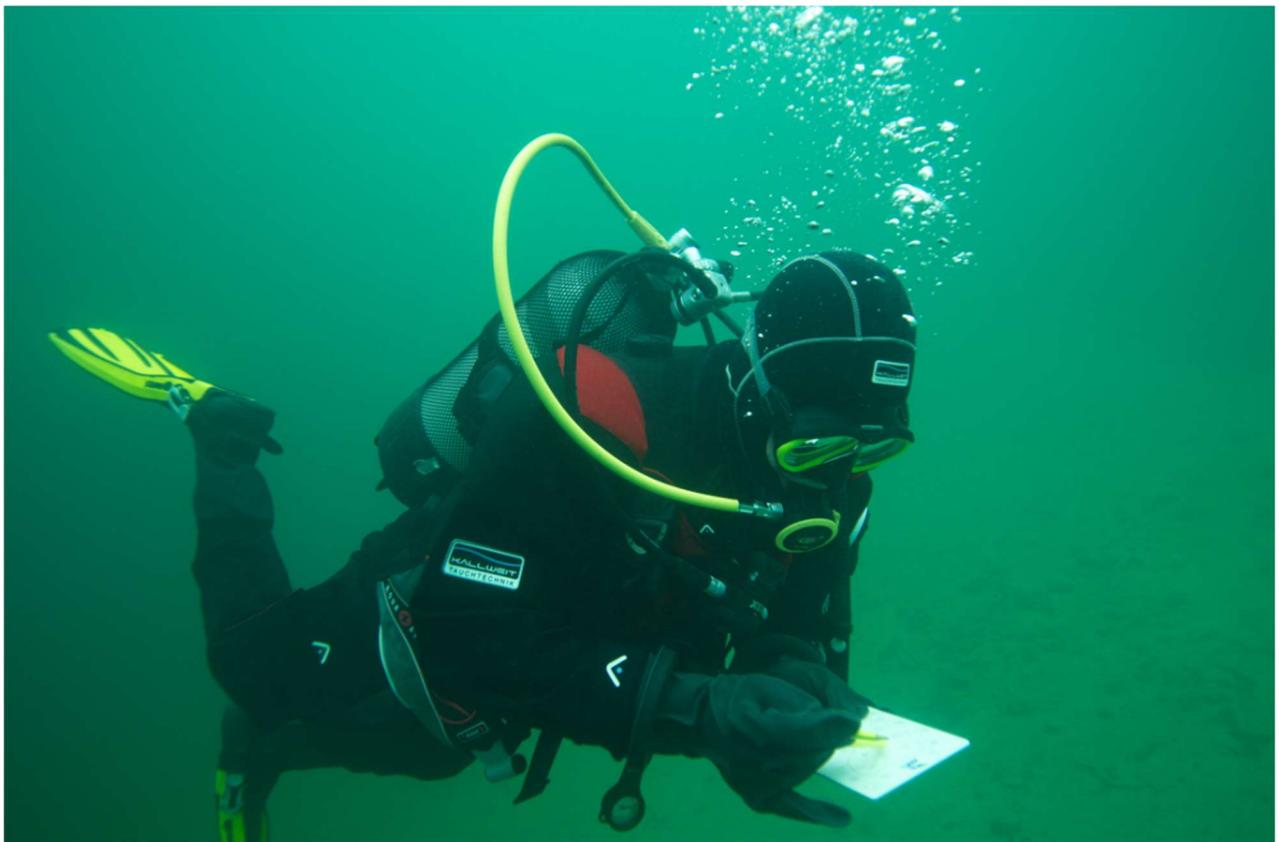


Abb. 17: Proband mit Schreiftafel in 25 m Tiefe. Zwei Tests wurden zur Beurteilung des Einflusses zweier verschiedener Atemgase auf kognitive Fähigkeiten im Walchensee durchgeführt

3.7.2 Konzentrationsfähigkeit

Als zweite kognitive Fähigkeit wurde die Konzentrationsfähigkeit untersucht. Im Sporttauchen ist es üblich, Tauchcomputer zu verwenden. Diese Geräte zeigen dem Taucher alle relevanten Daten seines Tauchganges in Zahlen an. Dazu zählen:

war leer und bot Platz, um die Begriffe zu notieren, an die sich die Taucher am Ende ihrer Grundzeit erinnern konnten.

3.8 vegetatives Nervensystem/Herzfrequenzvariabilität

Vor, während und nach dem Tauchgang wurde ein EKG mit Hilfe eines üblichen tragbaren digitalen Drei-Kanal-Langzeit-Rekorders (Lifecard CF, Spacelabs Healthcare, Feucht, DE) aufgenommen (Abb. 19)



Abb. 19: Eines der kleinen Langzeit-EKG-Geräte mit denen während der Tauchgänge EKGs abgeleitet wurden. Anhand des Zollstockes lässt sich die geringe Größe der Geräte gut erkennen.

Der Rekorder war wasserdicht und druckfest in einem individuell gefertigten Aluminium-Zylinder untergebracht (Abb. 20). Ein Kabel mit einer Länge von ca. 1,5 m führte aus dem zylindrischen Gehäuse heraus. An den drei freien Enden befanden sich Druckknöpfe, die an Klebeelektroden befestigt wurden. Diese wurden ihrerseits vor dem Anlegen der Tauchkleidung auf die Brustwand geklebt (subclaviculär rechts, subclaviculär links und Position V6).



Abb. 20: Vier Probanden mit angelegten EKG-Geräten und der Unterziehkleidung für die Trockentauchanzüge. Die EKG-Geräte wurden in druck- und wasserdichten Gehäusen mit einem Gurt vor dem Bauch der Taucher fixiert und innerhalb des Trockentauchanzuges getragen. Damit waren sämtliche Klebeelektroden, alle Kabel und die Gehäuse im Trockenen und gewährleisteten eine gute Qualität der EKG-Ableitungen.

Für die spätere Auswertung der Herzfrequenz und der HRV wurde kommerzielle Software verwendet (Pathfinder, Spacelabs Healthcare, Feucht, DE) eingesetzt. Dabei wurde das Verhältnis zwischen zwei aufeinanderfolgenden RR-Intervalle berechnet, um supraventrikuläre Extrasystolen und Pausen zu eliminieren. Die Abbildung 21 zeigt Original EKG-Ableitungen während eines Studientauchganges.

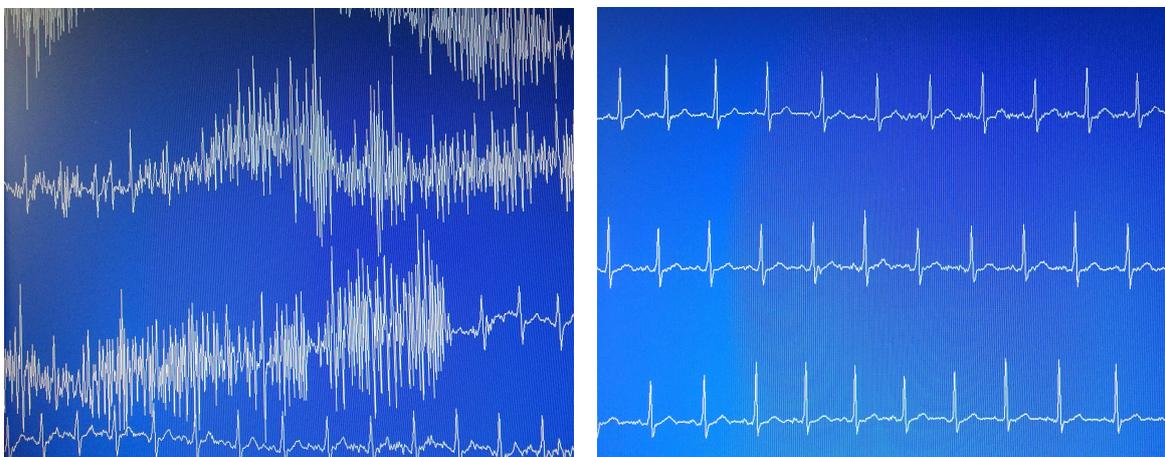


Abb. 21: links kurz vor dem Tauchen, rechts während des Tauchganges.

Die Software ermöglichte, die RR-Intervalle genau auszumessen (Abb. 22).

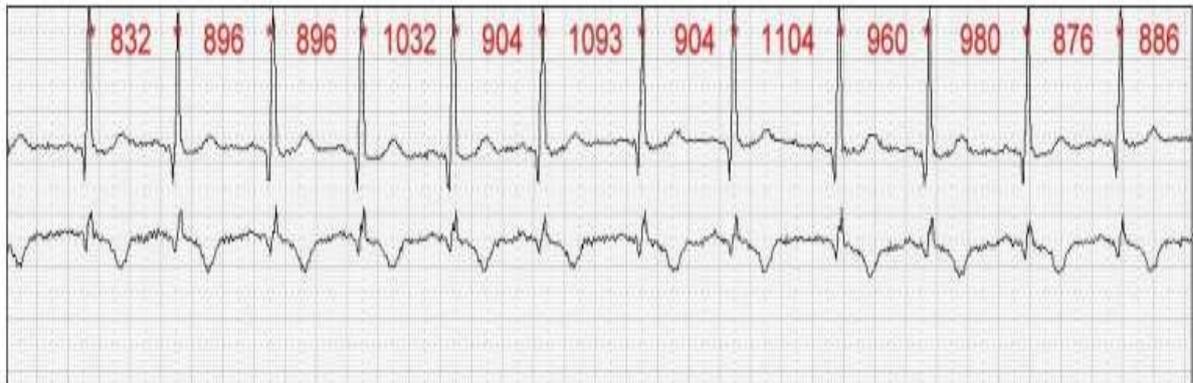


Abb. 22: Die unterschiedlichen RR-Intervalle wurden in Millisekunden (ms) genau ausgemessen.

Die Herzfrequenz-Variabilität (HRV) ist das Ergebnis der neuronalen Kontrolle der spontanen Herzfrequenz. Maße der HRV lassen sich aus den unterschiedlich langen Abständen der R-Zacken des EKG ableiten. In der Abbildung 21 sind diese Abstände eingetragen (Einheit: ms). Werden die aufeinanderfolgenden Abstände als Zeitreihe aufgetragen, erhält man das Tachogramm, Abbildung 23. Starke Schwankungen sprechen für eine hohe Herzfrequenzvariabilität⁹⁴.

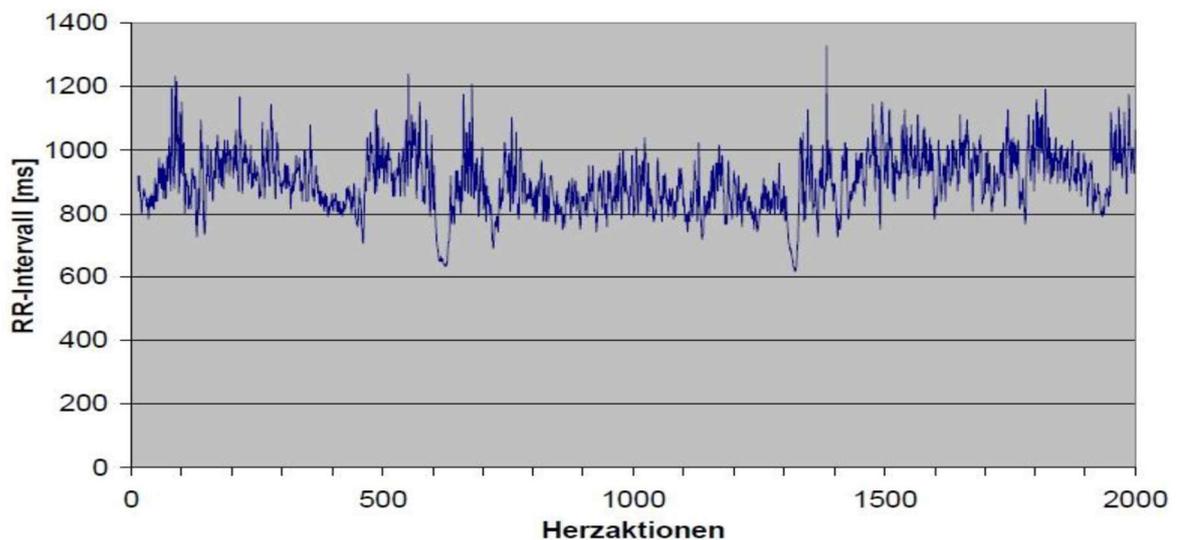


Abb. 23: Die unterschiedlichen RR-Intervalle in Bezug auf die Herzaktionen, das Tachogramm

Um den Einfluss der beiden Atemgase, Druckluft und Nx40, auf das autonome Nervensystem zu vergleichen, wurden die EKGs jeweils 10 min kurz nach Beginn und

kurz vor dem Ende des Tauchganges ausgewertet. Diese Auswertungsdauer lag oberhalb der minimalen Dauer von fünf Minuten, die benötigt wird, um bei der Frequenzanalyse keine Information zu verlieren.

Nach den Vorgaben der Task Force der European Society of Cardiology (1996) wurden drei Maße für den Zeit-Bereich gewählt:

1. Die Standardabweichung der Abstände zwischen normalen RR-Intervallen (SDNN oder SD; [ms]). Dieses Maß spiegelt alle zyklischen Komponenten wider, welche während der Registrierung die Variabilität verursachen⁹⁵. Die SDNN ist ein frequenzunabhängiger Indikator für die Höhe der Gesamtvariabilität (hohe SDNN bedeutet hohe HRV; niedrige SDNN bedeutet niedrige HRV).
2. Die Quadratwurzel des quadratischen Mittelwertes der Summe aller Differenzen sukzessiver RR-Intervalle. (RMSSD; [ms]). Die RMSSD ist ein Parameter der Kurzzeitvariabilität und eignet sich zur Betrachtung des parasympathischen Einflusses. Die RMSSD ist gegenüber Störungen recht sensibel⁹⁶.
3. Der relative Anteil der Differenzen aufeinanderfolgender NN-Intervalle >50 ms, welche auf alle Differenzen innerhalb des Intervalls (pNN50; [%]) normalisiert wurden. Dieses Maß erfasst die Hochfrequenz (HF) Variationen der Herzfrequenz⁹⁵. Ein hoher pNN50-Wert bedeutet hohe spontane Änderungen der Herzfrequenz.

Aus dem Frequenzbereich wurden ebenfalls drei verschiedene Messgrößen ausgewählt⁹⁷⁻¹⁰⁰:

1. Die Low Frequency (LF) Power, also das Leistungsdichte-Spektrum im niedrigen Frequenzbereich (0,04 bis 0,15 Hz). An diesem Bereich ist sowohl der Sympathikus als auch der Parasympathikus beteiligt^{77,79}, wobei der Anteil des Sympathikus überwiegt^{87,101,102}.
2. Die High Frequency (HF) Power, also das Leistungsdichtespektrum im hohen Frequenzbereich (0,15 bis 0,40 Hz). Dieses Maß zeigt ausschließlich den parasympathischen Anteil^{95,103,104}.
3. Der Quotient aus LF und HF entspricht der sympatho-vagalen Balance. Dieses Maß beschreibt das Zusammenspiel von Parasympathikus (HF) und Sympathikus

(LF)⁸⁸. Ist LF/HF größer, dann ist der Sympathikus-Tonus erhöht; ist LF/HF kleiner, dann ist der Parasympathikus-Tonus erhöht.

Die Leistungsdichtespektren im LF- und im HF-Bereich haben die Einheit ms^2 , damit hat ihr Quotient keine Einheit.

3.9 Statistik

Die von den 25 Teilnehmern erhobenen anthropometrischen, die demographischen Daten und die Daten zur Tauchvergangenheit wurden in einer Excel-Tabelle (Microsoft Excel 2010) zusammengefasst. Bei einigen Messungen fielen Daten an, die zunächst manuell erfasst und dann in die Excel-Datei übertragen wurden. Dazu gehörten neben den Maßen der Herzfrequenz-Variabilität die Anzahl der Mikroblasen aus den drei Intervallen, sowie die Anzahl der richtig erinnerten Wörter im Merkfähigkeitstest und der richtig verbundenen Zahlen im Zahlenverbindungstest. Bei den Messungen der Lungenfunktion mit der Spirometrie und der Oszillometrie, sowie der endothelialen Funktion wurden Geräte mit eigenen Computern verwendet, die die Ergebnisse speicherten und teilweise hergeleitete Werte berechneten. Diese Daten wurden ebenfalls in die bestehende Excel-Datei übertragen. Bei diesen Messungen konnten Fehlübertragungen vollkommen ausgeschlossen werden.

Die Auswertung der Daten wurde mit einer 2-Wege-Varianzanalyse (Microsoft Excel 2010) durchgeführt, bei welcher der eine Weg das Atemgas (Luft vs. Nx40) und der zweite Weg der Tauchgang (vorher vs. nachher) war.

Ergebnisse werden als Mittelwerte \pm Standardabweichung angegeben. Unterschiede wurden für $p < 0,05$ als signifikant betrachtet. Die Diagramme wurden ebenfalls mit Microsoft Excel 2010 erstellt.

4. Ergebnisse

Bei der Auswertung der zahlreichen Daten zeigte sich, dass die Datensätze nicht für jeden der fünf untersuchten Aspekte (Lungenfunktion, Endothelfunktion, N₂-Blasenbildung, Kognition, Herzfrequenzvariabilität) vollständig waren. Die Ausfälle waren meistens technisch bedingt (Vereisung eines Atemreglers mit vorzeitigem Abbruch des Tauchganges, zwei abgebrochene Schreibstifte während des N₂-Narkose Tests, nicht auswertbare EKG-Signale, krankheitsbedingter Ausfall eines Probanden vor dem 2. Tauchgang, u.ä.). Daher wird im Folgenden jeweils der Umfang der ausgewerteten Datensätze angegeben.

4.1 Lungenfunktion

Zur Messung der Lungenfunktion unterzogen sich die Probanden zwei Messzyklen, einmal vor dem Tauchgang und einmal nach dem Tauchgang.

4.1.1 Spirometrie

Dabei wurden mittels Spirometrie die Vitalkapazität (VC), der maximale Spitzenfluss (peak flow, PEF), sowie die Ein-Sekunden-Kapazität (FEV₁) bestimmt. Nachdem alle Studienteilnehmer über eine gültige Tauchtauglichkeitsuntersuchung verfügten war nicht zu erwarten, hier größere Abweichungen von den Normwerten zu bestimmen. Interessanterweise erreichten nicht alle Probanden 100 % des Normwertes. Vier Probanden erreichten weniger als 90 % der Norm. Signifikante Änderungen der Vitalkapazitäten traten weder nach Luft noch nach Nx40 auf. Tendenziell war die VC jedoch nach Nx40 gegenüber vor dem Tauchen bei 14 Tauchern reduziert. Bei sechs Tauchern nahm die VC nach dem Tauchen mit Luft allerdings geringfügig zu (Abb. 24). Es konnten die Daten von 21 Probanden ausgewertet werden.

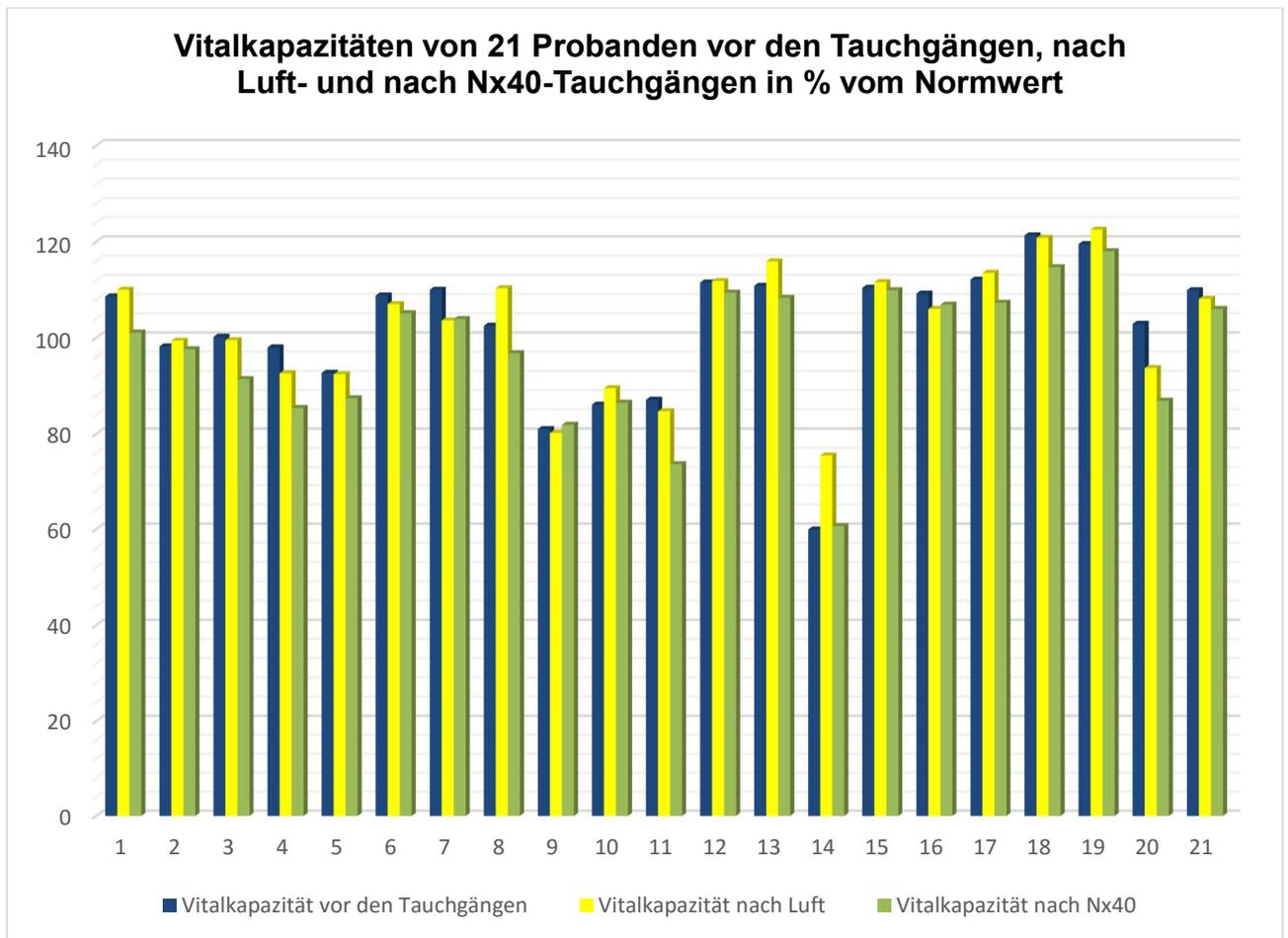


Abb. 24: Vitalkapazitäten vor den Tauchgängen, sowie nach Luft- und Nx40-Tauchgängen

Bei den beiden dynamischen Größen zeigten sich im Mittel keine signifikanten Unterschiede. Insgesamt wurden Daten von 19 Tauchern ausgewertet. Es fiel auf, dass sowohl nach Nx40- aber auch nach Luft-Tauchgängen bei einigen Tauchern PEF (Abb. 20) und FEV₁ (Abb. 21) reduziert waren. Im Mittel betrug der PEF-Wert vor Luft 106 % des Sollwertes (± 27 %), nach Luft-Tauchgängen 110 % und nach Nx40-Tauchgängen 95 %. Die FEV₁-Werte verhielten sich noch stabiler als die PEF-Werte. Die FEV₁-Werte betragen im Mittel vor Luft-Tauchgängen 110 % des Sollwertes (± 17 %), nach Luft-Tauchgängen 108 % und nach Nx40-Tauchgängen 106 %.

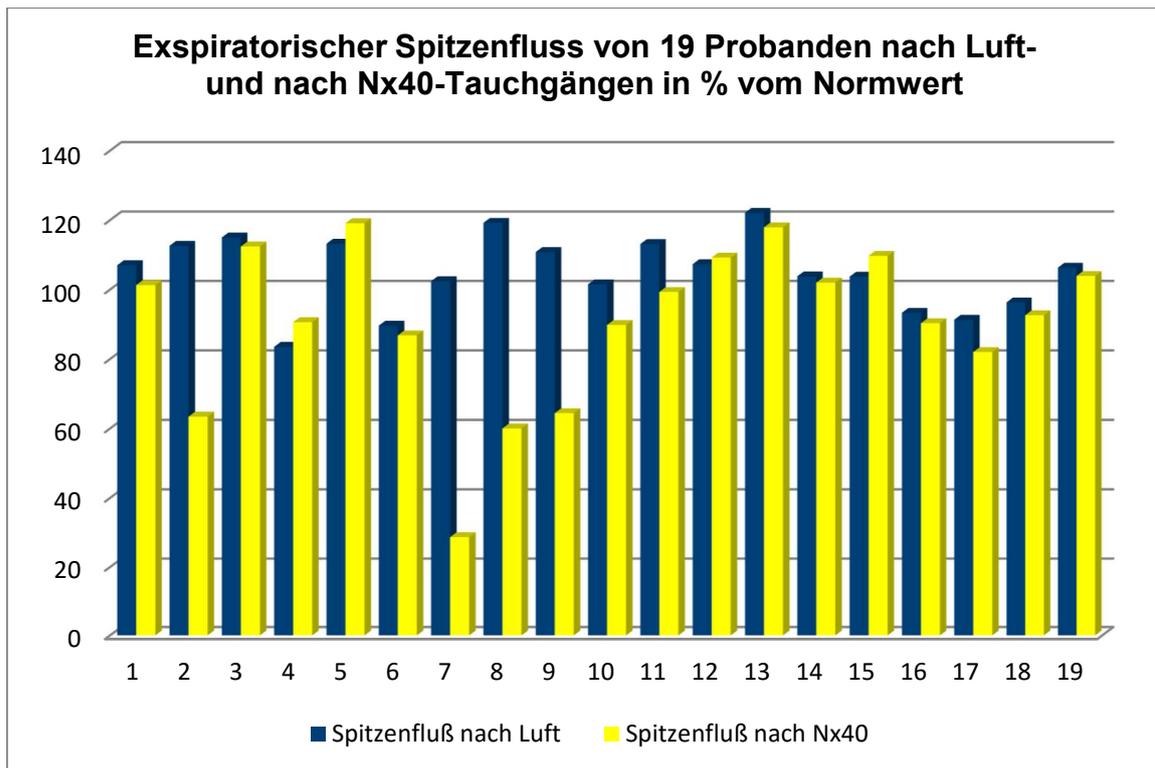


Abb. 25: Expiratorischer Spitzenfluss nach Luft- und nach Nx40-Tauchgängen

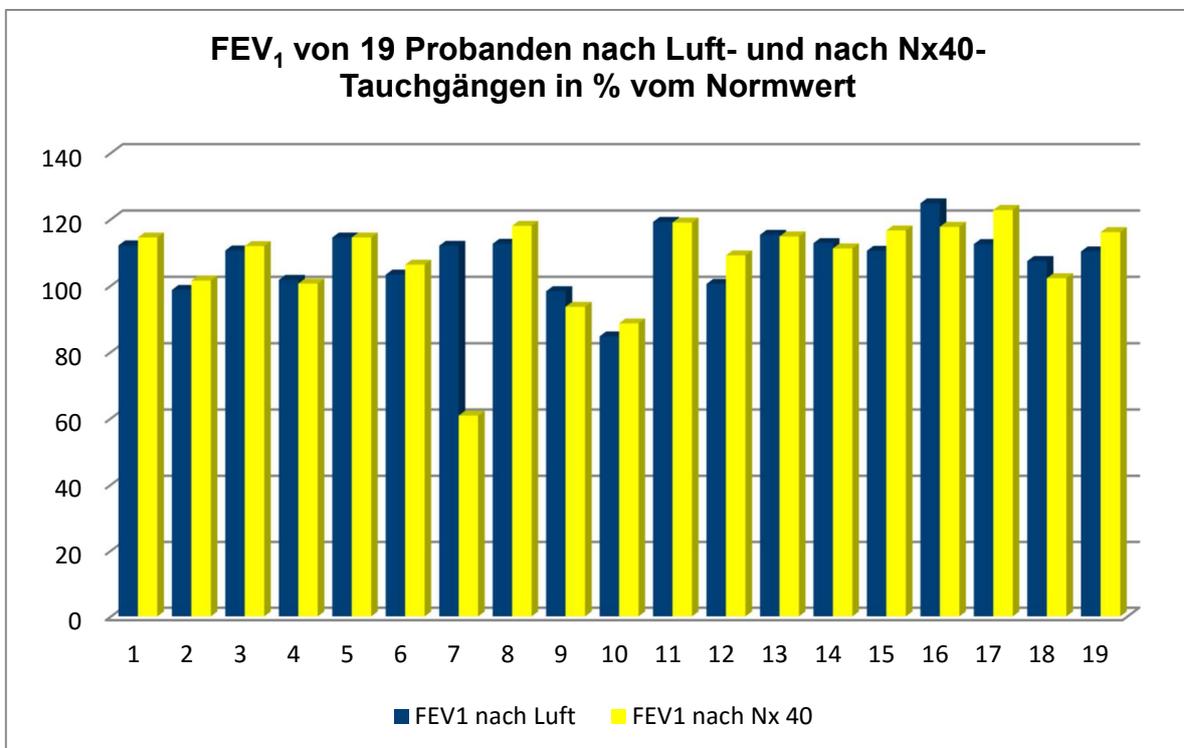


Abb. 26: FEV₁ nach Luft- und nach Nx40-Tauchgängen

4.1.2 Oszillometrie

Mit der Oszillometrie konnten Daten von 19 Probanden ausgewertet werden. Mit Hilfe dieser Methode wurden der Atemwegswiderstand bei 5 Hz und 20 Hz (R5 bzw. R20), sowie die Reactance bei 5 Hz (X5; Elastizität der peripheren Lungenabschnitte) erfasst.

Sowohl nach Verwendung von Luft als auch nach Nitrox hatte der Gesamtwiderstand zugenommen. Nach Luft waren die R5-Werte um durchschnittlich 4 % gegenüber den Messwerten vor dem Tauchgang erhöht (Abb. 27). Nach Nx40 war der R5-Wert um knapp 9 % erhöht (Abb. 28). Tendenziell nahm somit der Gesamtwiderstand der Lunge nach Nx40-Tauchgängen mehr zu als nach Lufttauchgängen.

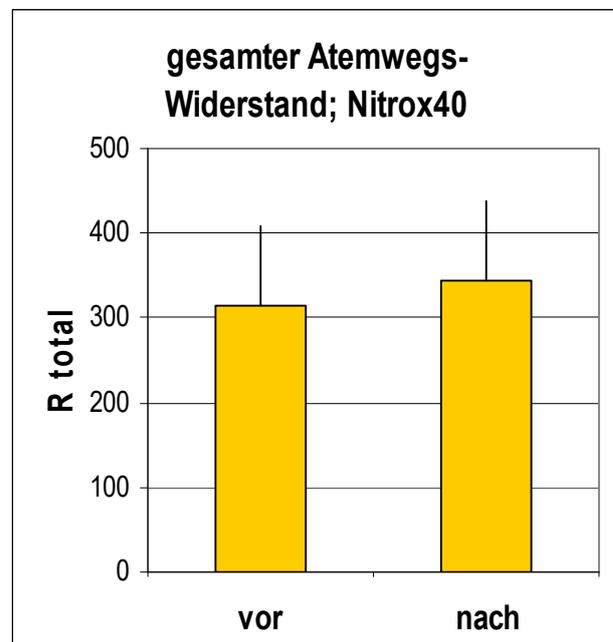
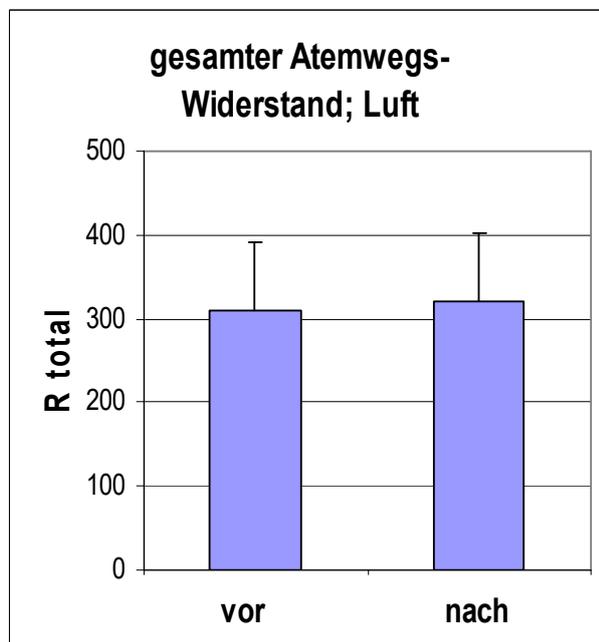


Abb. 27: Gesamtwiderstand vor und nach Luft

Abb. 28: Gesamtwiderstand vor und nach Nx40

Die proximalen Atemwegswiderstände (R20) waren unabhängig vom verwendeten Atemgas nahezu gleich verändert. Nach Luft-Tauchgängen waren die R20-Werte um 3 % (Abb. 29) und nach Nitrox um knapp 4 % erhöht (Abb. 30). Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass sich die geringen Veränderungen für den Gesamtwiderstand in den peripheren, also kleinsten Atemwegen ergeben hatten.

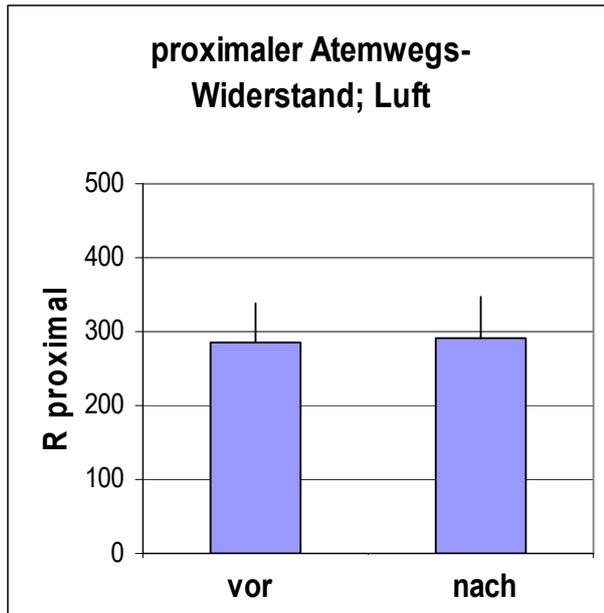


Abb. 29: Proximaler Widerstand nach Luft

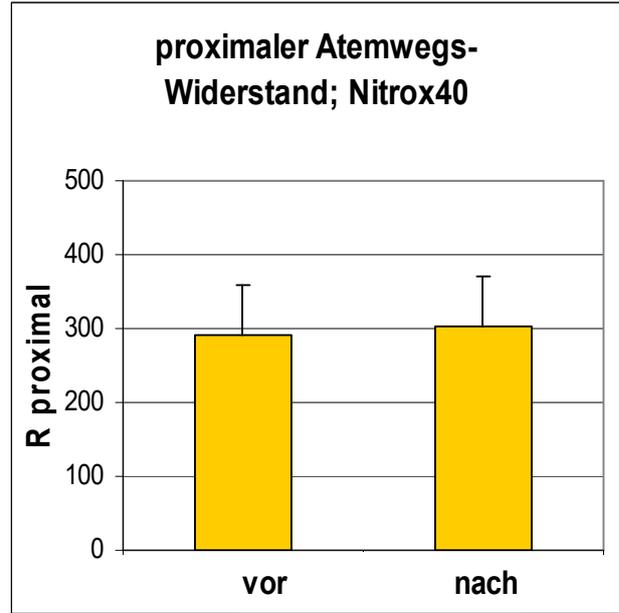


Abb. 30: Proximaler Widerstand nach Nx40

Die Reactance X5 hatte sich nach Luft-Tauchgängen nahezu nicht verändert (Abb. 31). Nach Nx40-Tauchgängen zeigte sich eine Abnahme um knapp 11 % (Abb. 32). Die Lungen der Taucher waren somit nach Nx40 weniger elastisch.

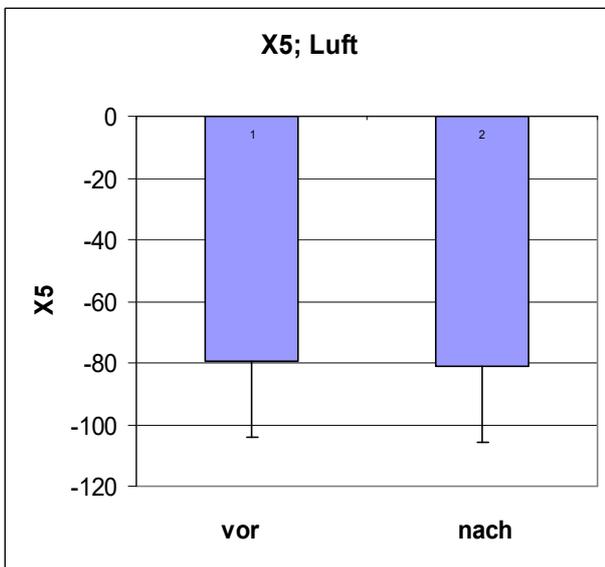


Abb. 31: Reactance X5 vor und nach Luft

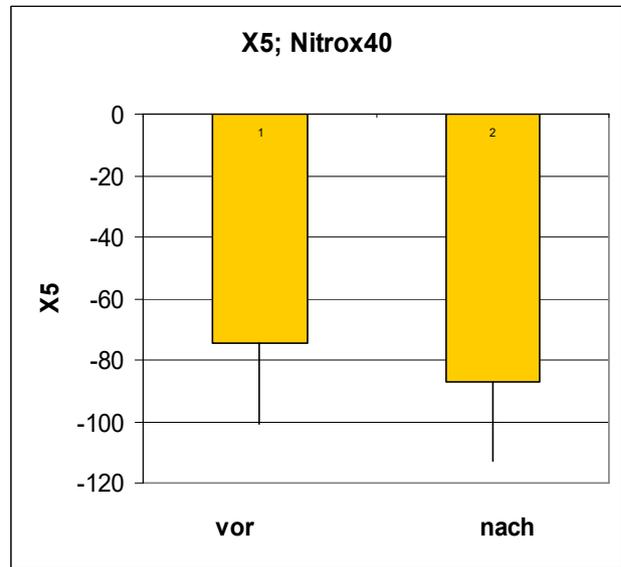


Abb. 32: Reactance X5 vor und nach Nx40

Die Atmung von Nx40 führte zu einer Zunahme der peripheren Atemwegswiderstände und zu einer Reduktion der Lungenelastizität.

Exkurs. Während der Studie wurden viele biometrische Daten erhoben. Darunter auch das Körpergewicht vor und nach den Tauchgängen. Dadurch ließ sich der Flüssigkeitsverlust der Probanden abschätzen. Der Gewichts- und damit Flüssigkeitsverlust variierte interindividuell stark und lag zwischen 0,3 und 1,3 kg/Tauchgang. Der durchschnittliche Flüssigkeitsverlust betrug 1,2 kg/Tauchgang (n=23). Ein großer Anteil an Flüssigkeit dürfte als perspiratio insensibilis über die Atmung verloren gegangen sein. Sicher spielt auch die „Taucherdiurese“ eine Rolle. Als Konsequenz muss den Tauchern empfohlen werden, nach einem Tauchgang mindestens 1 l Flüssigkeit zu sich zu nehmen, ganz besonders dann, wenn ein weiterer Tauchgang geplant ist.

4.2 Endothelfunktion

Der Einfluss hoher pO_2 -Werte auf die Dilatationsfähigkeit des Gefäßsystems wurde mit Hilfe der reaktiven Hyperämie beurteilt. Gemessen wurden der Ruhefluss (RF), der maximale Fluss (peak flow, PF), die Zeit nach Ende der Ischämie bis zum PF (time to maximalem PF), die prozentuale Differenz zwischen Ruhe- und maximalem Fluss (RF – PF in %), sowie die Fläche unter der reaktiven Hyperämie-Kurve (hyperämia area). Insgesamt lagen auswertbare Daten von 22 Probanden vor. Die Messungen wurden jeweils vor und nach den Tauchgängen durchgeführt.

4.2.1 Maximaler Fluss (PF)

Der PF betrug vor den Tauchgängen mit Luft durchschnittlich 87,1 Einheiten (28 bis 234) und war nach den Luft-Tauchgängen auf 90,9 Einheiten (34 bis 284) erhöht. Dies entspricht einer Zunahme von 4,4 % (Abb. 33).

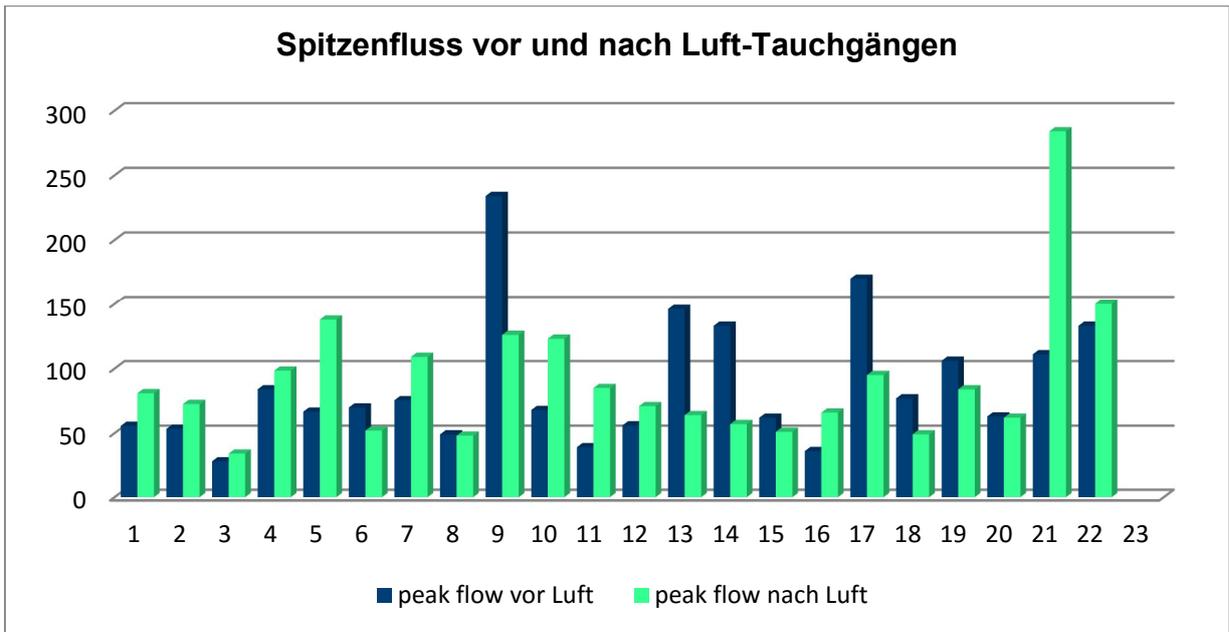


Abb. 33: Individueller Spitzenfluss vor und nach Lufttauchgängen

Nach Nx40-Tauchgängen zeigte sich eine deutliche Reduktion des PF und damit eine erhebliche Einschränkung der Gefäßelastizität. Vor den Nx40-Tauchgängen betrug der PF durchschnittlich 107,1 Einheiten (35 bis 209) – nach den Nx40-Tauchgängen nur noch 84,4 Einheiten (32 bis 139). Dies entspricht einer Abnahme um 21,2 % (Abb. 34).

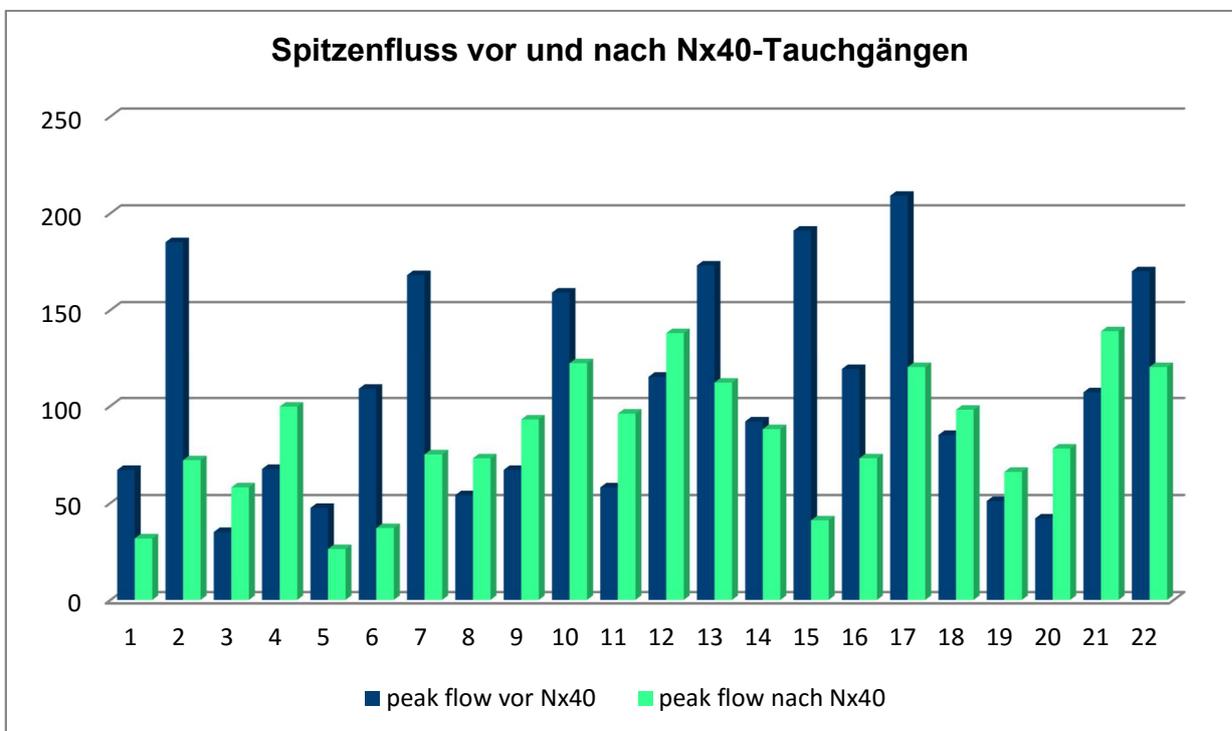


Abb. 34: Spitzenfluss vor und nach Nx40-Tauchgängen

Die Zeit nach der Ischämie bis zum Einsetzen des maximalen Spitzenflusses war nach Tauchgängen mit Nx40 etwas verlängert. Sie betrug nach Luft im Durchschnitt 37,0 s (14,7 s bis 68,5 s) und nach Nx40 38,6 s (10,2 s bis 133,8 s).

4.2.2 Ausgleichende Mehrdurchblutung

Im Weiteren zeigte sich ein Unterschied für die „ausgleichende“ Mehrdurchblutung nach Ischämie, die als Quotient aus Ruhe- und Spitzenfluss angegeben wird⁴⁶. Nach den Tauchgängen mit Luft war eine deutliche Zunahme zu registrieren. Vor den Tauchgängen betrug der durchschnittliche Anstieg von Ruhe- zu Spitzenfluss 379 %, nach den Luft-Tauchgängen betrug dieser 455 %. Bei den Nx40-Tauchgängen verhielt es sich anders (Abb. 35). Der Quotient nahm geringfügig ab: Vor den Nx40-Tauchgängen betrug der prozentuale Anstieg von Ruhe- zu Spitzenfluss 480 %, nach den Nx40-Tauchgängen 446 %.

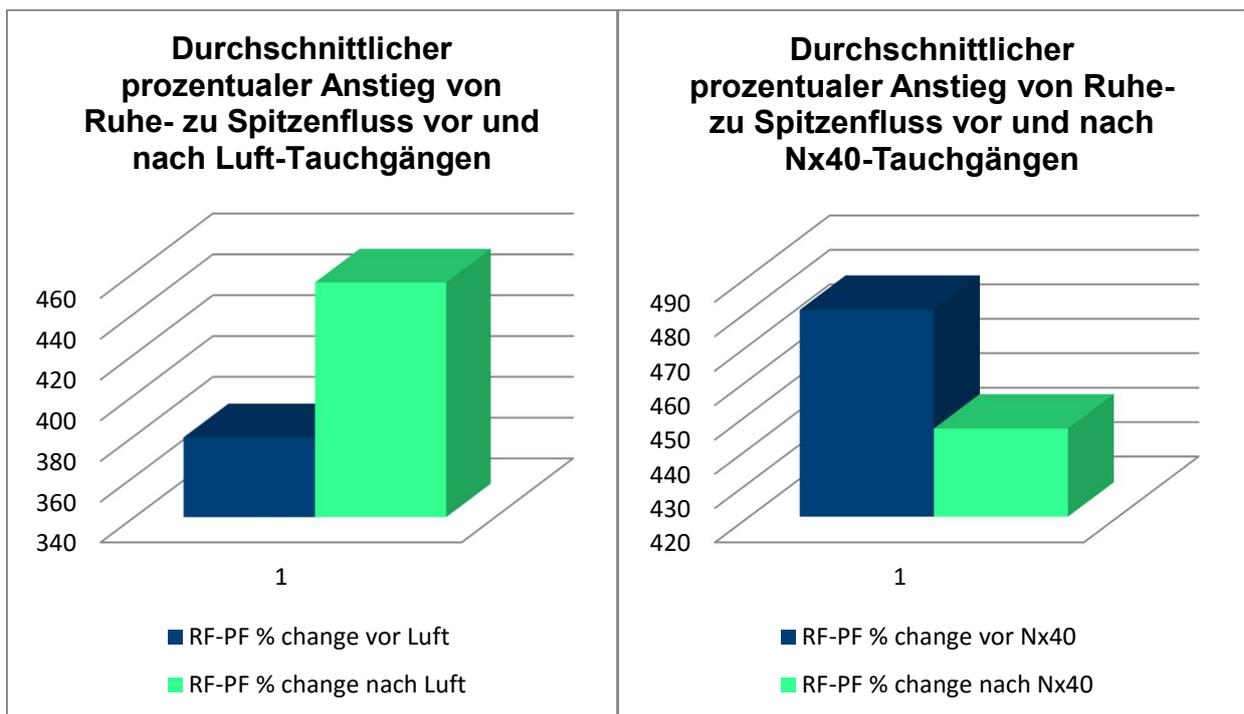


Abb. 35: Durchschnittlicher prozentualer Anstieg von Ruhe- zu Spitzenfluss vor und nach Tauchgängen mit Luft (links) und Nx40 (rechts) zu beachten: Skalierung der Ordinate beginnt nicht im Koordinatenursprung

4.2.3 Reaktive Hyperämie

Die Fläche unter der reaktiven Hyperämie-Kurve bestätigte die vorher gemessenen Werte von PF und RF-PF. Nach den Luft-Tauchgängen nahm die Fläche von durchschnittlich 4.183 auf 5.638 Einheiten zu (ca. 34,7 %). Nach den Nx40-Tauchgängen nahm die Fläche von 5.349 auf 4.825 Einheiten ab (ca. 9,8 %) (Abb. 36).

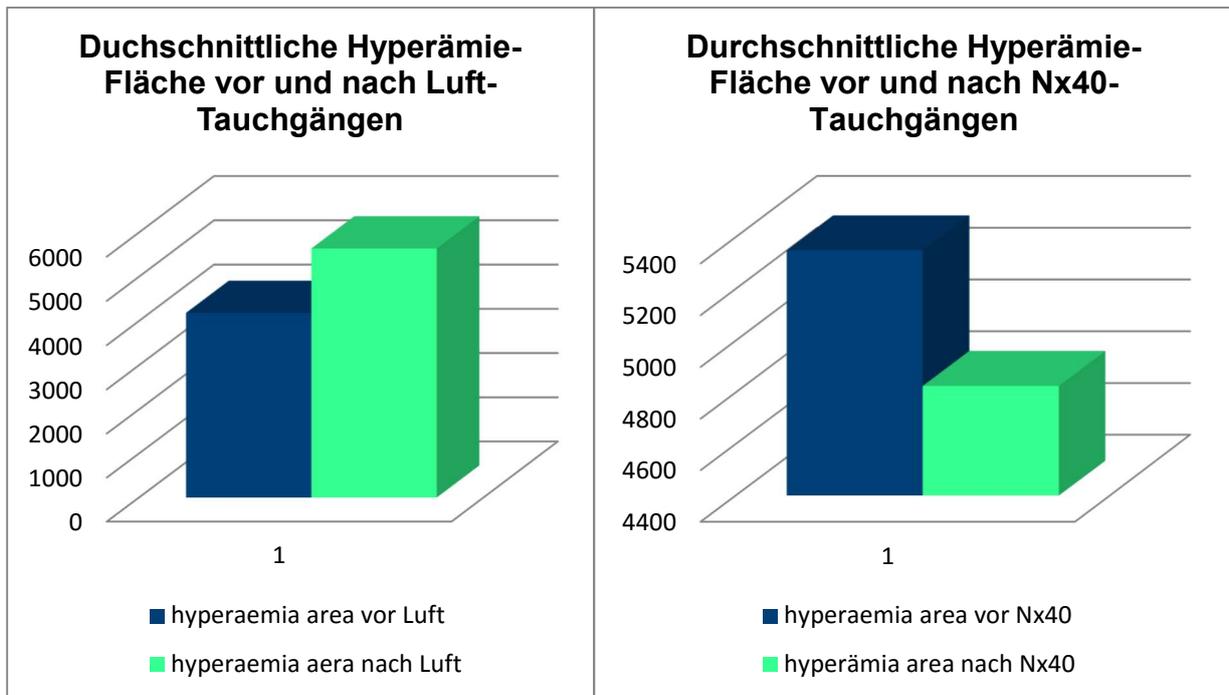


Abb. 36: Durchschnittliche Hyperämie-Fläche vor und nach den Tauchgängen mit Luft (links) und Nx40 (rechts), Achtung unterschiedlicher Koordinatenursprung.

Es wird festgehalten, dass Nx40 zu einer Reduktion der Gefäßelastizität führte.

4.3 Stickstoffblasen

Um atemgasabhängige Unterschiede zu erfassen, wurden mittels Doppler-Verfahren Inertgasblasen (N₂-Blasen) in der V. jugularis interna zu verschiedenen Zeiten gemessen, um das Maximum der Blasenentwicklung nicht zu übersehen. Die Messungen erfolgten nach 30, 60 und 90 min nach Ende der Tauchgänge. Insgesamt waren Daten von 21 Tauchern auswertbar. Bei den Tauchgängen kam es nie zu Regelverstößen beim Auftauchen, d. h. die maximale Aufstiegsgeschwindigkeit von 10 m/min wurde nie

überschritten, und nach allen Tauchgängen wurden die vorgegebenen Sicherheitsstopps eingehalten. Daher zeigte keiner der Probanden Symptome einer DCS.

Trotz der sehr konservativen Tauchgänge wiesen die Doppler-Untersuchungen fast bei jedem Probanden und nach jedem Tauchgang Mikroblasen nach. Nach den Tauchgängen mit Luft wurden insgesamt 239 Mikroblasen gezählt, nach Nx40 waren es insgesamt nur 146. Nach Tauchgängen mit Nx40 war damit die Anzahl der gemessenen Mikroblasen um ca. 39 % deutlich geringer als nach Luft-Tauchgängen (Abb. 37).

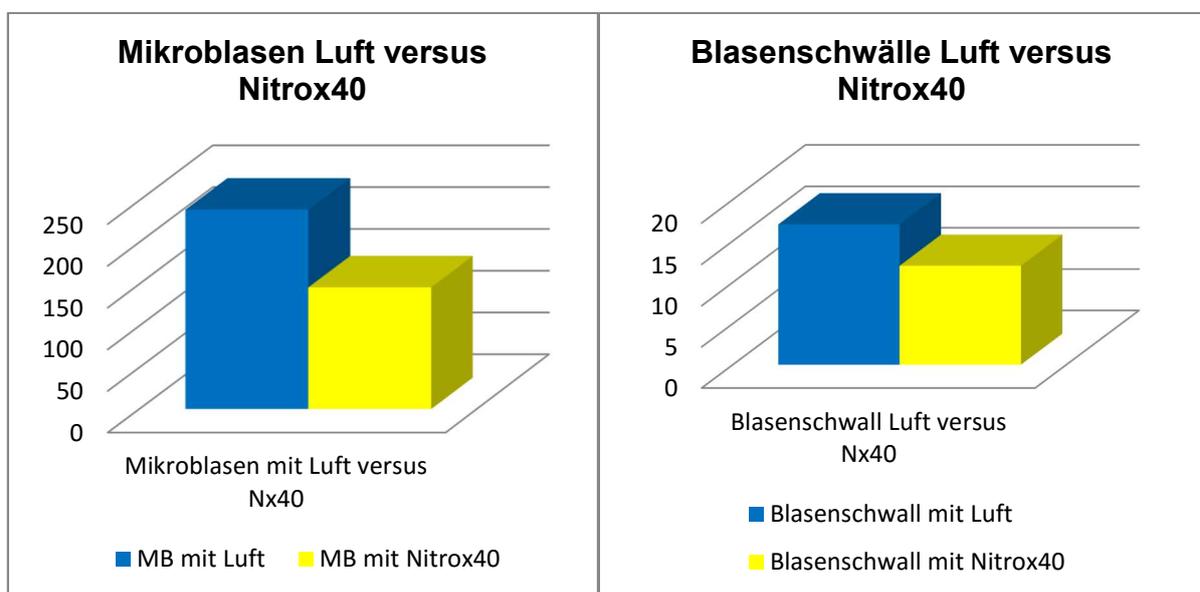


Abb. 37: Gesamtzahl der N₂-Blasen

Abb. 38: Gesamtzahl der N₂-Blasenschwalle

Gelegentlich bewegten sich keine einzelnen Mikroblasen an der Sonde vorbei, sondern Ansammlungen von vielen Mikroblasen. Die Anzahl dieser „Blasenschwalle“ war nach Atmung Luft gegenüber Nx40 deutlich erhöht (17 vs 12) (Abb. 38).

Auffällig war, dass die Anzahl der N₂-Blasen zu den drei Messzeitpunkten unterschiedlich war. Bei beiden Atemgasen zeigte sich ein Maximum bei 60 min nach dem Auftauchen (Abb. 39). Nachdem die Gesamtzahl der N₂-Blasen nach Nx40-Tauchgängen deutlich geringer war als nach Luft-Tauchgängen war auch dieses Maximum weniger deutlich ausgeprägt.

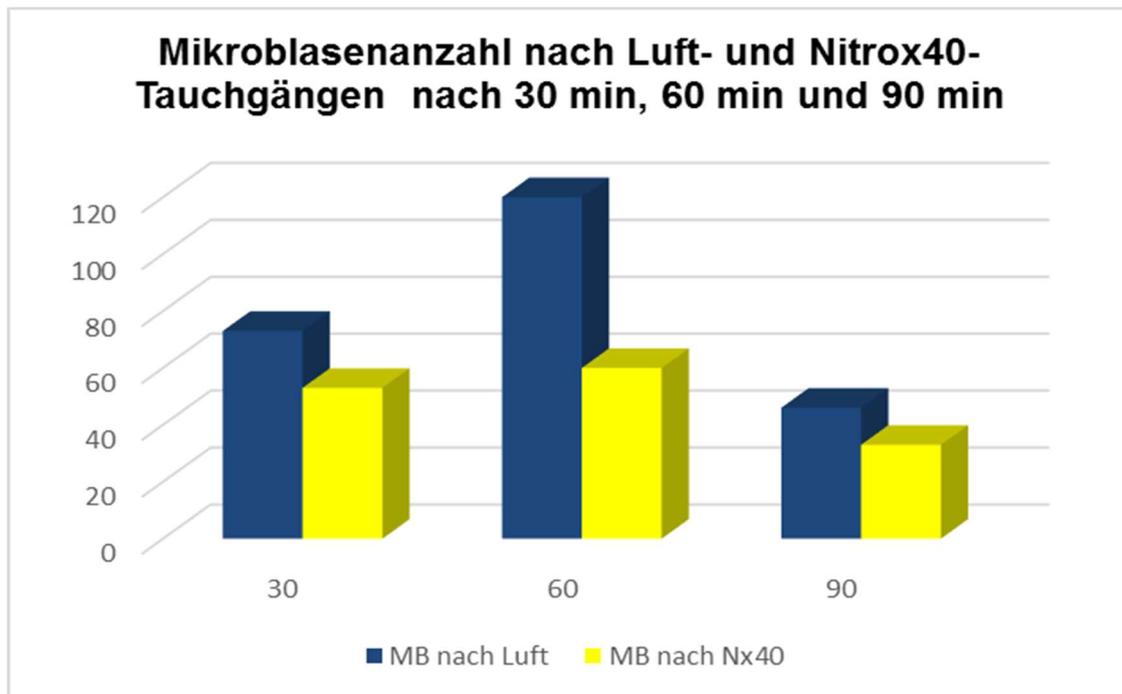


Abb. 39: Zeitliche Kinetik des Erscheinens von Mikroblasen nach den Tauchgängen

Es bleibt festzuhalten, dass – bei sonst gleichem Tauchprofil – nach einem Tauchgang mit Luft wesentlich mehr Mikroblasen im Blut der Taucher nachzuweisen waren als nach einem Tauchgang mit Nx40. Zusätzlich fiel auf, dass die Entwicklung der Mikroblasen nicht direkt nach dem Tauchgang ihr Maximum, sondern erst nach 60 min erreicht.

4.4 Kognitive Kompetenz

Zur Erfassung von Änderungen der kognitiven Fähigkeiten wurden ein Merkfähigkeitstest und ein Konzentrationstest verwendet. Zur Auswertung kamen die Daten von 16 Tauchern. Die Probanden waren durchweg erfahrene Taucher und waren alle schon oft deutlich tiefer als 25 m getaucht. Interessanterweise berichtete keiner der Teilnehmer nach den Studientauchgängen über irgendwelche Anzeichen oder Symptome einer Stickstoffnarkose. Subjektiv betrachtet war keiner der Probanden vom Tiefenrausch betroffen. Die objektive Auswertung der beiden Tests zeigte das Gegenteil.

4.4.1 Merkfähigkeit

Die Gesamtanzahl aller richtig erinnerten Wörter lag mit 132 Begriffen bei Nx40 um 34 % höher als mit 98 Begriffen bei Luft (Abb. 40).

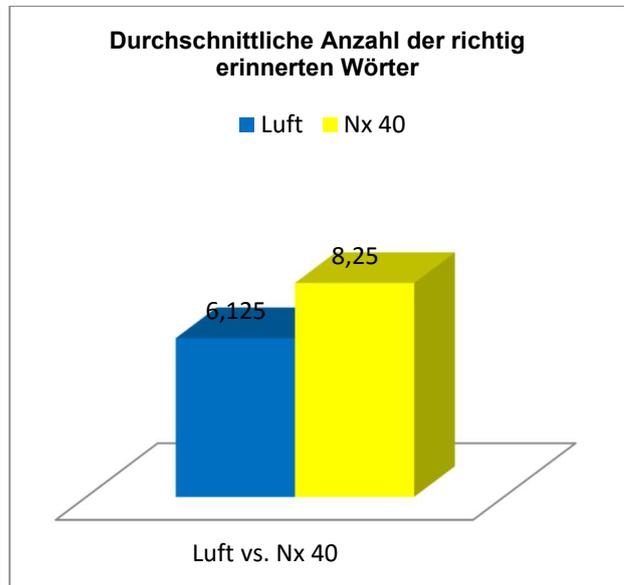
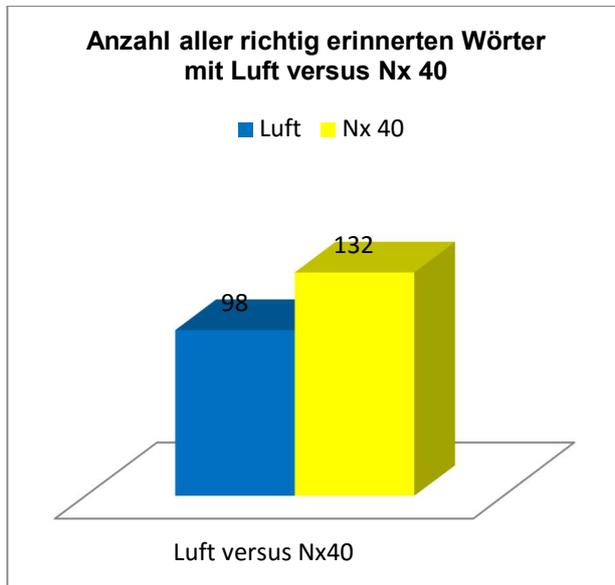


Abb. 40: Gesamtzahl der richtig erinnerten Begriffe **Abb. 41: Durchschnittliche Anzahl der richtig erinnerten Begriffe**

Die durchschnittliche Zahl richtig erinnerten Wörter lag mit Luft bei 6,1 ($\pm 2,9$) und mit Nx40 bei 8,3 ($\pm 2,9$) (Abb. 41).

4.4.2 Konzentrationsfähigkeit

Auch beim Zahlenverbindungstest führte die Atmung von Nx40 zu einer Verbesserung der Ergebnisse. Die Gesamtzahl der insgesamt richtig erreichten Zahlen lag bei Nx40 mit 370 gegenüber Luft mit 340 Zahlen um 8,8 % höher. Durchschnittlich erreichte die Anzahl der richtig verbundenen Zahlen 21 bei Luft auf 23 (± 4) bei Nx40 (Abb. 42).

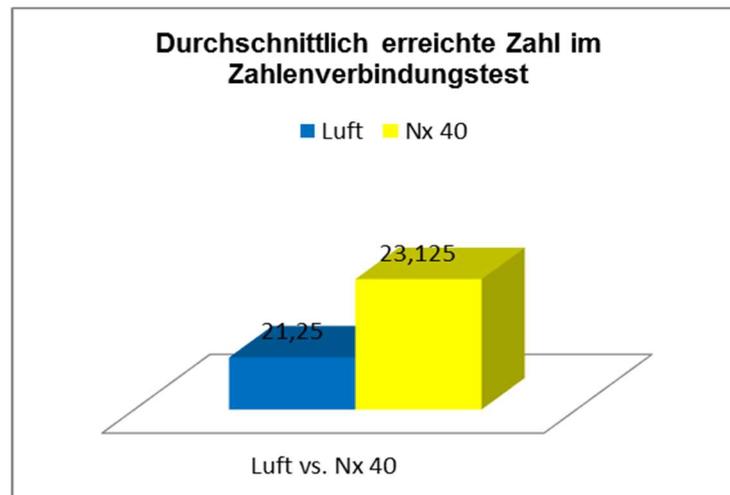


Abb. 42: Durchschnittlich erreichte Zahlen im Konzentrationstest

Beide durchgeführten Tests sprechen dafür, dass durch die Verwendung von Nx40 die kognitiven Fähigkeiten besser erhalten bleiben.

4.5 vegetatives Nervensystem/Herzfrequenzvariabilität

Die Herzfrequenz nahm bei beiden Atemgas-Gruppen von durchschnittlich 102/min zu Beginn des Tauchganges auf 93/min (Luft) und auf 89/min (Nx40) am Ende des Tauchganges ab. Diese Abnahmen um 9/min bzw. um 13/min waren statistisch nicht signifikant und waren für die beiden Atemgase nicht unterschiedlich. Entsprechend nahm die Länge der RR-Intervalle zu (Abb. 43).

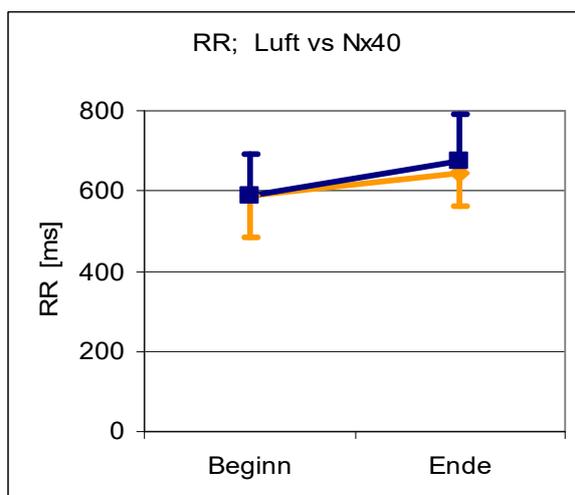


Abb. 43: RR-Intervall

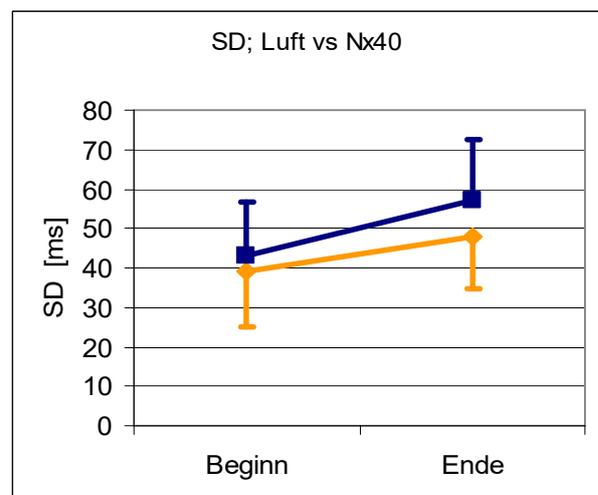


Abb. 44: SD Luft vs. Nx40

Die Standardabweichung der Abstände zwischen normalen RR-Intervallen (SDNN; SD) ergab für die beiden Atemgas-Gruppen bei Tauchgangs-Beginn keine bedeutsamen Unterschiede (Abb. 44). Dieses Maß stieg bei beiden Gruppen im Verlauf des Tauchganges an, wobei der Anstieg in der Nx40-Gruppe etwas ausgeprägter war (Luft: 23 % vs. Nx40: 33 %). PNN50 als Maß für spontane Änderungen der Herzfrequenz war zu Tauchgangs-Beginn zwischen den beiden Gruppen nahezu gleich (Abb.45). Der Wert stieg im Verlaufe des Tauchganges an: in der Luft-Gruppe um 100 % und in der Nx40-Gruppe um 167 %.

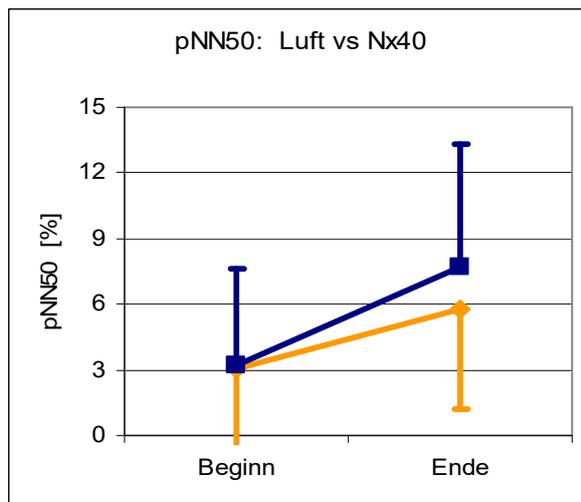


Abb. 45: pNN50 Luft vs. Nx40

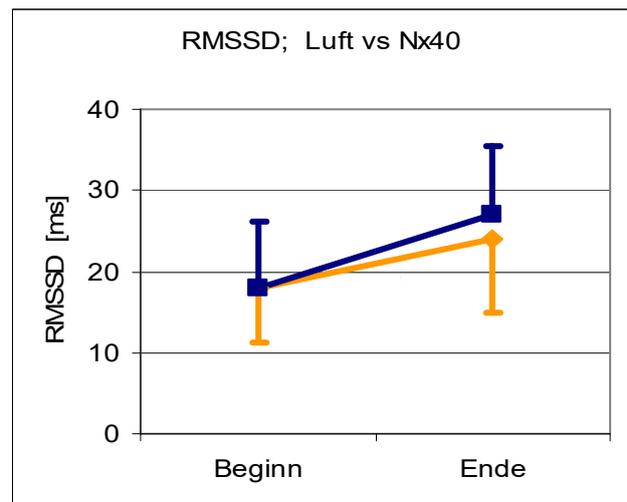


Abb. 46: RMSSD Luft vs. Nx40

RMSSD als Maß für die Kurzzeitvariabilität reflektiert den parasympathischen Einfluss. Diese Größe war zu Beginn der Tauchgänge für beide Gruppen nahezu identisch (Abb. 46:). Am Tauchgangsende war RMSSD in der Luft-Gruppe um 20 % und in der Nx40-Gruppe um 50 % angestiegen.

Das Leistungsdichte-Spektrum im niedrigen Frequenzbereich (LF) beschreibt überwiegend den Sympathikotonus. Dieser war zu Beginn des Tauchganges in der Nx40-Gruppe ($771 \pm 675 \text{ ms}^2$) gegenüber der Luft-Gruppe ($633 \pm 510 \text{ ms}^2$) um 22 % erhöht (Abb. 47). LF stieg während des Tauchganges nahezu parallel um 61 % (Luft) bzw. 50 % (Nx40) an.

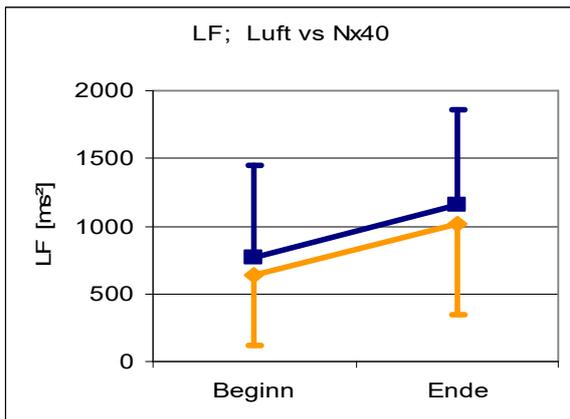


Abb. 47: LF Luft vs. Nx40

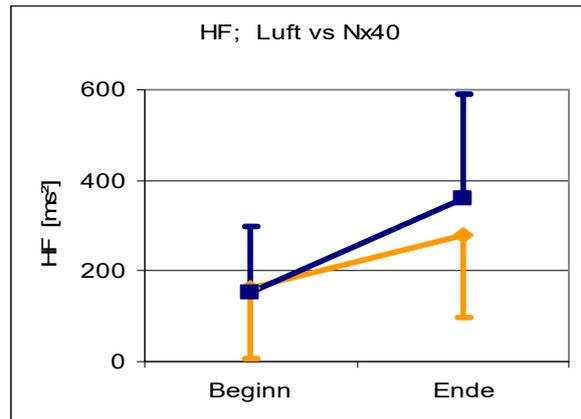


Abb. 48: HF Luft vs. Nx40

Das Leistungsdichte-Spektrum im hohen Frequenzbereich (HF) beschreibt Veränderungen des Parasympathikus. HF-Werte zu Tauchgangs-Beginn waren für die beiden Atemgas-Gruppen nahezu identisch (Abb.48) und stiegen bis zum Tauchgangs-Ende um 71 % bzw. um 139 % und damit stärker als LF an. Der Quotient LF/HF unterschied sich zu Beginn des Tauchganges geringfügig und betrug $5,0 \pm 2,8$ (Luft) und $5,6 \pm 3,1$ (Nx40) (Abb. 49). In beiden Gruppen fiel der Wert während des Tauchganges um 22 % bzw. um 34 %.

In beiden Gruppen hatte der Parasympathikotonus also zugenommen.

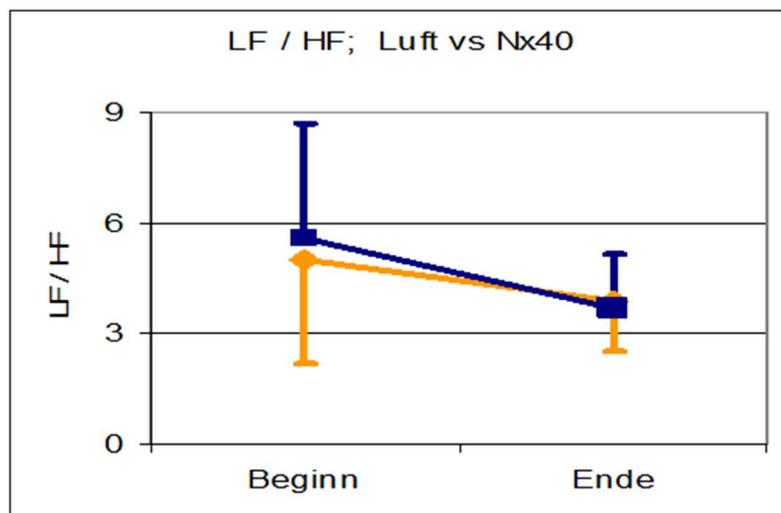


Abb. 49: LF/HF Luft vs. Nx40

5. Diskussion

Sporttauchen ist nicht nur in Deutschland, sondern auch in vielen Urlaubsländern eine beliebte Freizeitbeschäftigung. Laut Tauchsportindustrieverband gibt es alleine in Deutschland über 1.000.000 Sporttaucher, von denen etwa 406.000 Intensiv- oder Gelegenheitstaucher sind¹. Diese gehen ihrem Hobby nicht nur in heimischen Gewässern, sondern häufig auch in den warmen Meeren entfernter Länder nach.

Zu Beginn der 1980er Jahre hielt ein neues Atemgas, Sauerstoff-angereicherte Luft, Einzug in das Freizeittauchen: **Nitrox**. Am Anfang fand es nur in den USA Anhänger, doch ab Mitte der 1990er Jahre wurde das Tauchen mit Nitrox auch in Europa immer populärer. Was bei Berufs- und Militärtauchern längst gängige Praxis war, wurde von immer mehr Freizeitsportlern übernommen. Die großen Tauchsportverbände nahmen die Nitrox-Ausbildung in ihr Repertoire auf und trieben die Verbreitung dieses neuen Atemgases mit Bezeichnungen wie „Safeair“ und Ähnlichem voran. Den Sporttauchern wurde von allen Seiten suggeriert, Tauchen mit Nitrox sei nicht nur modern, sondern vor Allem sicher. Die Betreiber von Tauchbasen in aller Welt nahmen Nitrox schnell in ihr Programm auf. Heute ist dieses Atemgas selbst in den entlegensten Gegenden der Welt verfügbar: angefangen von Tauchbasen am Mittelmeer, dem Roten Meer und Indonesien bis hin zu den Malediven.

Insbesondere auf Tauchsafari-Schiffen wird sehr häufig mit Nitrox getaucht. Die Taucher unternehmen auf ihren Ausflügen zwischen drei und fünf Tauchgänge pro Tag und das ohne Unterbrechung den gesamten Urlaub hindurch. So kommen in einer Tauchsafari-Woche nicht selten 20 bis 30 Tauchgänge pro Taucher zusammen. Bei derartig intensivem Tauchen bietet sich die Verwendung von Nitrox besonders an, da es neben längeren Nullzeiten auch kürzere Oberflächenpausen ermöglicht. Andererseits werden Schädigungen der Lunge^{5,6}, des Blutgefäßsystems¹⁴ und des Zentralnervensystems^{13,128} beschrieben, die durch den erhöhten oxidativen Stress bei Verwendung von Nitrox entstehen können.

In der aktuellen Literatur zum Thema Nitrox- und Sporttauchen fällt auf, dass es nicht viele Arbeiten zu diesem Thema gibt. Bei einer Suche in der Literaturlatenbank des National Institute of Health (= PubMed) mit den Begriffen „nitrox“ und „diving“ finden sich

71 Treffer, während sich bei der Suche mit den Begriffen „nitrox“ und „diving“ und „recreational“ nur elf Treffer ergeben.

Ein großer Teil der Studien wurde an Berufs-/Militärtauchern^{8,11} oder aber in Druckkammern^{9,16,129} durchgeführt. Die wirklich große Anzahl von Freizeittauchern, die immer häufiger Nitrox verwenden, findet also in der aktuellen Literatur kaum Beachtung. Aus diesem Grund führten bei dieser doppelblinden, prospektiven, randomisierten Feldstudie Freizeittaucher je einen Tauchgang mit Luft und einen mit Nitrox40 (Nx40) in einem See durch. Die fünf untersuchten Aspekte konnten wie folgt beantwortet werden:

- Führt die Atmung von Nx40 bei einem konservativen Sporttauchgang zu einer messbaren Änderung der Lungenfunktion?

Tatsächlich kam es zu einer messbaren Änderung der Lungenfunktion. Der oxidative Stress durch die erhöhten O₂-Partialdrücke bei der Atmung von Nx40 führte zwar zu keiner Einschränkung der Vitalkapazität aber im Gegensatz zu Tauchgängen mit Luft zu einer tendenziellen Abnahme der dynamischen Größen PEF und FEV₁, die allerdings individuell sehr unterschiedlich ausfielen und für eine Erhöhung des Atemwegswiderstandes sprechen.

Die zweite Messmethode, die Impulsoszillometrie (IOS), gestattet die Konkretisierung der Ergebnisse. Nitrox erhöhte den pulmonalen Gesamtwiderstand und verminderte die Reaktanz. Bei genauerer Betrachtung zeigte sich, dass die Widerstandserhöhung hauptsächlich in den peripheren Lungenabschnitten stattgefunden hatte und zwar im Sinne einer „small airway disease“^{47,48}. Es kam bei der Verwendung von Nx40 zu einer Verminderung der elastischen und dynamischen Lungenfunktion. Letztlich waren die gemessenen Veränderungen nicht signifikant, aber es lag eine klare Tendenz zu Ungunsten von Nx40 gegenüber Luft vor. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit der Literatur, geringe Veränderungen konnten häufiger gemessen werden, jedoch waren diese nur selten signifikant^{12,13}.

- Führt die Atmung von Nx40 bei einem konservativen Sporttauchgang zu einer Schädigung des Gefäßendothels und damit zu einer Abnahme der Dilatationsfähigkeit?

Mit Hilfe der reaktiven Hyperämie lässt sich die Dilatationsfähigkeit und damit die Funktion des Gefäßendothels beurteilen⁴⁴.

Die mit der Laser-Doppler-Methode gemessenen Variablen zeigten nach Nx40-Tauchgängen im Gegensatz zu Luft-Tauchgängen eine signifikante Verminderung der postischämischen maximalen Durchblutung. Das spricht dafür, dass die hohen O₂-Partialdrücke beim Tauchen mit Nx40 über eine Zunahme der reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) zu einer Schädigung des Gefäßendothels führen. Die endotheliale Dysfunktion bestand in einer reduzierten Dilatationsfähigkeit^{15,16}.

- Führt die Atmung von Nx40 bei einem konservativen Sporttauchgang zu einer Reduktion der Stickstoffblasen im venösen Blut der Taucher?

Auch nach konservativen Tauchgängen lassen sich bei Sporttauchern Mikroblasen nachweisen, die allerdings keine akuten embolischen Schäden verursachen. Sie werden daher als „stille Blasen“ bezeichnet^{49,50}. Unabhängig vom Atemgas konnten nach jedem Studientauchgang N₂-Blasen im venösen Blut nachgewiesen werden, obwohl sich alle Taucher an die Dekompressionsvorschriften gehalten hatten und niemand über Symptome einer Dekompressionskrankheit (DCS) klagte. Die Atmung von Nx40 führte gegenüber Luft zu einer signifikanten Reduktion von N₂-Blasen.

Interessant war zusätzlich das zeitliche Auftreten der Mikroblasen nach Tauchgangs-Ende. Sie erreichten nicht unmittelbar nach den Tauchgängen ihr Maximum, sondern erst nach 30 bis 90 min nach dem Auftauchen. Dieses Phänomen ist in der Literatur bereits beschrieben, allerdings liegen die Blasen-Maxima in verschiedenen Zeitfenstern. Ein großer Tauchsport-Verband berichtet ähnliche Werte wie in dieser Studie (Abb. 50).

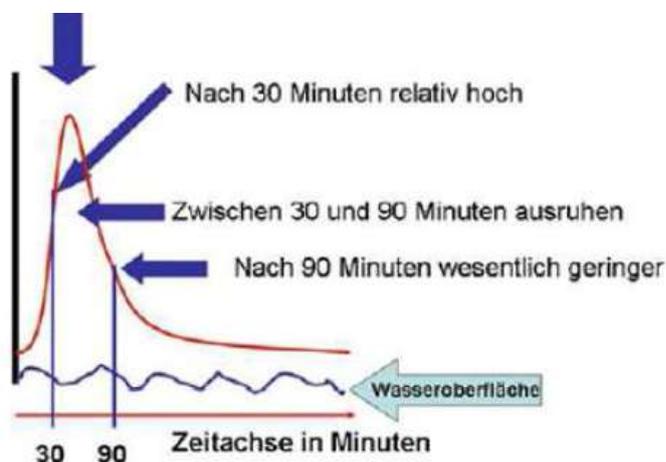


Abb. 50: Das Blasenmaximum liegt in einem Bereich zwischen 30 und 90 min nach dem Auftauchen. nach www.Barakuda.de

Ebenfalls in Übereinstimmung mit den vorliegenden Daten ist beschrieben, dass eine zerebrale Störung durch Narkose mit Stickstoff länger als 30 min nach Ende des Tauchganges fortbestehen kann⁶⁴. Das heißt, dass mindestens für diesen Zeitraum noch eine N₂-Übersättigung vorliegt. Andererseits ergab sich bei einer Studie mit normalem, dekompressionsfreien Tauchgangsprofil zwischen zwei Auswertungsperioden (30 – 45 min und 45 – 60 min) kein Blasenmaximum⁶⁵.

- Führt die Atmung von Nx40 bei einem konservativen Sporttauchgang zu einer messbar besseren Aufrechterhaltung der kognitiven Fähigkeiten?

Die kognitiven Fähigkeiten wurden mit einem Gedächtnis- und einem Aufmerksamkeitstest erfasst. Es fiel auf, dass selbst tiefererfahrene Taucher bereits in 25 m erste Auswirkungen der N₂-Narkose zeigten. Die Atmung von Nx40 führte im Vergleich zu Luft zu einer signifikanten Reduktion der N₂-Narkose bedingten Fehler bei der Ausführung der beiden Tests.

- Führt die Atmung von Nx40 bei einem konservativen Sporttauchgang zu einer erhöhten Aktivität des Parasympathikus?

Gerätetauchen führt sowohl zu einer Aktivierung des sympathischen Anteils des vegetativen Nervensystems als allgemeine Stressantwort¹²¹ auf das Untertauchen und die körperliche Belastung, als auch zu einer Aktivierung des parasympathischen Anteils über den Tauchreflex⁹⁰. Mit Hilfe der Herzfrequenzvariabilität konnte nachgewiesen werden, dass die Aktivität des Parasympathikus beim Tauchen mit Nitrox40 durch die erhöhten Sauerstoffpartialdrücke größer war als bei Druckluft-Tauchgängen.

Limitierungen der Studie.

Die Ergebnisse dieser experimentellen Freigewässer-Studie gelten für einen kalten Bergsee auf 805 m Höhe. Die erlangten Erkenntnisse können weitgehend problemlos auf viele beliebte Tauchgewässer in Deutschland, Österreich oder der Schweiz übertragen werden, bei denen die Wassertemperaturen in größeren Tiefen (≥ 10 m) immer unter 10 °C liegen. Zusätzlich muss der Unterschied zwischen Tauchgewässern im Flachland und im Gebirge berücksichtigt werden. Nach einer Faustregel nimmt der Luftdruck alle 840 m

um 10 % ab⁶⁶. Das bedeutet, dass der Luftdruck auf der Oberfläche des Walchensees etwa 0,9 bar betrug. Auf der Tauchtiefe von 25 m herrschte damit ein Gesamtdruck von 3,4 und nicht von 3,5 bar. Solche Druckunterschiede müssten vermutlich sorgfältig bei Untersuchungen berücksichtigt werden, bei denen Drücke und Druckänderungen eine Rolle spielen, also z. B. bei Untersuchungen zur Entstehung von Barotraumata.

In dieser Studie waren die in der Höhe wirksam werdenden N₂-Partialdrücke und O₂-Partialdrücke um etwa 10 % reduziert. Das bedeutet einerseits, dass schädliche Auswirkungen um einen gewissen Anteil vermindert waren und entsprechend schädliche Auswirkungen auf Meereshöhe verstärkt sein sollten. Da die Teilnehmer jeweils einen Tauchgang mit Luft und einen mit Nx40 durchführten, dienten sie als ihre eigene Kontrollgruppe. Höhenbedingte Effekte würden sich daher bei jedem Teilnehmer gleichartig auswirken und waren dadurch zu vernachlässigen.

In diesem Sinne lassen sich die hiesigen Ergebnisse auch auf das Tauchen im Meer übertragen, wenn die unterschiedlichen Wassertemperaturen berücksichtigt werden. Die Teilnehmer an dieser Studie trugen als persönliche Schutzausrüstung Trockentauchanzüge, die zusammen mit einer isolierenden Unterziehkleidung die Auskühlung verminderten. Es kommt also höchstens zum Ende eines Tauchganges zu kälteinduzierten Reaktionen wie einer verstärkten peripheren Vasokonstriktion, die sich am Ende eines 1-Stunden-Tauchganges im Roten Meer ebenfalls einstellt.

Da die vorliegenden Nx40-verursachten Veränderungen jeweils mit Luft-verursachten Veränderungen verglichen wurden, lassen sich die im Bergsee ermittelten Ergebnisse im vernünftigen Rahmen auf das Tropenmeer übertragen.

In ihren Urlauben führen Taucher häufig Wiederholungstauchgänge durch. Dabei werden auch andere Nitrox-Gemische (Nx28, Nx32, Nx36) verwendet. Die vorliegenden Ergebnisse ergaben sich bei Verwendung von Nx40. Es darf angenommen werden, dass die hier beschriebenen Effekte mit niedrigeren O₂-Anreicherungen weniger umfangreich ausfallen. Es wird aber darauf hingewiesen, dass pulmonale und vaskuläre Schädigungen akkumulieren können¹³ und dass es bei Wiederholungstauchgängen nicht zu einer vollständigen N₂-Entsättigung kommt.

Zur Erfassung möglicher Schädigungen am Gefäßsystem wurde ein Laser-Doppler-System eingesetzt, um die Fluss-vermittelte Dilatation zu messen. Mögliche Fehler betreffen zunächst den Untersucher bei der Erfassung der Signale. Daher wurden die Messungen jeweils vom gleichen Studienleiter (A. Z.) durchgeführt. Da der Untersucher verblindet war, können auch systematische Fehler bei der Interpretation der Signale ausgeschlossen werden.

Teilnehmer an der Studie.

Um möglichst relevante Aussagen treffen zu können, musste ein repräsentatives Kollektiv an der Studie teilnehmen. Der Deutsche Tauchsportindustrieverband (TIV) schreibt, dass „Intensiv-Taucher“ mehr als 30 Tauchgänge pro Jahr durchführen und zwischen 35 und 50 Jahre alt sind. Die Teilnehmer an dieser Studie waren im Mittel 37,3 Jahre alt und hatten im Durchschnitt 677 Tauchgänge durchgeführt. Damit gehört das Kollektiv keiner tauchenden Randgruppe an. Da die Probanden überdurchschnittlich viel Taucherfahrung besaßen, stellten die Unterwasser-Tests zu den kognitiven Fähigkeiten für sie vermutlich keine besondere Herausforderung dar. Auch konnten die Taucher problemlos das vorgegebene Tauchprofil sicher und nach den Vorgaben tauchen. Somit war sichergestellt, dass alle Taucher den gleichen Tauchgang absolviert hatten.

Das besondere Ziel dieser Arbeit war es, normale Sporttaucher unter realen Bedingungen im Freigewässer zu untersuchen, da bisher häufig Berufs- oder Militäertaucher untersucht wurden oder aber simulierte Tauchgänge in Druckkammern (= im Trockenen) stattfanden^{8,9}. Das Tauchen im Wasser unterscheidet sich auch bei gleichen Umgebungsdrücken grundsätzlich von einem Druckkammerversuch. Durch die Immersion und Submersion beim Tauchen findet eine Blutvolumenverschiebung aus den unteren Extremitäten in den intrathorakalen Raum statt⁶⁷. Dies hat deutliche Auswirkungen auf die intrathorakalen Organe, allen voran die Lunge^{51,11}. Das vermehrte intrathorakale Blutvolumen führt zu einer Dehnung der Herzvorhöfe und damit über das Atriale-Natriuretische-Peptid (ANP) und einer reduzierten Freisetzung des Anti-Diuretischen-Hormons (ADH) zu einer erhöhten Diurese. Dieses als Taucherdiurese bekannte Phänomen hat durch den intravasalen Flüssigkeitsverlust Auswirkungen auf die Dekompression, da durch die Erhöhung der Blut-Viskosität das Risiko für eine DCS

steigt. Andererseits ist die Atmung von Druckluft oder Nitrox mit Flüssigkeitsverlusten verbunden, da die Atemgase aus technischen Gründen sehr trocken sein müssen. Entsprechend ergab sich bei den vorliegenden Untersuchungen ein Flüssigkeitsverlust von im Mittel ca. 1,2 l/Tauchgang und Person.

Ein weiterer, erheblicher Unterschied zwischen einem echten Tauchgang und Druckkammerversuchen ist die körperliche Belastung. Während die Probanden in einer Druckkammer die meiste Zeit ruhig auf ihren Plätzen sitzen, müssen die Taucher bei einem realen Tauchgang körperliche Arbeit verrichten, welche etwa gemütlichem Fahrradfahren entspricht⁶⁸. Diese führt zu gesteigerter Durchblutung der Muskulatur und hat damit einen Einfluss auf die Auf- und Entsättigung mit Inertgasen.

Letztlich muss die thermische Belastung betrachtet werden. In einer Druckkammer herrschen durch die Klimaanlage nahezu normotherme Bedingungen. Bei einem realen Tauchgang ist der Mensch einer kühlen Umgebung ausgesetzt, die durch die starke Wärmeleitfähigkeit des Wassers zu einer schnellen Auskühlung des Tauchers führt. Die daraus folgende Vasokonstriktion im Bereich der Haut führt zu einer veränderten Durchblutungssituation und möglichen Auswirkungen auf die Dekompression. Es wird daran erinnert, dass sich Gase in kühleren Flüssigkeiten oder Geweben – hier der Haut – besser lösen lassen. Andererseits führt die Vasokonstriktion zu einer schlechteren Durchblutung und damit zum Ende des Tauchganges zu einer Behinderung des Inertgas-Abtransportes während der Dekompression. Ergebnisse aus Druckkammer-Studien lassen sich folglich nicht ohne Weiteres aufs Tauchen anwenden. Aus diesem Grund wurde die vorliegende Studie unter Realbedingungen im Freiwasser durchgeführt.

Im Folgenden werden die eigenen Ergebnisse zu den fünf untersuchten Aspekten (Lungenfunktion, Endothelfunktion, Blasenbildung, Kognition und Herzfrequenzvariabilität) an Hand der bekannten Literatur diskutiert.

Lungenfunktion.

Seit längerer Zeit ist bekannt, dass hohe O₂-Partialdrücke für viele Organsysteme^{4,10,13,52} schädlich sind. Viele Auswirkungen auf die Lunge wurden beschrieben, z. B. der Lorrain-Smith-Effekt. Schädigungen der Lunge können sich auf alveolärer Ebene abspielen und

den Gasaustausch¹⁰ behindern oder die Vitalkapazität reduzieren. Oxidativer Stress führt über eine Schädigung des Surfactants zur Zunahme der Oberflächenspannung und Verminderung der Lungenvolumina⁵³. In dieser Studie waren nach beiden Atemgasen keine gerichteten, signifikanten Veränderungen der Vitalkapazitäten erkennbar.

Wie Pochekutova und Korenbaum (2011) in ihren Untersuchungen¹², so zeigten auch die Messungen dieser Studie Verschlechterungen von dynamischen spirometrischen Variablen. Die gemessenen Werte waren nach Nx40 weder signifikant schlechter als die nach Luft-Atmung, noch lagen sie außerhalb der physiologischen Grenzen. Jedoch bestand nach Nx40-Atmung ein deutlicher Trend für eine Reduktion von PEF und FEV₁.

Als weiteres Messverfahren wurde – erstmals im Rahmen von Freiwasser-Studien – die Oszillometrie verwendet. Dieses Messverfahren bietet die Möglichkeit, die genaue Lokalisation der vermuteten Lungenschädigung zu bestimmen. Unsere Untersuchungen zeigten deutlich, dass die Nx40-Atmung zu einer verminderten Reaktanz der peripheren Lungenabschnitte führt, sowie eine leichte Widerstandserhöhung in der Peripherie zur Folge hat. Das Spirometer, mit dem die Untersuchungen der Spirometrie und auch Oszillometrie durchgeführt wurden benötigte sowohl thermisch stabile Umgebungsbedingungen als auch ein stabiles, elektrisches Netz. Aus diesem Grund wurden die Messungen im Festsaal eines Hotels durchgeführt. Durch gute Organisation konnte erreicht werden, dass die Messungen der Lungenfunktion spätestens 20 min nach Erreichen der Wasseroberfläche begonnen werden konnten. Der geringe Zeitverzug wird die Ergebnisse allerdings nicht beeinflusst haben, denn in einer eigenen, vorangegangenen Pilotuntersuchung konnten geringe Veränderungen der Lungenfunktion noch 12 Stunden nach dem Tauchgang nachgewiesen werden.

Die tendenziell verschlechterten, dynamischen Messgrößen und die signifikant verschlechterte Reaktanz als Maß für die Elastizität der peripheren Atemwege sprechen sehr für eine Schädigung durch oxidativen Stress nach einem einzelnen konservativen Sport-Tauchgang mit Nx40. Untersuchungen zu kumulativen Effekten bei Sporttauchern, die Wiederholungstauchgänge durchführen – wie bei Tauchsafaris üblich – stehen bisher aus oder liegen nur als Kongress-Poster vor⁶⁹.

Endothelfunktion.

Die bisher vorliegenden Untersuchungen legen nahe, dass hohe O₂-Partialdrücke auch für das Gefäßsystem^{19,20} schädlich sind. In diesen Studien wurden die Taucher zum Teil unter extremen Bedingungen untersucht wie etwa dem Sättigungstauchen²⁰ oder dem Tieftauchen mit Trimix¹⁸. Entsprechende Ergebnisse liegen ebenfalls nach Untersuchungen in Druckkammern¹¹ vor.

In dieser Studie sollte hingegen eine Gruppe von Probanden untersucht werden, die pro Tag nur einen einzelnen konservativen Sporttauchgang mit Luft oder Nx40 unternommen hatte.

Bei der Durchblutung der Organe lässt sich zwischen einer Ruhedurchblutung und einer maximalen Durchblutung – Durchblutungsreserve – unterscheiden. Die Ausschöpfung der Reserve wird im Wesentlichen durch die maximale Dilatation der Widerstandsgefäße möglich⁵⁴. Ist die Reserve eingeschränkt, ist auch das maximale O₂-Angebot eingeschränkt, so dass es zu Ischämie-bedingten Schäden kommen kann. Einschränkungen der Reserve lassen sich für diagnostische Zwecke z. B. durch Gabe von potenten Dilatatoren wie Adenosin⁵⁵ oder Nitrate⁵⁶ feststellen.

Im Zusammenhang mit Schäden, die bei Tauchern durch oxidativen Stress entstehen können, wurde bereits in früheren Studien^{16,19} die Fluss-vermittelten Dilatation (FMD) als ein nicht-invasives Verfahren verwendet. Aus früheren Arbeiten geht hervor, dass sich die endotheliale Dysfunktion nach Tauchgängen nur langsam über Stunden bis Tage zurückbildet. Nach Tieftauchgängen mit Trimix erholte sich die Gefäßfunktion während einer Serie von sechs Tauchgängen in sechs Tagen nicht bis zum Ausgangswert. Aus den erwähnten Studien war bekannt, dass hohe pO₂-Werte zu einer Verminderung der Gefäßelastizität führen können. Die vorliegende Studie bestätigt die früheren Studien und zeigt, dass selbst im Rahmen eines konservativen Sporttauchganges mit Nitrox der Spitzenfluss gegenüber demselben Tauchgang mit Luft signifikant reduziert war. Dies überrascht, da man bisher davon ausging, dass sich die Sporttaucher weit innerhalb der sicheren Grenzen bewegen. Fraglich ist, inwieweit eine endotheliale Dysfunktion für den gesunden Taucher von Bedeutung ist. Taucher, die unter Arteriosklerose leiden und ohnehin schon eine Einschränkung ihrer Durchblutung haben, könnten hier jedoch im Nachteil sein. Patienten mit im Alltag nur minimalen Beeinträchtigungen, die unter

Umständen noch tauchen gehen dürfen, könnten gefährdet sein, besonders dann, wenn man an eine eingeschränkte Koronarreserve denkt. Weiterführende Studien z. B. zur Koronarperfusion nach Nitrox Tauchgängen sind daher wünschenswert.

Stickstoffblasen.

Nach Tauchgängen mit dem Drucklufttauchgerät kommt es regelmäßig zur Bildung von Mikroblasen^{49,50}. Da Mikroblasen größer und damit symptomatisch werden können, sind sie nicht ungefährlich. Aufgrund ihrer Anzahl lassen sie einen Rückschluss auf die Qualität der Dekompression zu. Dabei gilt: Je weniger Mikroblasen im Körper, desto geringer das DCS-Risiko⁷⁰.

In der vorliegenden Studie wurden die Probanden mittels Doppler-Sonographie einmal vor den Tauchgängen und dreimal nach den Tauchgängen untersucht. Die Untersuchung vor dem Tauchgang diente dem Ausschluss von bereits vor dem Tauchgang im Körper befindlichen Mikroblasen. Die dreifache Messung nach den Tauchgängen diente der Erfassung der zeitlichen Dynamik der Blasenbildung. Als Messpunkt für die Sonographie wurde die V. jugularis interna ausgewählt. Dieses Gefäß wird von einer Consensus Development Conference für derartige Studien empfohlen⁵⁷. Diese Vene drainiert einen Großteil des zerebralen Blutflusses. Mikroblasen, die hier gemessen werden, kommen direkt von einem Organ, das höchst sensibel auf Durchblutungsstörungen reagiert.

Vor knapp 25 Jahren wurde mit Druckkammer-Untersuchungen nachgewiesen, dass die Atmung von Nitrox zu einer Reduktion von Mikroblasen führt²⁶. Diese Ergebnisse wurden später, ebenfalls durch Untersuchungen in der Druckkammer, indirekt über die Bestimmung der Thrombozyten-Aktivität bestätigt²³. Und andere Untersuchungen an zehn Tauchern mit Wiederholungstauchgänge auf 18 m Tiefe zeigten nach Luft-Tauchgängen mehr Mikroblasen als nach Nx36-Tauchgängen¹⁹.

In dieser Studie hingegen sollte kein kumulativer Effekt untersucht werden. Vielmehr sollte ein einzelner Tauchgang mit Luft mit einem einzelnen Tauchgang mit Nx40 bei demselben Taucher im Freiwasser verglichen werden. Bei diesem Design führte die Atmung von Nx40 zu einer signifikanten Reduktion der Mikroblasen. Damit werden die

Ergebnisse aus den bisher vorliegenden Druckkammer-Studien unter realen Freiwasser-Bedingungen bestätigt.

In früheren Studien wird die Blasenlast zu einem bestimmten Zeitpunkt nach Ende des Tauchganges beschrieben. Der zeitliche Verlauf der Blasenfreisetzung wird aber nur in wenigen Studien beschrieben^{58,59}. In dieser Studie mit drei Messzeitpunkten (30 min, 60 min, 90 min) ergab sich unabhängig vom Atemgas ein Blasenmaximum 60 min nach Ende des Tauchganges. Dieses Ergebnis spricht dafür, dass ein mittelschnelles Gewebe nach einem konservativen Sporttauchgang noch mindestens 60 min lang übersättigt bleibt.

Diese Erkenntnis hat durchaus einen praktischen Nutzen. Ein Wiederholungstauchgang sollte nicht vor Ablauf von mindestens 90 min Oberflächenpause begonnen werden. Andernfalls besteht das Risiko, den Folgetauchgang mit einer erheblichen Anzahl von Mikroblasen vom vorausgegangenen Tauchgang zu starten. Gerade die langsamen Gewebe brauchen nach vollständiger Sättigung bis zu 48 h (bei einer angenommenen $t_{1/2}$ von 480 min) zur vollständigen Entsättigung⁶⁰. Dies bedeutet, dass Taucher bei Wiederholungstauchgängen mit einer „Restsättigung“ erneut tauchen gehen und diese in ihrer Dekompressionsplanung berücksichtigen müssen.

Abgesehen von einem erhöhten Dekompressionsrisiko - Mikroblasen könnten wie Blasenkerne wirken und damit größeren, symptomatischen Blasen als Grundlage dienen²⁵ – besteht eine weitere Gefahr. Beim Abtauchen wird von vielen Tauchern der Druckausgleich mittels des Valsalva-Manövers durchgeführt. Nachdem ca. 30 % der Bevölkerung ein persistierendes foramen ovale (PFO) haben³⁹ besteht das Risiko, dass Mikroblasen aus dem venösen System ins arterielle System überführt werden und zur arteriellen Gasembolie führen.

Die vorliegende Studie zeigt, dass bei Sporttauchern nach konservativen Tauchgängen weniger N₂-Blasen vorhanden sind, wenn an Stelle von Luft Nx40 geatmet wurde.

Kognitive Kompetenz.

Der Tiefenrausch kann Taucher betreffen, die mit Luft tiefer als 30 m Tiefe tauchen⁶². Als Verursacher des Tiefenrausches entdeckte Albert Behnke 1935 den Stickstoff²⁸. Der Mechanismus der N₂-Narkose ist bis heute nicht abschließend geklärt³⁵, aber eine Reduktion des N₂-Anteiles im Atemgas erscheint sehr sinnvoll, wenn es um die Reduktion der narkotischen Eigenschaften geht.

Zur Bestimmung der kognitiven Funktion werden etablierte psychologische Tests verwendet. Diese sind primär für Versuche im kalten Wasser eines Bergsees nicht geeignet. In dieser Studie wurde der Test unter Wasser durchgeführt, wo es mäßig dunkel war, die Temperatur um 4 °C betrug und die Ohren durch dicke Neoprenhauben verdeckt waren. Auch die Feinmotorik war durch das Tragen dicker Taucherhandschuhe eingeschränkt. Damit liegt nahe, dass etablierte Tests modifiziert werden mussten.

Der Test zur Erfassung der Merkfähigkeit lehnte sich an den „Verbalen Lern- und Gedächtnistest“ an⁶³. Zur Beurteilung der Aufmerksamkeit wird häufig das Zusammenwirken aus akustischen und optischen Reizen verwendet⁷¹. Weil akustische Reize während des Tauchens nahezu nicht eingesetzt werden können, war auch der Aufmerksamkeitstest ein visueller Test, der sich an den ebenfalls gut etablierten Zahlenverbindungstests anlehnt⁷².

Hobbs und Kollegen (2014) untersuchten die Stickstoffnarkose unter Verwendung von Nx30 und Druckluft und fanden entgegen den Erwartungen keine signifikanten Atemgas-abhängigen Unterschiede³⁴. In dieser Studie fand sich hingegen bei der Verwendung von Nx40 gegenüber Luft eine signifikante Zunahme der Merkfähigkeit (+33 %) und eine tendenzielle Zunahme der Aufmerksamkeit (+9 %).

Dieser Unterschied in den beiden Arbeiten ist durch den deutlich verringerten Stickstoffanteil im Nx40 zu erklären. Ein Rechenbeispiel soll dies verdeutlichen. Atmet ein Taucher Luft auf 25 m Tiefe, so beträgt der pN₂ 2,76 bar. Bei Atmung von Nx30 beträgt der pN₂ 2,45 bar – das entspricht einer äquivalenten Lufttiefe von 21 m. Der Unterschied in der rechnerischen Tauchtiefe betrug für die Taucher in der Studie von Hobbs und Kollegen (2014) somit nur 4 m. Mit Nx40 beträgt der pN₂ auf 25 m Tiefe 2,1 bar – dies entspricht einer äquivalenten Lufttiefe von nur noch 16,6 m. Damit war der Unterschied

der rechnerischen Tauchtiefe in der vorliegenden Studie mit 8,4 m deutlich größer und so ließen sich signifikante Ergebnisse erzielen.

Es lässt sich nur spekulieren, warum der Gedächtnistest und der Aufmerksamkeitstest in dieser Studie deutlich unterschiedliche Vorteile für Nx40 ergaben (33 % vs. 9 %). Vermutlich war der Zahlenverbindungstest mit nur 25 Zahlen für die taucherfahrenen Probanden nicht anspruchsvoll genug, denn viele Teilnehmer erreichten die Zahl 25 in der richtigen Reihenfolge. Damit war eine Unterscheidung von mittelmäßigen und guten Leistungen schwierig.

Vegetatives Nervensystem/Herzfrequenzvariabilität

Die Herzfrequenz-Variabilität (HRV) beschreibt zyklische Variationen der Herzfrequenz und gestattet die nicht-invasive Untersuchung der modulierenden Effekte von neuronalen Mechanismen auf die intrinsische Herzfrequenz. Die Untersuchungen an 25 erfahrenen SCUBA-Tauchern zeigen:

- Das für diese Studie angefertigte EKG-System gestattet die Registrierung von EKG-Signalen, die bei Tauchgängen im offenen Gewässer auch im kalten Wasser aufgezeichnet werden können.
- Tauchgänge unter den hier vorliegenden Bedingungen führen zu einer Aktivierung des Vagotonus,
- Die Aktivierung des Vagotonus ist bei der Verwendung des Atemgases Nx40 umfangreicher als bei Verwendung von Luft.

Die Literatur über den Einsatz der HRV im Bereich der Medizin ist umfangreich; allein 60 Übersichtsarbeiten werden von PubMed gelistet. Die Literatur reicht von der Erfassung der HRV in der Intensivmedizin¹⁰⁵ bis zur Beschreibung der Bedeutung der HRV bei der Entwicklung der COPD¹⁰⁶ (chronic obstructive pulmonary disease). Ebenso lässt sich die HRV heranziehen, um den Erfolg von Reha-Maßnahmen^{107,108} zu bewerten. Es besteht Übereinstimmung darüber, dass eine eingeschränkte HRV mit einem erhöhten Risiko für eine koronare Herzerkrankung und eine erhöhte Sterblichkeit aus verschiedenen Gründen einhergeht¹⁰⁹.

Auch im Bereich der Arbeitsmedizin wird diese nicht-invasive Methode umfangreich verwendet, um z. B. die Reaktionen von Kollektiven, die besonderen Stressoren

ausgesetzt sind, mit Norm-Kollektiven zu vergleichen. Derartige Stressoren können z. B. unterschiedliche akustische Belastungen¹¹⁰ sein oder Prämien, die Angestellten bei positiven Abschlüssen¹¹¹ ausgezahlt werden. Studien zu Veränderungen des autonomen Nervensystems bei Berufstauchern sind sehr selten^{112,113,92}.

Zur Beurteilung von Fortschritten im Rahmen des körperlichen Trainings werden ebenfalls Maße der HRV herangezogen^{114,115}, z. B. für das Schwimmen¹¹⁶.

Es gibt nur wenig Literatur über den Einfluss des Tauchens im Schwimmbad oder im Freiwasser auf das autonome Nervensystem von Sporttauchern. Andererseits existiert eine Reihe von Untersuchungen, die in der Druckkammer¹¹⁷ oder mit beruflichen Tauchern durchgeführt wurden.

In einer der Schwimmbad-Arbeiten wird untersucht, wie lange ein EKG registriert werden muss, damit in der HRV-Kurzzeitanalyse keine Informationen verloren gehen¹¹⁸. In einer weiteren Arbeit wird der Einfluss des Tauchens auf die Aktivität des autonomen Nervensystems beschrieben¹¹⁹.

Schließlich wird in einer Dissertation untersucht, ob Tauchen im Schwimmbad oder im offenen Wasser die Aktivität des autonomen Nervensystems unterschiedlich beeinflusst¹²⁰. Damit gehört die vorliegende Arbeit zu den wenigen, in welcher die HRV von Sporttauchern bei Tauchgängen im offenen Wasser untersucht wurden.

Weil der Mensch dafür nicht geschaffen ist, bedeutet der Aufenthalt unter Wasser beträchtlichen psychischen Stress, der im ungünstigen Fall zu fehlerhaften Entscheidungen und zu Unfällen führen kann¹²¹. Es wäre also zu erwarten, dass der Tauchgang den Sympathikus aktiviert. Andererseits nimmt auch die Aktivität des Parasympathikus durch den Tauchreflex zu, der bei Seevögeln und Seesäugetieren zu einer Tauchbradykardie¹²² führt. Der Tauchreflex ist später auch für den Menschen beschrieben worden⁹⁰.

HRV-Maße aus dem Zeitbereich. Tauchen mit eigener Atemgasversorgung sollte also zu einer gleichzeitigen Aktivierung von Sympathikus und Parasympathikus führen. Wird die Abnahme der Herzfrequenz während des Tauchganges als Index herangezogen, dann nahm die sympathische Aktivität ab oder die parasympathische Aktivität zu. Diese Abnahme war für beide Atemgase nicht unterschiedlich - etwa 10 % - dies steht in Übereinstimmung mit der Literatur⁶⁵ und ist vermutlich das Ergebnis des Tauchreflexes^{123,124}.

Die Standardabweichung der Abstände zwischen normalen RR (SDNN) ist ein Indikator für die Höhe der Gesamtvariabilität und war während des Tauchganges angestiegen: die HRV hatte also erwartungsgemäß zugenommen. Der Anstieg in der Nitrox40 (Nx40)-Gruppe war etwas ausgeprägter.

Ganz ähnlich verhielt sich der relative Anteil der Differenzen aufeinanderfolgender NN-Intervalle >50 ms (PNN50). Dieses Maß für spontane Änderungen war im Verlaufe des Tauchganges deutlich angestiegen: in der Luft-Gruppe deutlich weniger als in der Nx40-Gruppe. Analog zum SDNN hatte die HRV also während des Tauchganges zugenommen.

Die Quadratwurzel des quadratischen Mittelwertes der Summe aller Differenzen sukzessiver RR-Intervalle (RMSSD) erfasst als Maß der Kurzzeitvariabilität eine parasympathische Aktivierung. RMSSD war bei beiden Atemgasen angestiegen. Der stärkere Anstieg nach Nx40 lässt sich vermutlich auf den höheren Sauerstoffanteil zurückführen, der mit einer Aktivierung des Parasympathikus einher geht^{91,93,125}.

Alle drei Maße aus dem Zeitbereich legen nahe, dass es während des Tauchganges zu einer parasympathischen Aktivierung gekommen war, welche bei der Nx40-Gruppe jeweils stärker ausgeprägt war.

Maße aus dem Frequenzbereich. Das Leistungsdichte-Spektrum im niedrigen Frequenzbereich (LF) beschreibt überwiegend den Sympathikotonus. Dieses erste von drei Maßen aus dem Frequenzbereich stieg während des Tauchganges nahezu parallel bei beiden Atemgasen an und entsprach damit der Vorstellung, dass das Gerätetauchen auch für erfahrene Taucher psychischen Stress bedeutet. Dieser ließe sich mindestens zum Teil auf die beiden kognitiven Tests zurückführen, die im Verlaufe des Tauchganges bearbeitet werden mussten.

Das Leistungsdichte-Spektrum im hohen Frequenzbereich (HF) ist ein Maß für Veränderungen des Parasympathikus. Der Anstieg der HF-Werte fiel stärker aus als der Anstieg der LF-Leistungsdichte. Der Anstieg in der Nx40-Gruppe war umfangreicher, womit erneut die parasympathische Aktivierung durch den erhöhten Sauerstoffanteil nahegelegt wird.

Als Ergebnis der unterschiedlich umfangreichen LF- und HF-Anstiege nimmt der Quotient aus LF und HF im Verlaufe des Tauchganges ab. Die Abnahme fiel wiederum in der Nx40-Gruppe umfangreicher aus.

Der Quotient aus LF und HF ist als Maß der sympathovagalen Balance akzeptiert, also als Maß für gegenläufige neuronale Mechanismen^{109,120}. Nimmt dieser Wert ab, dann hat sich die Balance in Richtung parasympathische Aktivierung verschoben. Die stärkere Abnahme in der Nx40-Gruppe spricht erneut für den Einfluss des erhöhten Sauerstoff-Anteiles und ist im Einklang mit der Literatur, in welcher die vagale Aktivität bei experimenteller Hyperoxie Dosis-abhängig zunahm¹²⁵. Diese Zunahme könnte dazu beitragen, die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung von Arrhythmien während des Tauchens zu verringern^{125,126}. In einer älteren Druckkammer-Studie mit Freiwilligen¹²⁷ wird der Herzfrequenz-senkende Effekt von Nitrox und Sauerstoff bestätigt.

Es ist bemerkenswert, dass die parasympathische Aktivierung in dieser Studie umfangreich genug war, um Arrhythmien auszulösen. Des Weiteren muss betont werden, dass die Teilnehmer an dieser Studie weit innerhalb der als sicher anerkannten Grenzen des Sporttauchens tauchten und trotzdem schon messbare Veränderungen in der Balance des vegetativen Nervensystems auftraten.

Zusammenfassung / Schlussfolgerung.

Die Verwendung von Nx40 ist für Sporttaucher sicher. Keiner der Teilnehmer klagte zu irgendeiner Zeit über Beschwerden oder Unwohlsein. Alle erhobenen Messwerte, die durch das Tauchen verändert worden sein könnten, lagen im physiologischen Bereich. Deutliche Vorteile sprechen für die Verwendung von Nx40:

- + weniger Mikroblasen und damit ein geringeres Risiko, einen Dekompressionsunfall zu erleiden,
- + besser erhaltene kognitive Leistungen und damit sichereres Verhalten in Situationen mit komplexen Anforderungen.
- + vergrößerte Herzfrequenzvariabilität bei verminderter Herzfrequenz

Andererseits dürfen die schädlichen Auswirkungen erhöhter O₂-Partialdrücke nicht übersehen werden, denn selbst ein konservativer Sporttauchgang mit Nx40 verursachte:

- Schädigungen im Bereich der peripheren Atemwege und
- eine eingeschränkte Dilatationsfähigkeit, i. e. eine endotheliale Dysfunktion.

Die Ergebnisse legen nahe, dass Schäden minimiert werden können, wenn zwischen Wiederholungs-Tauchgängen ausreichend lange Oberflächenpausen eingelegt werden. In diesen kann der Stickstoff weiter abgebaut werden und mögliche Reparaturprozesse können gestartet werden.

6. Literatur

¹ Dipl.-Ing. Dr. Wolf-Dieter Mell, Tauchen in Zukunft

update 2014, Forschungsvereinigung für die Sport- und Freizeitschiffahrt e.V. (FVVSF)
Forschungsbericht Nr. 3.3, S. 9

² <http://www.chemie.de/lexikon/Partialdruck.html>
<http://www.chemie.de/lexikon/Partialdruck.html>

³ S. Schröder, D. Schneider-Bichel, Wasserrettung und Notfallmedizin – medizinische und technische Herausforderungen an die Wasserrettung, 2010 ecomed SICHERHEIT, S. 289

⁴ Jenkinson SG, Oxygen toxicity in New Horiz. 1993 Nov;1(4):504-11

⁵ Nagata K, Iwasaki Y, Yamada T, Yuba T, Kono K, Hosogi S, Ohsugi S, Kuwahara H, Marunaka Y, Overexpression of manganese superoxide dismutase by N-acetylcysteine in hyperoxic lung injury in Respir Med. 2007 Apr;101(4):800-7. Epub 2006 Sep 28

⁶ Pace PW, Yao LJ, Wilson JX, Possmayer F, Veldhuizen RA, Lewis JF, The effects of hyperoxia exposure on lung function and pulmonary surfactant in a rat model of acute lung injury in Exp Lung Res. 2009 Jun;35(5):380-98

⁷ Entezari M, Javdan M, Antoine DJ, Morrow DM, Sitapara RA, Patel V, Wang M, Sharma L, Gorasiya S, Zur M, Wu W4, Li J, Yang H, Ashby CR, Thomas D, Wang H, Mantell LL, Inhibition of extracellular HMGB1 attenuates hyperoxia-induced inflammatory acute lung injury in Redox Biol. 2014 Jan 20;2:314-22. doi: 10.1016/j.redox.2014.01.013. eCollection 2014

⁸ Tetzlaff K, Friege L, Theysohn J, Neubauer B, Muth CM, Lung function in military oxygen divers: a longitudinal study. In Aviat Space Environ Med. 2005 Oct;76(10):974-7

⁹ Meckler C, Blatteau JE, Hasbroucq T, Schmid B, Risso JJ, Vidal F, Effects of hyperbaric nitrogen-induced narcosis on response-selection processes. In Ergonomics. 2014;57(2):210-8

¹⁰ van Ooij PJ, van Hulst RA, Houtkooper A, van der Weide TJ, Sterk PJ, Lung function before and after oxygen diving: a randomized crossover study. In Undersea Hyperb Med. 2012 May-Jun;39(3):699-707

¹¹ van Ooij PJ, van Hulst RA, Houtkooper A, Sterk PJ, Differences in spirometry and diffusing capacity after a 3-h wet or dry oxygen dive with a PO₂ of 150 kPa. In Clin Physiol Funct Imaging. 2011 Sep;31(5):405-10

-
- ¹² Počekutova IA, Korenbaum VI, Acoustical estimation of impact of single dive in closed-type breathing apparatus on human ventilatory lung function in *Fiziol Cheloveka*. 2011 May-Jun;37(3):76-82.
- ¹³ Fock A, Harris R, Slade M, Oxygen exposure and toxicity in recreational technical divers. In *Diving Hyperb Med*. 2013 Jun;43(2):67-71
- ¹⁴ Eskurza I, Kahn ZD, Seals DR, Xanthine oxidase does not contribute to impaired peripheral conduit artery endothelium-dependent dilatation with ageing. In *J Physiol*. 2006 Mar 15;571(Pt 3):661-8
- ¹⁵ Wu J, Xia S, Kalionis B, Wan W, Sun T, The role of oxidative stress and inflammation in cardiovascular aging in *Biomed Res Int*. 2014;2014:615312 doi: 10.1155/2014/615312. Epub 2014 Jul 20
- ¹⁶ Brubakk AO, Duplancic D, Valic Z, Palada I, Obad A, Bakovic D, Wisloff U, Dujic Z, A single air dive reduces arterial endothelial function in man in *J Physiol*. 2005 Aug 1;566(Pt 3):901-6
- ¹⁷ http://www.vdst.de/fileadmin/dateien/Downloads/Nitrox/Allg/2016_VDST_Standardgase_Trimix.pdf
- ¹⁸ Obad A, Marinovic J, Ljubkovic M, Breskovic T, Modun D, Boban M, Dujic Z, Successive deep dives impair endothelial function and enhance oxidative stress in man in *Clin Physiol Funct Imaging*. 2010 Nov;30(6):432-8
- ¹⁹ Marinovic J, Ljubkovic M, Breskovic T, Gunjaca G, Obad A, Modun D, Bilopavlovic N, Tsikas D, Dujic Z, Effects of successive air and nitrox dives on human vascular function in *Eur J Appl Physiol*. 2012 Jun;112(6):2131-7
- ²⁰ Brubakk AO, Ross JA, Thom SR, Saturation diving; physiology and pathophysiology in *Compr Physiol*. 2014 Jul;4(3):1229-72
- ²¹ <http://www.chemie.de/lexikon/Henry-Gesetz.html>
- ²² Papadopoulou V, Tang MX, Balestra C, Eckersley RJ, Karapantsios TD, Circulatory bubble dynamics: from physical to biological aspects in *Adv Colloid Interface Sci*. 2014 Apr;206:239-49
- ²³ Baj Z, Olszański R, Majewska E, Konarski M, flow cytometry. The effect of air and nitrox divers on platelet activation tested by in *Aviat Space Environ Med*. 2000 Sep;71(9):925-8
- ²⁴ http://www.encyclopedia.com/topic/John_Scott_Haldane.aspx

-
- ²⁵ Swan JG, Wilbur JC, Moodie KL, Kane SA, Knaus DA, Phillips SD, Beach TL, Fellows AM, Magari PJ, Buckley JC, Microbubbles are detected prior to larger bubbles following decompression in *J Appl Physiol* (1985). 2014 Apr 1;116(7):790-6
- ²⁶ Kobayashi K, Experimental studies of the effects of enriched air nitrox dive on shortening of decompression time and reduction of risks of decompression sickness in *Sangyo Igaku*. 1993 Jul;35(4):294-301
- ²⁷ Thom SR, Milovanova TN, Bogush M, Yang M, Bhopale VM, Pollock NW, Ljubkovic M, Denoble P, Madden D, Lozo M, Dujic Z, Bubbles, microparticles, and neutrophil activation: changes with exercise level and breathing gas during open-water SCUBA diving in *J Appl Physiol* (1985). 2013 May 15;114(10):1396-405
- ²⁸ Grover CA, Grover DH, Albert Behnke: nitrogen narcosis. In *J Emerg Med*. 2014 Feb;46(2):225-7. doi: 10.1016/j.jemermed.2013.08.080. Epub 2013 Nov 19.
- ²⁹ Kneller W, Hobbs M, The levels of processing effect under nitrogen narcosis in *Undersea Hyperb Med*. 2013 May-Jun;40(3):239-45
- ³⁰ Turle N, Saget A, Zouani B, Risso JJ, Neurochemical studies of narcosis: a comparison between the effects of nitrous oxide and hyperbaric nitrogen on the dopaminergic nigro-striatal pathway in *Neurochem Res*. 1998 Jul;23(7):997-1003
- ³¹ Eckert WG. *J Fla Med Assoc*. 1967 Oct;54(10):940
- ³² Clark JE, Moving in extreme environments: inert gas narcosis and underwater activities in *Extrem Physiol Med*. 2015 Feb 24;4:1.
- ³³ Hobbs MB, Impairment from gas narcosis when breathing air and enriched air nitrox underwater in *Aviat Space Environ Med*. 2014 Nov;85(11):1121-4.
- ³⁴ Hobbs M, Higham PA, Kneller W, Memory and metacognition in dangerous situations: investigating cognitive impairment from gas narcosis in undersea divers in *Hum Factors*. 2014 Jun;56(4):696-709
- ³⁵ Rostain JC, Balon N, Diving: barometric pressure and neurochemical mechanisms in *J Soc Biol*. 2006;200(3):257-63
- ³⁶ Moskovitz Y, Yang H, Modelling of noble anaesthetic gases and high hydrostatic pressure effects in lipid bilayers in *Soft Matter*. 2015 Mar 21;11(11):2125-38
- ³⁷ Miller KW, The opposing physiological effects of high pressures and inert gases in *Fed Proc*. 1977 Apr;36(5):1663-7
- ³⁸ Rostain JC, Balon N, Recent neurochemical basis of inert gas narcosis and pressure effects in *Undersea Hyperb Med*. 2006 May-Jun;33(3):197-204

-
- ³⁹ http://www.vdst.de/fileadmin/dateien/Downloads/Nitrox/Allg/2016_VDST_Standardgase_Nitrox.pdf
- ⁴⁰ J. Winkler, A. Hagert-Winkler, H. Wirtz, G. Hoheisel, Die moderne Impulsoszillometrie im Spektrum lungenfunktioneller Messmethoden in Pneumologie 2009; 63: 465–467
- ⁴¹ J. Winkler, A. Hagert-Winkler, H. Wirtz, J. Schauer, T. Kahn, G. Hoheisel, Die Impulsoszillometrie in der Schweregraddiagnostik obstruktiver Lungenerkrankungen^{1,2,3}, in Pneumologie 2009; 63: 266
- ⁴² Hans-Jürgen Smith, Durchführung und klinische Interpretation der Oszillometrie, S.27
- ⁴³ Hans-Jürgen Smith, Durchführung und klinische Interpretation der Oszillometrie, S. 34-35
- ⁴⁴ Stiff F, Dammers R, Tordoir J, Hoeks A, Real-time registration of flow-mediated dilatation for the assessment of endothelial function in Ultraschall Med. 2003 Feb;24(1):34-9
- ⁴⁵ Powell MR, Thoma W, Fust HD, Cabarro P, Gas phase formation and Doppler monitoring during decompression with elevated oxygen in Undersea Biomed Res. 1983 Sep;10(3):217-24.
- ⁴⁶ Kristensen JK, Henriksen O, Excess cumulative blood flow and repayment during reactive hyperemia in human cutaneous tissue. In Acta Physiol Scand. 1980 Jan;108(1):1-6
- ⁴⁷ Amra B, Borougeni VB, Golshan M, Soltaninejad F, Pulmonary function tests and impulse oscillometry in severe chronic obstructive pulmonary disease patients' offspring. In J Res Med Sci. 2015 Jul;20(7):697-700
- ⁴⁸ Gong SG, Yang WL, Liu JM, Liu WZ, Zheng W, Change in pulmonary function in chronic obstructive pulmonary disease stage 0 patients. In Int J Clin Exp Med. 2015 Nov 15;8(11):21400-6
- ⁴⁹ Bakovic D, Glavas D, Palada I, Breskovic T, Fabijanic D, Obad A, Valic Z, Brubakk AO, Dujic Z, High-grade bubbles in left and right heart in an asymptomatic diver at rest after surfacing. In Aviat Space Environ Med. 2008 Jun;79(6):626-8
- ⁵⁰ Marabotti C, Scalzini A, Chiesa F, Increase of pulmonary arterial pressure in subjects with venous gas emboli after uncomplicated recreational SCUBA diving. In Respir Med. 2013 Apr;107(4):596-600

-
- ⁵¹ Schwerzmann M, Seiler C, Recreational scuba diving, patent foramen ovale and their associated risks. In *Swiss Med Wkly*. 2001 Jun 30;131(25-26):365-74
- ⁵² Chen YL, Li D, Wang ZZ, Xu WG, Li RP, Zhang JD, Glutamate metabolism of astrocytes during hyperbaric oxygen exposure and its effects on central nervous system oxygen toxicity. In *Neuroreport*. 2016 Jan 20;27(2):73-9
- ⁵³ Seeger W, Lepper H, Wolf HR, Neuhof H, Alteration of alveolar surfactant function after exposure to oxidative stress and to oxygenated and native arachidonic acid in vitro. In *Biochim Biophys Acta*. 1985 Jun 14;835(1):58-67
- ⁵⁴ Robert F. Schmidt, Florian Lang, Gerhard Thews (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. 28. Auflage. Springer, Berlin Heidelberg New York 2000, ISBN 3-540-66733-4, S. 522ff
- ⁵⁵ Jagathesan R, Barnes E, Rosen SD, Foale RA, Camici PG, Comparison of myocardial blood flow and coronary flow reserve during dobutamine and adenosine stress: Implications for pharmacologic stress testing in coronary artery disease. In *J Nucl Cardiol*. 2006 May-Jun;13(3):324-32
- ⁵⁶ Jang HJ, Koo BK, Lee HS, Park JB, Kim JH, Seo MK, Yang HM, Park KW, Nam CW, Doh JH, Kim HS, Kim HSSafety and efficacy of a novel hyperaemic agent, intracoronary nicorandil, for invasive physiological assessments in the cardiac catheterization laboratory. In *Eur Heart J*. 2013 Jul;34(27):2055-62
- ⁵⁷ Møllerløkken A, Blogg SL, Doolette DJ, Nishi RY, Pollock NW. Consensus guidelines for the use of ultrasound for diving research. In *Diving and Hyperbaric Medicine*. 2016 March;46(1):26-32
- ⁵⁸ Castagna O, Gempp E, Blatteau JE, Pre-dive normobaric oxygen reduces bubble formation in scuba divers. In *Eur J Appl Physiol*. 2009 May;106(2):167-72
- ⁵⁹ Dujic Z, Duplancic D, Marinovic-Terzic I, Bakovic D, Ivancev V, Valic Z, Eterovic D, Petri NM, Wisløff U, Brubakk AO, Aerobic exercise before diving reduces venous gas bubble formation in humans. In *J Physiol*. 2004 Mar 16;555(Pt 3):637-42
- ⁶⁰ Sicko, Kot J, Doboszyński T, The maximum tissue half-time for nitrogen elimination from divers' body. In *Int Marit Health*. 2003;54(1-4):108-16
- ⁶¹ Thomas Kromp, Hans J. Roggenbach, Peter Bredebusch: *Praxis des Tauchens*. Delius Klasing Verlag (Edition Nagelschmid), Stuttgart 2007, ISBN 978-3-7688-1816-2
- ⁶² Petri NM, Change in strategy of solving psychological tests: evidence of nitrogen narcosis in shallow air-diving. In *Undersea Hyperb Med*. 2003 Winter;30(4):293-303

-
- ⁶³ Helmstaedter. Verbaler Lern- und Merkfähigkeitstest. Göttingen: Beltz Test GmbH; 2001
- ⁶⁴ Balestra C, Lafere P, Germonpre P. Persistence of critical flicker fusion frequency impairment after a 33 mfw SCUBA dive: evidence of prolonged nitrogen narcosis? *Eur J Appl Physiol*. 2012 Dec;112(12):4063–8
- ⁶⁵ Brebeck A-K, Deussen A, Balestra C, Schipke JD. Effects of oxygen-enriched air on cognitive performance during SCUBA-diving – an open-water study –. *Res Sports Med*. 2016;in Druck
- ⁶⁶ Malberg H. Meteorologie und Klimatologie: Eine Einführung. 5. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer; 2007
- ⁶⁷ Lambrechts K, Germonpre P, Charbel B, Cialoni D, Musimu P, Sponsiello N, et al. Ultrasound lung “comets” increase after breath-hold diving. *Eur J Appl Physiol*. 2011 Apr;111(4):707–13
- ⁶⁸ Mitchell SJ, Bove AA. Medical screening of recreational divers for cardiovascular disease: consensus discussion at the Divers Alert Network Fatality Workshop. *Undersea Hyperb Med J Undersea Hyperb Med Soc Inc*. 2011 Aug;38(4):289–96
- ⁶⁹ Doering K, Muth T, Schipke JD. Effects of recreational tech diving on measures of respiration. In Gdansk, PL; 2011
- ⁷⁰ Smerz RW. The relationship of decongestant use and risk of decompression sickness; a case-control study of Hawaiian scuba divers. *Hawaii J Med Public Health J Asia Pac Med Public Health*. 2014 Feb;73(2):61–5
- ⁷¹ Feldmann, Drasgow. Visual Verbal Test. 1959
- ⁷² Oswald, Roth. ZVT - Zahlen-Verbindungs-Test. 2. Aufl. 1987.
- ⁷³ Chess GF, Tam RMK, Calaresu FR. Influence of cardiac neural inputs on rhythmic variations of heart period in the cat. *Am J Physiol*1975;228:775–80
- ⁷⁴ Hirsch JA, Bishop B. Respiratory sinus arrhythmia in humans: how breathing pattern modulates heart rate. *Am J Physiol*1981;241:H620–9
- ⁷⁵ Bigger JT, Fleiss JL, Rolnitzky LM, et al. Stability over time of heart period variability in patients with previous myocardial infarction and ventricular arrhythmias. *Am J Cardiol*1992;69:718–23
- ⁷⁶ Appel ML, Berger RD, Saul JP, et al. Beat to beat variability in cardiovascular variables: noise or music? *J Am Coll Cardiol*1989;14:1139–48

-
- ⁷⁷ Malliani A, Pagani M, Lombardi F, et al. Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain. *Circulation*1991;84:482–92
- ⁷⁸ Malik M, Camm AJ. Heart rate variability and clinical cardiology. *Br Heart J*1994;71:3–6
- ⁷⁹ Kamath MV, Fallen EL. Power spectral analysis of heart rate variability: a noninvasive signature of cardiac autonomic function. *Crit Rev Biomed Eng*1993;21:245–311
- ⁸⁰ Schwartz PJ, De Ferrari GM. The influence of the autonomic nervous system on sudden cardiac death. *Cardiology*1987;74:297–309
- ⁸¹ Goldberger AL. Is the normal heartbeat chaotic or homeostatic? *News in Physiological Sciences*1991;6:87–91
- ⁸² Lown B. Neural activity and ventricular fibrillation. *N Engl J Med*1976;294:1165–70
- ⁸³ Cripps TR, Malik M, Farrell TG, et al. Prognostic value of reduced heart rate variability after myocardial infarction: clinical evaluation of a new analysis method. *Br Heart J*1992;65:14–19
- ⁸⁴ Algra A, Tijssen JGP, Roelandt JRTC, et al. Heart rate variability from 24-hour electrocardiography and the 2-year risk for sudden death. *Circulation*1993;88:180–5
- ⁸⁵ Brachmann J, Schweizer M, Hilbel T, et al. Stellenwert neuer Verfahren zur Diagnoseverbesserung bei ventrikulären tachykarden Arrhythmien. *Internist*1993;34:417–22
- ⁸⁶ Esperer HD. Die Herzfrequenzvariabilität, ein neuer Parameter für die nichtinvasive Risikostratifizierung nach Myokardinfarkt und arrhythmogener Synkope. *Herzschr Elektrophys*1992;3:1–16
- ⁸⁷ Pagani M, Lombardi F, Guzzetti S, et al. Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog. *Circ Res*1986;59:178–93
- ⁸⁸ Bianchi A, Bontempi B, Cerutti S, et al. Spectral analysis of heart rate variability signal and respiration in diabetic subjects. *Med Biol Eng Comput*1990;28:205–11
- ⁸⁹ Hong SK, Moore TO, Seto G, et al. Lung volumes and apneic bradycardia in divers. *J Appl Physiol*1970;29:172–6
- ⁹⁰ Moore TO, Lin YC, Lally DA, et al. Effects of temperature, immersion, and ambient pressure on human apneic bradycardia. *J Appl Physiol*1972;33:36–41

-
- ⁹¹ Lund V, Kentala E, Scheinin H, Klossner J, Sariola-Heinonen K, Jalonen J. Hyperbaric oxygen increases parasympathetic activity in professional divers. *Acta Physiol Scand*. 2000 Sep;170(1):39–44
- ⁹² Lund V, Laine J, Laitio T, Kentala E, Jalonen J, Scheinin H. Instantaneous beat-to-beat variability reflects vagal tone during hyperbaric hyperoxia. *Undersea Hyperb Med J Undersea Hyperb Med Soc Inc*. 2003 Spring;30(1):29–36
- ⁹³ Winklewski PJ, Kot J, Frydrychowski AF, Nuckowska MK, Tkachenko Y. Effects of diving and oxygen on autonomic nervous system and cerebral blood flow. *Diving Hyperb Med*. 2013 Sep;43(3):148–56
- ⁹⁴ 002/042 – S2k-Leitlinie: Nutzung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität in der Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft, aktueller Stand: 06/2014
- ⁹⁵ Task Force of The European Society of Cardiology, The North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability. *Eur Heart J*1996;17:354–81
- ⁹⁶ Molgaard H, Sorensen KE, Bjerregaard P. Circadian variation and influence of risk factors on heart rate variability in healthy subjects. *Am J Cardiol*. 1991 Sep 15;68(8):777–84.
- ⁹⁷ Saul JP, Arai Y, Berger RD, et al. Assessment of autonomic regulation in chronic congestive heart failure by heart rate spectral analysis. *Am J Cardiol*1988;61:1292–9
- ⁹⁸ Breuer H-WM, Skyschally A, Schulz R, et al. Heart rate variability and circulating catecholamine concentrations during steady state exercise in healthy volunteers. *Br Heart J*1993;70:144–9
- ⁹⁹ Bigger JT, Fleiss JL, Steinman RC, et al. Correlations among time and frequency domain measures of heart period variability two weeks after acute myocardial infarction. *Am J Cardiol*1992;69:891–8
- ¹⁰⁰ Hayano J, Sakakibara Y, Yamada A, et al. Accuracy of assessment of cardiac vagal tone by heart rate variability in normal subjects. *Am J Cardiol*1991;67:199–204
- ¹⁰¹ Guzzetti S, Piccaluga E, Casati R, et al. Sympathetic predominance in essential hypertension: a study employing spectral analysis of heart rate variability. *J Hypertens*1988;6:711–17
- ¹⁰² Lombardi F, Sandrone G, Pernpruner S, et al. Heart rate variability as an index of sympathovagal interaction after acute myocardial infarction. *Am J Cardiol*1987;60:1239–45

-
- ¹⁰³ Bigger JT, Jr, Fleiss JL, Rolnitzky LM, et al. Time course of recovery of heart period variability after myocardial infarction. *J Am Coll Cardiol* 1991;18:1643–9
- ¹⁰⁴ Katona PG, Jih F. Respiratory sinus arrhythmia: noninvasive measure of parasympathetic cardiac control. *J Appl Physiol* 1975;39:801–5
- ¹⁰⁵ Gang Y, Malik M. Heart rate variability in critical care medicine. *Curr Opin Crit Care*. 2002 Oct;8(5):371–5
- ¹⁰⁶ Handa R, Poanta L, Rusu D, Albu A. The role of heart rate variability in assessing the evolution of patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Romanian J Intern Med Rev Roum Med Interne*. 2012 Mar;50(1):83–8
- ¹⁰⁷ Oliveira NL, Ribeiro F, Alves AJ, Teixeira M, Miranda F, Oliveira J. Heart rate variability in myocardial infarction patients: effects of exercise training. *Rev Port Cardiol Orgao Of Soc Port Cardiol Port J Cardiol Off J Port Soc Cardiol*. 2013 Sep;32(9):687–700.
- ¹⁰⁸ Prinsloo GE, Rauch HGL, Derman WE. A brief review and clinical application of heart rate variability biofeedback in sports, exercise, and rehabilitation medicine. *Phys Sportsmed*. 2014 May;42(2):88–99
- ¹⁰⁹ Dekker JM, Crow RS, Folsom AR, Hannan PJ, Liao D, Swenne CA, et al. Low heart rate variability in a 2-minute rhythm strip predicts risk of coronary heart disease and mortality from several causes: the ARIC Study. *Atherosclerosis Risk In Communities. Circulation*. 2000a Sep 12;102(11):1239–44
- ¹¹⁰ Sim CS, Sung JH, Cheon SH, Lee JM, Lee JW, Lee J. The effects of different noise types on heart rate variability in men. *Yonsei Med J*. 2015 Jan;56(1):235–43
- ¹¹¹ Garza JL, Cavallari JM, Eijkelhof BHW, Huysmans MA, Thamsuwan O, Johnson PW, et al. Office workers with high effort-reward imbalance and overcommitment have greater decreases in heart rate variability over a 2-h working period. *Int Arch Occup Environ Health*. 2015 Jul;88(5):565–75
- ¹¹² Kurita A, Nagayoshi H, Okamoto Y, Takase B, Ishizuka T, Oiwa H. Effects of severe hyperbaric pressure on autonomic nerve functions. *Mil Med*. 2002 Nov;167(11):934–8
- ¹¹³ Hirayanagi K, Nakabayashi K, Okonogi K, Ohiwa H. Autonomic nervous activity and stress hormones induced by hyperbaric saturation diving. *Undersea Hyperb Med J Undersea Hyperb Med Soc Inc*. 2003 Spring;30(1):47–55
- ¹¹⁴ Hottenrott K, Hoos O, Esperer HD. [Heart rate variability and physical exercise. Current status]. *Herz*. 2006 Sep;31(6):544–52

-
- ¹¹⁵ Plews DJ, Laursen PB, Stanley J, Kilding AE, Buchheit M. Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: opening the door to effective monitoring. *Sports Med Auckl NZ*. 2013 Sep;43(9):773–81
- ¹¹⁶ Koenig J, Jarczok MN, Wasner M, Hillecke TK, Thayer JF. Heart rate variability and swimming. *Sports Med Auckl NZ*. 2014 Oct;44(10):1377–91
- ¹¹⁷ Barbosa E, Garcia-Manso JM, Martin-Gonzalez JM, Sarmiento S, Calderon FJ, Da Silva-Grigoletto ME. 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*. 2010 Jan;175(1):61–4
- ¹¹⁸ Pelzer M, Hafner D, Arnold G, Schipke JD. [Minimal interval length for safe determination of brief heart rate variability]. *Z Kardiol*. 1995 Dec;84(12):986–94
- ¹¹⁹ Schipke JD, Pelzer M. Effect of immersion, submersion, and scuba diving on heart rate variability. *Br J Sports Med*. 2001 Jun;35(3):174–80
- ¹²⁰ Rehner F. Herzfrequenzvariabilität (HRV) bei Tauchen mit Pressluft - Ein Vergleich zwischen Schwimmbad- und realen Freiwasserbedingungen. [Kiel]: CA Univerität; 2013
- ¹²¹ Biersner RJ. Emotional and physiological effects of nitrous oxide and hyperbaric air narcosis. *Aviat Space Environ Med*. 1987 Jan;58(1):34–8
- ¹²² Bert P, Hitchcock MA, Hitchcock FA. Barometric pressure: Researches in Experimental Physiology. first published in French, 1878, Paul Bert [Internet]. Columbus US: College Book Company; 1943 [cited 2016 Aug 19]. Available from: from: https://en.wikipedia.org/wiki/Paul_Bert
- ¹²³ Al-Ani M, Powell L, West J, Townend J, Coote JH. Exercise and diving, two conflicting stimuli influencing cardiac vagal tone in man. *J Physiol*. 1995 Dec 1;489 (Pt 2):603–12
- ¹²⁴ Chouchou F, Pichot V, Garet M, Barthelemy J-C, Roche F. Dominance in cardiac parasympathetic activity during real recreational SCUBA diving. *Eur J Appl Physiol*. 2009 Jun;106(3):345–52
- ¹²⁵ Shibata S, Iwasaki K-I, Ogawa Y, Kato J, Ogawa S. Cardiovascular neuroregulation during acute exposure to 40, 70, and 100% oxygen at sea level. *Aviat Space Environ Med*. 2005 Dec;76(12):1105–10.

¹²⁶ Sztajzel J. Heart rate variability: a noninvasive electrocardiographic method to measure the autonomic nervous system. *Swiss Med Wkly.* 2004 Sep 4;134(35–36):514–22

¹²⁷ Eckenhoff RG, Knight DR. Cardiac arrhythmias and heart rate changes in prolonged hyperbaric air exposures. *Undersea Biomed Res.* 1984 Dec;11(4):355–67

¹²⁸ Arieli R, Arieli Y, Daskalovic Y, Eynan M, Abramovich A. CNS oxygen toxicity in closed-circuit diving: signs and symptoms before loss of consciousness. In *Aviat Space Environ Med.* 2006 Nov;77(11):1153-7.

¹²⁹ Souday V, Koning NJ, Perez B, Grelon F, Mercat A, Boer C, Seegers V, Radermacher P, Asfar P, Enriched Air Nitrox Breathing Reduces Venous Gas Bubbles after Simulated SCUBA Diving: A Double-Blind Cross-Over Randomized Trial. In *PLoS One.* 2016 May 10;11(5)

7. Eidesstattliche Versicherung

„Ich, **André Zenske**, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: **Auswirkungen von Sauerstoff angereichertem Atemgas auf Sporttaucher - eine Feldstudie -** selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers/der betreuenden Hochschullehrerin

Unterschrift des Doktoranden/der Doktorandin

8. Danksagung

Diese Arbeit ist meiner lieben Frau Barbara gewidmet, die so viele Stunden auf mich verzichten musste und mich geduldig durch ihren Optimismus unterstützte.

Ich danke Prof. Dr. JD Schipke für seine unermüdliche Hilfe und konstruktive Kritik.

9. Kongressbeiträge:

- 9.1** 93. Annual meeting of the DPG, Mainz 2014
(„Oxygen-Enriched Air: Is it bad for the diver?“)
- 9.2** 40. Annual Meeting of the EUBS and GTÜM Kongress 2014, Wiesbaden
(„How to assess autonomic balance during SCUBA diving?“)
- 9.3** EUBS Kongress Genf, 2016
(„Is nitrox dangerous for the recreational diver?“)

10. Finanzielle Unterstützung:

Die deutsche Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin, GTÜM e. V., unterstützte diese Studie finanziell und ermöglichte so, medizintechnische Geräte zu leihen beziehungsweise die druck- und wasserfesten Gehäuse für die EKG-Ableitungen unter Wasser zu konstruieren und zu bauen. Die GTÜM nahm zu keiner Zeit der Studientauchgänge oder Untersuchungen Einfluss auf die Arbeiten. Ein privater Vorteil für den Studienleiter und die Mitarbeiter war ausgeschlossen.

11. Lebenslauf:

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.