

Universitätsklinikum Ulm
Klinik für Anästhesiologie

Ärztlicher Direktor: Prof. Dr. med. Dr. med. h. c. Michael Georgieff

**AUSWIRKUNG VON WIEDERHOLT DURCHGEFÜHRTEN
APNOETAUCHGÄNGEN AUF DIE GRÖÖE DER MILZ, DIE
GESAMTHÄMOGLOBINMENGE UND DAS GESAMTE
BLUTVOLUMEN**

Dissertation

Zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin

Der Medizinischen Fakultät der Universität Ulm

vorgelegt von

Eva Harasta

2010

Amtierender Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Thomas Wirth

1. Begutachter: Prof. Dr. Dr. h. c. P. Radermacher
2. Begutachter: Prof. Dr. J. M. Steinacker
1. Wahlprüfer: Prof. Dr. E. Calcia
2. Wahlprüfer: PD. Dr. C.- M. Muth

vorgelegt am: 16.12.2010

Widmung

Diese Arbeit widme ich meinen Eltern, die mich während meines gesamten Studiums stets tatkräftig unterstützt und in schweren Zeiten motiviert haben. Ohne Ihre Hilfe und Ihr stets großes Verständnis wäre dieses Studium sowie diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Vielen Dank für alles!

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	
1. Einleitung	1
2. Material und Methoden	4
2.1. Allgemeines	4
2.2. Studienprotokoll	6
2.3. Messungen und Berechnungen	11
2.3.1. Die optimierte CO-Rückatmungsmethode	12
2.3.2. Vermessung der Milz	16
2.4. Statistische Analyse	19
3. Ergebnisse	20
3.1. Ergebnisse der Apnoeserien	20
3.2. Ergebnisse der Milzvermessungen	20
3.3. Ergebnisse der Blutanalyse	22
4. Diskussion	25
4.1. Kontraktion der Milz	25
4.2. Änderung der Blutparameter	28
5. Zusammenfassung	34
6. Literatur	36
7. Anhang	39
Danksagung	39
Curriculum Vitae	40

Abkürzungsverzeichnis

$\Delta\text{HbCO}\%$:	Differenz des Kohlenmonoxid gebundenen Hämoglobinanteils vor und nach der Kohlenmonoxid-Applikation
A_{Milz} :	Milzfläche = transversal liegende Schnittfläche der Milz in cm^2 berechnet aus dem Produkt Länge x Breite, Größe zur Berechnung des Milzvolumens
AIDA international	International Association For The Development Of Freediving: ist der größte anerkannte Verband für das Wettkampf-Freitauchen. Diese Organisation ratifiziert unter anderem die weltweit anerkannten Rekorde
BV	Blutvolumen in [ml] = $(\text{tHb} \cdot 100) \cdot ([\text{Hb}] \cdot 0,91)^{-1}$
CO	chemisch Kohlenmonoxid
CO ₂	chemisch Kohlendioxid
DLRG	Deutsche Lebens-Rettungs-Gesellschaft
Hb	Hämoglobinkonzentration in $[\text{g} \cdot \text{L}^{-1}]$
Hkt	Hämatokrit, dieser Wert gibt den Anteil der zellulären Bestandteile am Volumen des Blutes an und ist ein Maß für die Viskosität des Blutes. angegeben in %
$K_{\text{Druck/T}}$	Konstante
MCHC	mean corpuscular haemoglobin concentration = mittlerer, zellulärer Hämoglobingehalt eines Erythrozyten
M_{CO}	jeweils das insgesamt verabreichte CO Volumen, abzüglich des nicht aufgenommenen CO Volumens (hier: Summe aus dem im Spirometer verbliebenen- und dem abgeatmeten CO-Volumen)
O ₂	chemisch Sauerstoff
PV	Plasmavolumen in [ml] = $\text{BV} - \text{RCV}$
RCV	Erythrozytenvolumen angegeben in [ml] = $\text{tHb} \cdot \text{MCHC}^{-1} \cdot 100$
RV	Residualvolumen, statische Lungengröße in [Liter]
tHb-mass	total haemoglobin-mass = Gesamthämoglobinmenge angegeben in [ml] bzw. in $[\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}]$
TLC	totale Lungenkapazität, statische Lungengröße in [Liter]
VCO_{adm}	ins Spirometriesystem applizierte CO-Menge
VCO_{exh} (nach Abkopplung)	nach Abkopplung vom Spirometer, ausgeatmetes CO-Volumen
$\text{VCO}_{\text{System+Lunge}}$ (nach Abkopplung)	$[\text{CO}]_{(\text{System})} \cdot (\text{V}_{(\text{System})} + \text{V}_{(\text{Residualvolumen})})$
V_{Milz}	Milzvolumen in [ml] = $7,53 \cdot A_{\text{Milz}} - 77,56$

1. Einleitung

Das Apnoetauchen [9, 25], also das Tauchen mit angehaltenem Atem, ist die ursprünglichste Form des Tauchens und wird auch in der heutigen Zeit noch oft praktiziert: zum einen von hauptberuflichen Apnoetauchern, die während ihrer mehrstündigen Arbeitszeit 150-250 mal über 1 bis 2 Minuten lang in 5 bis 20 Metern Tiefe tauchen, um sich ihren Lebensunterhalt zu verdienen, zum anderen im Zusammenhang mit der immer populärer werdenden Extremsportart, in der in vielfacher Weise versucht wird, die Grenzen des menschlich Möglichen zu erreichen und dabei immer tiefer, länger oder weiter zu tauchen.

So wurden bisher eine maximale Tiefe von 214 Metern bzw. eine Tauchzeit von 11 Minuten 35 Sekunden [1] erreicht. Beim Streckentauchen wurden bislang Distanzen von 213 Metern (ohne Flossen) bzw. 250 Metern (mit Flossen) zurückgelegt [1].

Meeressäuger, die unangefochtenen Meister in dieser Disziplin, übertreffen die von Menschen erbrachten Höchstleistungen bei weitem, wie das Beispiel der Weddell-Robbe zeigt. Sie ist in der Lage, etwa 600 Meter tief und bis zu einer Stunde lang zu tauchen. Durch Untersuchungen weiß man inzwischen, dass sich während der Apnoephase die Milz bei diesen Meeressäugern kontrahiert und dies zu einem deutlichen Anstieg des Blutvolumens führt [17, 34], da bei diesen Tieren das in der Milz gespeicherte Blut etwa 50% des gesamten Blutvolumens ausmacht [17, 31].

In mehreren Studien, die an Probanden nach wiederholten Apnoetauchgängen durchgeführt wurden, konnte eine Kontraktion der Milz und ein damit in Einklang stehender Anstieg der Hämoglobinkonzentration nachgewiesen werden- sowohl bei Versuchen mit Immersion des menschlichen Gesichts in Wasser [1, 2, 7] als auch ohne [27, 28].

Seit der Auswertung von Untersuchungen an splenektomierten Probanden, bei denen ein solcher Hämoglobinanstieg ausgeblieben war [1, 27], betrachtet man die Milz auch beim Menschen als einen Erythrozyten- bzw. Blutspeicher, der zu einer Verlängerung der Apnoedauer beiträgt [1, 2, 27].

Bei weiteren Untersuchungen der Milz an freiwilligen Probanden [7, 28] zeigte sich jedoch auch, dass dieser Anstieg der Hämoglobinkonzentration nur von kurzer

Dauer war und innerhalb von 2 bis 10 Minuten nach der Apnoephase wieder verschwand.

Die menschliche Milz kann im Durchschnitt ein Volumen von etwa 200ml Blut [31] aufnehmen, daher kann eine Kontraktion dieses Organs nur einen geringen Anstieg der Erythrozytenkonzentration um lediglich 3 bis 5 % bewirken.

Die Überprüfung einer solch geringen Veränderung ist sehr schwierig und technisch äußerst aufwendig. Die Kinetik der Erythrozytenfreisetzung und der Wiederaufnahme durch die Milz wird durch die benötigte Messdauer der gängig verwendeten Messmethoden zur quantitativen Bestimmung der Gesamthämoglobinmenge (tHb-mass) beeinträchtigt [13].

Eine nachvollziehbare Methode zur Bestimmung der Erythrozytenfreisetzung aus der Milz ist die Bestimmung der Hämoglobinkonzentration ([Hb]). Dieser Hämoglobinanstieg könnte allerdings von der Immersion in Wasser bedingten Blutkonzentrierung als Folge einer immersionsbedingten Diurese beeinflusst sein [32, 6].

Diese Studie soll zwei Sachverhalte untersuchen und klären:

1. Den Einfluss in Wasser wiederholt durchgeführter Apnoetauchgänge auf die Größe der Milz und die Hämoglobinkonzentration ([Hb]) zu untersuchen.

Eine Apnoezeit von 9 Minuten benötigt eine große Menge gespeicherten Sauerstoffs, um das Gehirn und den übrigen Organismus während dieser Zeit ausreichend mit dem lebensnotwendigen Sauerstoff zu versorgen.

Die Lunge stellt hierbei den größten Sauerstoffspeicher dar: Das Lungenvolumen wurde daher eng mit den Leistungen im Tauchsport verbunden. [24, 9, 23]. Besonders trainierte Apnoetaucher aus dem „Profibereich“ besitzen ein überdurchschnittlich großes Lungenvolumen [25]. Die Anpassung der Gesamthämoglobinmenge (tHb-mass) könnte daher mit der vermehrten Sauerstoffverfügbarkeit zusammenhängen.

Diese Art der Anpassung ist bei den Ausdauersportlern bestens bekannt, die 40 bis 50% mehr Hämoglobin als untrainierte Personen besitzen [15], doch beim Apnoetauchen liegen bislang keine gesicherten Daten vor.

2. Die Gesamthämoglobinmenge (tHb-mass) quantitativ bei speziell apnoetrainierten Tauchern zu bestimmen. Diese Werte wurden mit denjenigen, der in Langzeitapnoe nicht trainierten Gerätetauchern der Kontrollgruppe verglichen ebenso wie mit den Werten von

ausdauertrainierten Sportlern wie auch mit denjenigen Werten von untrainierten nicht-tauchenden Personen.

Zu diesem Zweck wurde zum einen die Gesamthämoglobinmenge (tHb-mass) gemessen zu anderen der Einfluss auf das Plasmavolumen untersucht. Die Größe der Milz sowie ihr Volumen wurde sonografisch bestimmt [18, 20]. Die Gesamthämoglobinmenge unter Verwendung der erst kürzlich beschriebenen optimierten CO-Rückatmungsmethode [29] gemessen.

Die letztgenannte weiterentwickelte Messtechnik erlaubte es, die Gesamthämoglobinmenge, d.h. das Gesamtblutvolumen sowie das Plasmavolumen präzise zu bestimmen - unabhängig vom Hämatokritwert und/ oder des Plasmaprotein-gehaltes, die aufgrund einer ständigen Veränderung der Körperwasserverteilung zwischen dem intra- und extravasalen Raum permanenten Schwankungen unterliegen.

2. Material und Methoden

2.1. Allgemeines

Vor Beginn der Studie wurde die Zustimmung der zuständigen Ethik-Kommission benötigt, da diese an Lebewesen (in diesem Fall mit freiwilligen Probanden) durchgeführt wurde. Das Studienprotokoll wurde der Ethik-Kommission der Universität Ulm zur Prüfung vorgelegt und erhielt die notwendige Zustimmung.

Bei dieser Studie handelt es sich um eine prospektive, offene, nicht randomisierte experimentelle Arbeit, das im einzelnen folgendes bedeutet:

Es wurden keine Daten aus bereits bestehenden Unterlagen aus vorangegangenen Studien oder Experimenten verwendet und im Nachhinein ausgewertet. Sämtliche Größen und Messwerte wurden stattdessen aus der eigens zu diesem Zweck im Folgenden genau beschriebenen Studie gewonnen und ausgewertet.

Die Probanden wurden nicht wie in den gängig durchgeführten randomisierten doppelblinden klinischen Studien üblich, nach dem Zufallsprinzip in zwei Gruppen eingeteilt. In vorliegender Studie war dies nicht gegeben, da Untersucher und Probanden von Anfang an wussten ob sie zu der „Placebo“- oder „Verum“-Gruppe gehören.

Es wurden für die Versuchsgruppe gezielt trainierte Apnoetaucher ausgewählt und für die Kontrollgruppe Gerätetaucher ausgesucht, welche im Apnoetauchen nicht trainiert waren. So war von Anfang an allen an dieser Studie beteiligten Personen die Gruppeneinteilung bekannt. Die Datenerhebung erfolgte prospektiv, d.h. erst nach Erstellung des Versuchsprotokolls und Erlaubnis der Ethikkommission, in dem Zeitraum zwischen dem 15.04.2005 und dem 26.06.2005.

Vor der Durchführung wurde jeder einzelne Versuchsteilnehmer umfassend mündlich sowie schriftlich über den gesamten Ablauf und Zielsetzung der Versuche und der sich hieraus ergebenden möglichen Risiken aufgeklärt. Die Einwilligung zur Teilnahme sowie der Entschluss, freiwillig an der Studie mitzuwirken, wurden von allen Probanden handschriftlich festgehalten.

Während der gesamten Zeit herrschte für alle Probanden ein striktes Rauch- und Alkoholverbot, um eine Verfälschung bei der Messung der notwendigen Blutpara-

meter von vorneherein zu verhindern und für alle Versuchspersonen vergleichbare Ausgangsbedingungen zu schaffen.

Eine Gruppe, bestehend aus zehn speziell trainierten Apnoetauchern, bildete die Versuchsgruppe. Sieben erfahrene Gerätetaucher ohne spezielles Apnoetraining, rekrutiert aus Rettungstauchern der Deutschen Lebens-Rettungs-Gesellschaft (DLRG), dienten dieser experimentellen Studie als Kontrollgruppe. Zudem stellte die DLRG sämtliche vor Ort eingesetzten Sicherungstaucher, die während der Durchführung der Apnoetauchgänge die Probanden zu deren größtmöglicher Sicherheit unter Wasser fortlaufend überwachten.

Sämtliche durchgeführten Untersuchungen und notwendigen invasiven Eingriffe zur Gewinnung der gemischtvenösen und kapillären Blutproben wurden ausschließlich an den freiwilligen Probanden während der Durchführung dieser Studie vorgenommen.

Tabelle 1:

Zusammenfassung der anthropometrischen Daten aller untersuchten Probanden. Die Daten sind jeweils angegeben als Mittelwerte \pm Standardabweichung. Das Probandenkollektiv der Versuchsgruppe setzte sich dabei aus sieben männlichen trainierten Apnoetauchern (n=7) und drei weiblichen Apnoetauchern (n=3) zusammen. Die Kontrollgruppe bildeten sieben ausschließlich männliche Gerätetaucher (n=7).

	Apnoetaucher männlich	Apnoetaucher Weiblich	Kontrollgruppe
Alter [Jahre]	35 \pm 9	32 \pm 6	38 \pm 11
Körpergewicht [kg]	76 \pm 4	67 \pm 11	85 \pm 10
Größe [cm]	184 \pm 6	174 \pm 9	180 \pm 6
BMI [kg \cdot m ⁻²]	23 \pm 3	22 \pm 1	25 \pm 3

Die gesammelten anthropometrischen Daten aller 17 Probanden, bestehend aus Alter, Körpergewicht, Größe und BMI, werden in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt.

In Tabelle 2 werden die demografischen und anthropometrischen Daten, statischen Lungengrößen mit Residualvolumen und totaler Lungenkapazität betreffend, sowohl für die Apnoetaucher der Versuchsgruppe (Männer und Frauen gemeinsam) als auch für die Kontrollgruppe, dargestellt.

Des Weiteren werden die kumulative Gesamttauchzeit, die maximale Einzeltauchzeit, die kumulative Oberflächenpause und die Harnausscheidung aufgelistet.

Alle Daten werden hierbei als Mittelwerte \pm Standardabweichung angegeben, um zum einen die Messfehler zu minimieren und zum anderen die Streuung der Messwerte um ihren Mittelwert anzuzeigen.

Sämtliche statischen Lungengrößen wie totale Lungenkapazität (TLC), Residualvolumen (RV) sowie die Lungenfunktion der Versuchsteilnehmer wurden mit Hilfe der Body-Plethysmographie vor Studienbeginn ermittelt.

Tabelle 2:

Darstellung der demografischen und anthropometrischen Daten, der statischen Lungengrößen mit totaler Lungenkapazität (TLC) und Residualvolumen (RV) sowie die kumulative Gesamttauchzeit, die maximale Tauchzeit eines Apnoetauchgangs, die kumulative Oberflächenpause, sowie die Urinausscheidung. Sämtliche Daten, mit Ausnahme des Geschlechts, sind als Mittelwerte \pm Standardabweichung angegeben.

	Apnoetaucher (männlich + weiblich)	Kontrollgruppe	p-Wert
Geschlecht [männlich / weiblich]	7 / 3	7 / 0	
Alter [Jahre]	34 \pm 8	38 \pm 11	0,372
Körpergewicht [kg]	73 \pm 8	85 \pm 10	0,014
Größe [cm]	181 \pm 8	180 \pm 6	0,911
totale Lungenkapazität [Liter]	9,8 \pm 2,3	8,8 \pm 2,1	0,391
Residualvolumen [Liter]	2,2 \pm 0,4	2,6 \pm 1,1	0,377
Gesamttauchzeit [min:sek]	17:02 \pm 2:52	10:43 \pm 2:22	p<0,001
maximale Einzeltauchzeit [min:sek]	3:41 \pm 0:30	2:31 \pm 0:33	p<0,001
Gesamte Oberflächenpause [min:sek]	19:54 \pm 3:00	15:42 \pm 6:48	0,100
Urinausscheidung [ml]	160 \pm 200	122 \pm 116	0,658

2.2. Studienprotokoll:

Für diese Studie wurden die Probanden jeweils an zwei aufeinander folgenden Tagen untersucht. Am ersten Tag (siehe Abb. 1), dem Untersuchungstag, wurden sämtliche zur Ermittlung der Ausgangs- bzw. Referenzwerte notwendigen Voruntersuchungen durchgeführt. Diese bestanden aus dem Erfassen aller relevanten demografischen und anthropometrischen Daten wie Name, Alter, Körpergröße, Gewicht und Geschlecht.

Die Lunge wurde außerdem hinsichtlich einer normalen Lungenfunktion untersucht und mit Hilfe der Body-Plethysmographie die statischen Lungengrößen, das Gesamtlungenvolumen (TLC) und das Residualvolumen (RV) bestimmt. Die

Messwerte zur Berechnung der Milzvolumina wurden sonografisch unter Ruhebedingungen gemessen.

Mittels der optimierten CO-Rückatmungsmethode wurden sämtliche relevanten Blutparameter ermittelt. Diese bestehen aus:

- Hämoglobingehalt (Hb)
- Hämatokritwert (Hkt)
- Blutvolumen (RCV)
- Plasmavolumen (PV)
- Gesamthämoglobinmenge (tHb-mass)

Am darauf folgenden zweiten Tag (siehe Abb. 2), dem eigentlichen Versuchstag, absolvierten die Versuchspersonen jeweils ihre Apnoephase, bestehend aus einer Serie von fünf aufeinander folgenden Apnoetauchgängen. Diese fanden in dem 4m tiefen Becken eines beheizten Hallenbads, bei einer konstant auf 28°C gehaltenen Wassertemperatur (Abb. 1, Abb. 2 und Abb. 3) statt.

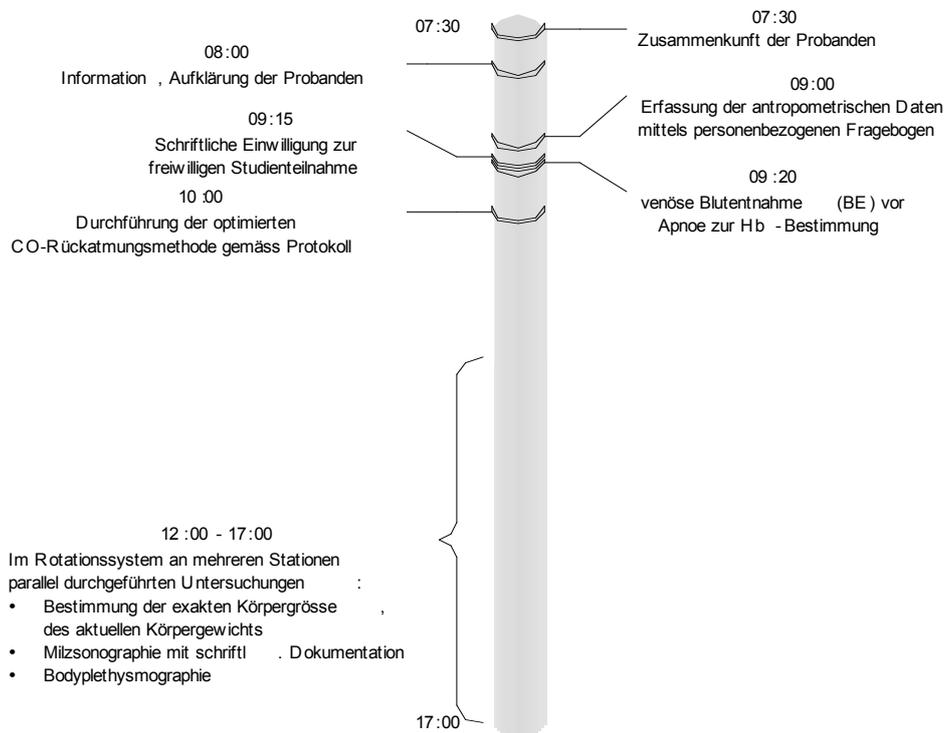


Abb. 1:

Tagesablauf des Voruntersuchungstages (Tag 1) mit Ermittlung sämtlicher anthropometrischen Daten, sowie aller notwendigen Ausgangs-/Ruhewerte vor Apnoe.

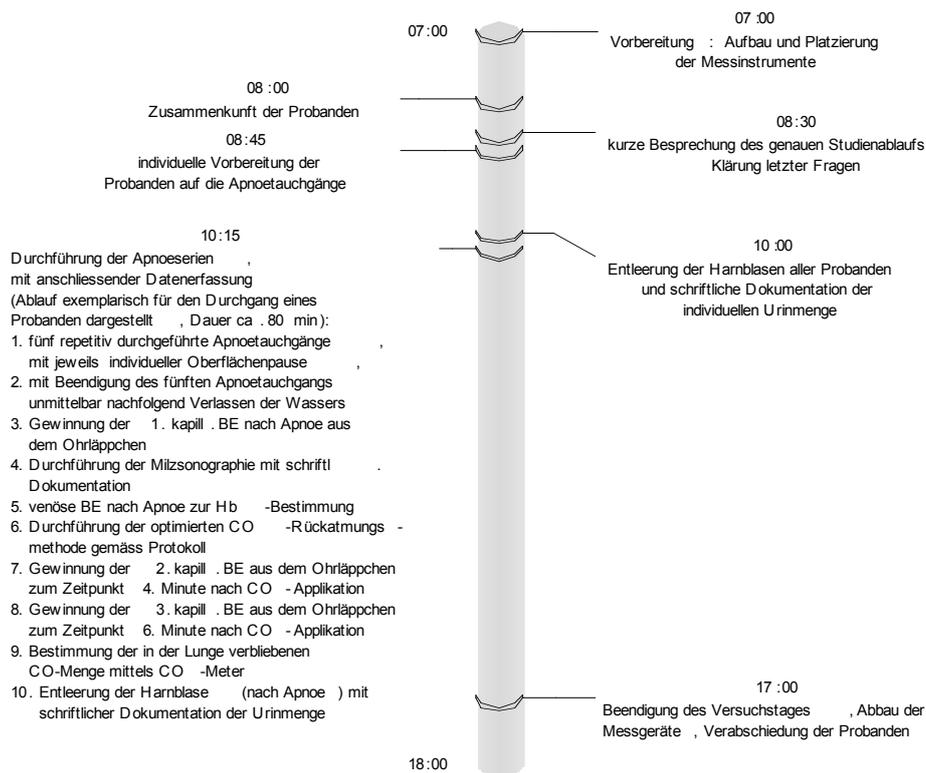


Abb. 2:

Tagesablauf des Versuchstages (Tag 2) mit Durchführung einer Serie aus fünf repetitiven Apnoetauchgängen in der Apnoephase und Gewinnung sämtlicher Daten nach Apnoe.

Unmittelbar nachfolgend wurden sonografisch die Größen der Milz der einzelnen Teilnehmer bestimmt und mit Hilfe der optimierten CO-Rückatmungsmethode die zuvor genannten Blutparameter gemessen. Die Teilnehmer der Kontrollgruppe wurden angeleitet, so lange zu tauchen, wie es ihnen durch Luftanhaltens möglich war, wohingegen die speziell trainierten Apnoetaucher der Versuchsgruppe aus Gründen der Sicherheit maximal vier Minuten lang tauchen durften.

Die Länge der Oberflächenpause zwischen den einzelnen Tauchgängen, die zur Erholung notwendig war, bestimmten die einzelnen Taucher jeweils selbst. Alle Probanden entleerten ihre Harnblase unmittelbar vor Durchführung der Apnoephase damit danach die immersionsbedingte Diurese quantitativ erfasst werden konnte.

Nach dem fünften Apnoetauchgang verließen die Probanden sofort das Wasser, so dass bereits etwa 30 Sekunden nach Beendigung des letzten Apnoetauch-

gangs die ersten beiden kapillären Blutproben aus dem Ohrläppchen zu entnehmen waren (siehe Abb. 4).

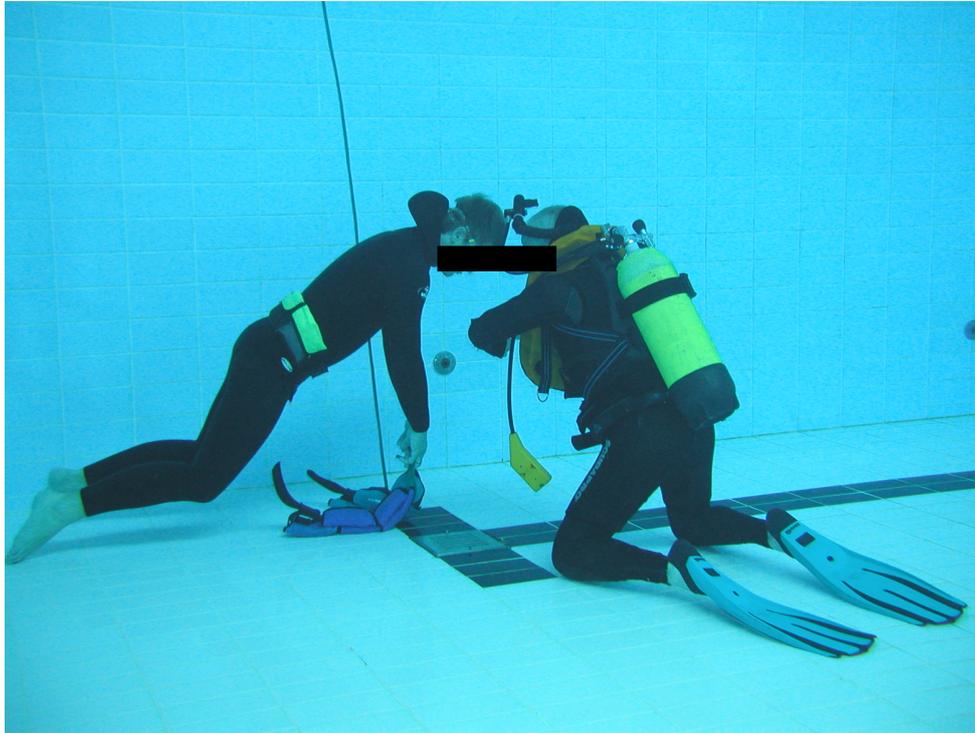


Abb. 3:

Proband während eines Apnoetauchgangs in 4m Tiefe, unter permanenter Überwachung durch einen Sicherungstaucher

Unverzüglich danach wurde die sonografische Bestimmung der Milzgröße vorgenommen (siehe Abb. 8). Danach erfolgte die venöse Blutentnahme aus der Vena mediana cubiti (siehe Abb. 5). Nach etwa drei Minuten konnte mit der optimierten CO-Rückatmung (siehe Abb. 6) begonnen werden und die zwei verbliebenen kapillären Blutproben wurden entsprechend dem Protokoll in der vierten und sechsten Minute abgenommen.

Aus diesen Blutproben wurde unmittelbar vor Ort die HbCO-Konzentration mittels einer Blutgasanalyse (BGA) ermittelt, die für die weiteren Berechnungen zur Bestimmung der Gesamthämoglobinmenge (tHb-mass) und des Blutvolumens (RCV) nach CO-Inhalation notwendig war.

Bereits neun Minuten nach Beendigung des letzten Apnoetauchgangs waren fast alle notwendigen Daten für die später erfolgenden Auswertungen gewonnen. Nach zehn Minuten standen auch die Werte der immersionsbedingten Harnausscheidung fest.

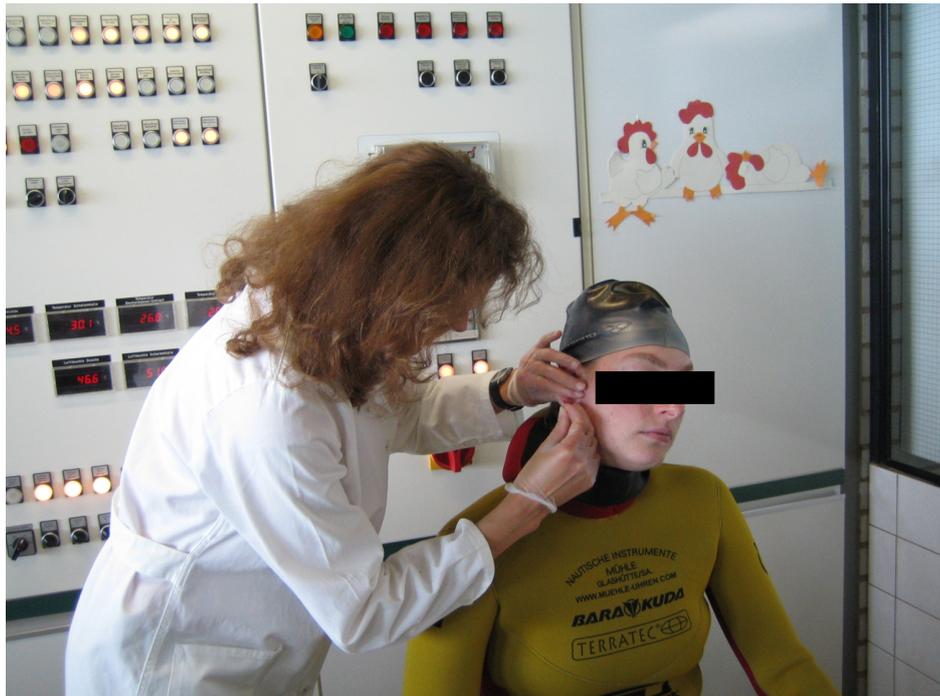


Abb. 4:

erste kapilläre Blutentnahme unmittelbar nach Beendigung der Apnoephase.



Abb. 5:

venöse Blutentnahme bei einem Probanden vor Durchführung der CO-Rückatmung unmittelbar nach den absolvierten Apnoetauchgängen.



Abb. 6:

unmittelbar nach den Apnoetauchgängen durchgeführte CO-Rückatmung.

2.3. Messungen und Berechnungen:

Am Vortag sowie am darauf folgenden Versuchstag unmittelbar nach der jeweils absolvierten Apnoeserie wurde bei jedem einzelnen Probanden die Gesamthämoglobinmenge mittels der optimierten CO-Rückatmungsmethode gemessen, die nachfolgend ausführlich beschrieben wird [29].

Eine Zeitspanne von etwa 16 bis 24 Stunden zwischen den beiden Messungen stellte die vollständige Eliminierung des aufgenommenen Kohlenmonoxids (CO) aus dem menschlichen Organismus nach den vorangegangenen Messungen sicher.

Dadurch wurde eine Verfälschung von Messwerten verhindert, die sich zum einen durch eine Ansammlung von Kohlenmonoxid im Blut, zu anderen aber auch durch einen Einfluss des Kohlenmonoxids auf das Luftanhaltevermögen der einzelnen Probanden ergeben konnten.

Die Bestimmung des Milzvolumens erfolgte mit Hilfe einer sonografischen Vermessung des Organs. Aus den ermittelten Werten des maximalen Längsdurchmessers (= Länge) und des maximalen Querdurchmessers (= Breite) wurden

die individuellen Organgrößen vor und nach den wiederholt durchgeführten Apnoetauchgängen, wie bei Koga et al [20] beschrieben, errechnet.

2.3.1 Die optimierte CO-Rückatmungsmethode

Die oben genannte Methode der optimierten Kohlenmonoxid-Rückatmung stellt eine Weiterentwicklung von Schmid und Prommer [29] zu der bislang verwendeten, konventionellen CO-Rückatmungsmethode nach Burge und Skinner [4] dar, die hier als konventionelle CO-Rückatmungsmethode bezeichnet wird. Diese ermöglicht bei gleich hoher Messgenauigkeit eine leichtere und schneller durchführbare Bestimmung des Gesamtblutvolumens (RCV), der Gesamthämoglobinmenge (tHb-mass) sowie des Plasmavolumens (PV) als es bisher bei der Anwendung der konventionellen CO-Rückatmungsmethode von Burge und Skinner [4] der Fall war unter gleichzeitig minimal invasiver Vorgehensweise bei der Blutprobengewinnung.

Dadurch war es möglich die geringen und nur kurzzeitig bestehenden Effekte der Apnoetauchgänge auch die zuvor genannten Blutparameter zu untersuchen, die mit der konventionellen Messmethode bislang nicht messbar waren. Mit der herkömmlichen CO-Rückatmungsmethode wären die in Kapitel 2.1. aufgeführten Blutparameter nur unter sehr hohem technischem Aufwand sowie mit einer weitaus höheren Anzahl an invasiven Blutentnahmen über ein längeres Zeitintervall (20min CO-Rückatmung bei der konventionellen Methode zu lediglich 2 min bei der optimierten CO-Rückatmungsmethode) zu bestimmen gewesen.

Für die bei dieser Studie verwendete optimierte CO-Rückatmungsmethode wurde eigens ein neuartiges, aus Glas gefertigtes Spirometer (Universität Bayreuth, Deutschland, (siehe Abb. 7) entwickelt und gebaut, welches es ermöglichte, in einem geschlossenen System die gesamte CO-Menge durch Applikation eines einzigen Kohlenmonoxid-Bolus (CO-Bolus) mit dem ersten Atemzug zu inhalieren. Die Messungen mit Hilfe der optimierten CO-Rückatmungsmethode wurden entsprechend dem Messprotokoll von Schmidt und Prommer [29] durchgeführt:

Die einzelnen Versuchspersonen wurden über ein Mundstück (H) mit dem Spirometer verbunden und mussten die zuvor mittels tiefer Inspiration eingeatmete Luft über die Nase vollständig bis zum Erreichen ihres Residualvolumens ausatmen. (siehe Abb.6)

Unmittelbar nachfolgend wurde die Nase mit einer Nasenklemme verschlossen. Nun wurde die im Vorfeld individuell errechnete und abgefüllte Kohlenmonoxidmenge (CO-Bolus) über eine aufgesetzte 100ml Plastikspritze (D) appliziert. Diese individuelle Kohlenmonoxidmenge (CO-Menge) errechnet sich nach der folgenden Formel [29] :

für die männlichen Probanden: $\text{CO (ml)} = \text{Körpergewicht (kg)} \cdot 0,8$

für die weiblichen Probanden: $\text{CO (ml)} = \text{Körpergewicht (kg)} \cdot 0,7$

Gleichzeitig wurde das Ventil (C) geöffnet, das die jeweilige Versuchsperson mit dem ebenfalls im Vorfeld befüllten Sauerstoffreservoir (J) verbunden hatte. Bei diesem Sauerstoffreservoir handelte es sich um einen mit 2,0 Liter reinem Sauerstoff gefüllten, handelsüblichen, in der Anästhesie verwendeten Beatmungsbeutel von 3,5 Litern Volumen, der über eine Zuleitung (A) und das Ventil (B) befüllt wurde.

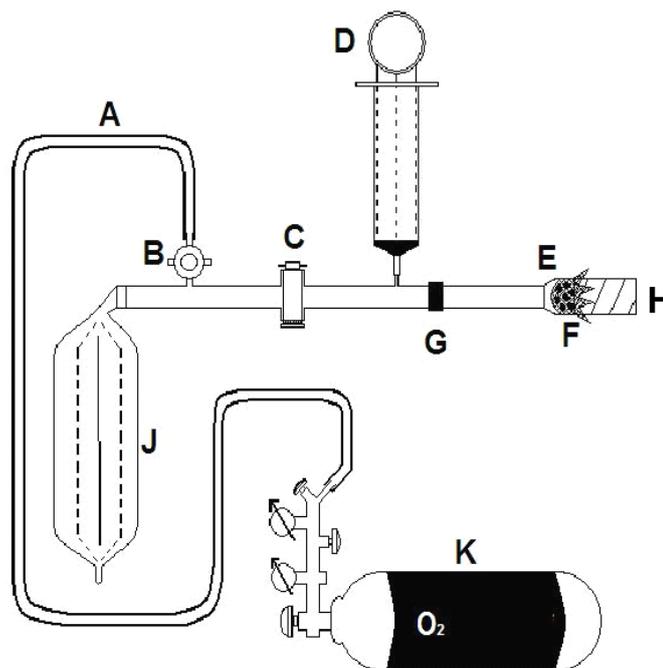


Abb. 7:

schematische Darstellung der Versuchsanordnung, des zur optimierten CO-Rückatmung speziell entwickelten und eigens angefertigten Spirometers aus Glas. **A** ist der Zuleitungsschlauch aus Kunststoff für reinen Sauerstoff aus der Sauerstoffflasche **K** zur Befüllung des Sauerstoffreservoirs **J** in Form eines handelsüblichen Anästhesiebeatmungsbeutels über das Zuleitungsventil **B**. **D** ist eine 100ml Plastikspritze mit dem zu applizierenden CO-Bolus. **C** ist das Ventil, welches während der CO-Rückatmungsphase geöffnet ist und den Probanden mit dem Sauerstoffreservoir verbindet. **E** dient als Adapter zur Anbringung des Mundstücks **H**, dem ein CO_2 -Absorber **F** vorgeschaltet ist, bestehend aus ca. 10g Atemkalk-Granulat. **G** ist eine Muffe zur Befestigung des Spirometers.

Dieses Vorgehen ermöglichte es, dass die gesamte CO-Menge während der ersten Phase des ersten Atemzugs eingeatmet und über die Alveolen aufgenommen wurde. Kohlenmonoxid (CO) hat zum roten Blutfarbstoff Hämoglobin eine sehr viel höhere Affinität als Sauerstoff, so dass der Großteil des verabreichten CO-Bolus innerhalb der ersten Sekunden aus den Alveolen in die Blutbahn diffundierte.

Zur Unterstützung dieses Diffusionsprozesses wurden die Probanden instruiert, die Luft ihres ersten Atemzugs für 10 Sekunden anzuhalten. Danach wurde eine normale Atmung für 1 Minute und 50 Sekunden fortgesetzt. Um das beim Gasaustausch entstandene Kohlendioxid (CO₂) aus der ausgeatmeten Luft zu entfernen, befindet sich im Bereich (F) ein CO₂-Absorber in Form von ca. 10 Gramm Atemkalk-Granulat.

Um sicher zu stellen, dass während der gesamten Rückatmungsphase aus dem geschlossenen System kein Gas austrat, wurde mit einem tragbaren Kohlenmonoxid-Messgerät (BEHA Fluke CO-220, Schönaich, Deutschland), mit einer „parts-per-million“-Sensitivität, im Bereich um das Mundstück und der Nasenklemme ein mögliches Entweichen von Kohlenmonoxid kontrolliert.

Nach Ablauf der Zeit atmete der Proband dann maximal aus, wieder bis zum Erreichen des Residualvolumens, wobei der Beatmungsbeutel (J) fast vollständig gefüllt wurde.

Unmittelbar nachfolgend wurde das Ventil (C) wieder geschlossen und die Versuchsperson vom Spirometer getrennt. Die vollständige Expiration ist zur exakten quantitativen Bestimmung derjenigen CO-Menge, die nicht vom Körper aufgenommen wurde, zwingend erforderlich und von entscheidender Bedeutung.

Die zuvor mittels der Body-Plethymographie ermittelten Residualvolumina wurden ebenso wie die im Spirometer verbliebene Gasmenge berücksichtigt. Dazu wurde mit Hilfe des tragbaren Kohlenmonoxid-Meters die im Spirometer verbliebene CO-Konzentration gemessen.

Zur quantitativen Bestimmung der nach der Abkopplung vom Spirometer ausgeatmeten CO-Menge bis zum Zeitpunkt der letzten Blutentnahme wurde die endtidale CO-Konzentration zum Zeitpunkt der letzten Blutentnahme mit der alveolären Ventilation (beträgt bei normaler Atmung 5,0 Liter/Minute), gemäß den Vorgaben des Protokolls [29] multipliziert.

Während des gesamten Vorgangs der CO-Rückatmung wurden zu genau festgelegten Zeitpunkten Blutproben entnommen [29] :

- jeweils zwei kapilläre Blutproben aus einem mittels Finalgon-Salbe (Finalgon® extra stark Salbe, Boehringer Ingelheim, Deutschland) hyperämisierten Ohrläppchen (siehe Abb. 4)
- eine venöse Blutprobe aus der Vena mediana cubiti vor der Durchführung der CO-Rückatmung (siehe Abb. 5)
- jeweils eine kapilläre Blutentnahme bei Minute vier und sechs nach der Applikation des Kohlenmonoxids.

Die Gesamthämoglobinmenge (tHb-mass) wurde im Nachhinein folgendermaßen berechnet:

$$(1) \text{ tHb-mass} = K_{\text{baro/T}} \cdot M_{\text{CO}} \cdot 100 \cdot (1.39 \cdot \Delta\text{HbCO}\%)^{-1}$$

- $\Delta\text{HbCO}\%$ ist die Differenz des CO-Hämoglobinanteils vor und nach der CO-Applikation: $\text{HbCO}_{(\text{basal})} - \text{HbCO}_{(\text{nach CO-adm})}$
- $K_{\text{baro/T}} = \text{gegenwärtiger Umgebungsdruck} \cdot 760^{-1} \cdot (1 + 0.0036661 \cdot \text{aktuelle Temperatur})$
- $M_{\text{CO}} = \text{VCO}_{\text{adm}} - (\text{VCO}_{\text{rem}} + \text{VCO}_{\text{exh}})$ mit VCO_{adm} , VCO_{rem} , VCO_{exh} meint jeweils das insgesamt verabreichte CO Volumen, abzüglich des nicht aufgenommenen CO Volumens (Summe aus im Spirometer verbliebenen- und abgeatmeten CO-Volumen).
- 1,39 = Hüfner'sche Zahl = hier die Menge an Kohlenmonoxid (CO) in ml anstatt Sauerstoff (O₂), die von 1 g Hämoglobin (Hb) unter in-vitro Bedingungen gebunden wird, angegeben in ml CO/g Hb, entspricht der Sauerstofftransportkapazität
- $\text{VCO}_{\text{adm}} = \text{ins Spirometriesystem applizierte CO-Menge}$
- $\text{VCO}_{\text{System+Lunge (nach Abkopplung)}} = [\text{CO}]_{(\text{System})} \cdot (\text{V}_{(\text{System})} + \text{V}_{(\text{Residualvolumen})})$
- $\text{VCO}_{\text{exh (nach Abkopplung)}} = \text{CO}_{(\text{end-tidal})} \cdot \text{alveoläre Ventilation} \cdot \text{Zeit}$

Der HbCO-Wert und die Hämoglobinkonzentration [Hb] wurden unter Verwendung eines ABL 520 Blutgasanalysegeräts (Radiometer, Kopenhagen, Dänemark) unmittelbar nach Entnahme der Blutproben vor Ort ermittelt.

Der Hämatokrit-Wert (Hct) wurde durch eine zweifache Messung aus einer Mikrohämatokrit-zentrifugierten, heparinisierten, venösen Blutprobe nach den Vorgaben des Zentrifugenherstellers zur Mikrohämatokritzentrifugation (EBA 21, Hettich, Tuttlingen, Deutschland) bei 21°C, 400g, 15.000rpm über 10min, gemessen. Das Gesamtblutvolumen (BV), das Erythrozytenvolumen (RCV) wie auch das Plasmapvolumen (PV) wurden unter Verwendung folgender Formeln (2 – 5) berechnet [29]:

$$(2) \text{ BV (ml)} = (\text{tHb} \cdot 100) \cdot ([\text{Hb}] \cdot 0.91)^{-1}$$

$$(3) \text{ RCV (ml)} = \text{tHb} \cdot \text{MCHC}^{-1} \cdot 100$$

$$(4) \text{ PV (ml)} = \text{BV} - \text{RCV}$$

$$(5) \text{ MCHC} = ([\text{Hb}] \cdot 100) \cdot \text{Hct}^{-1}$$

2.3.2 Vermessung der Milz

Sowohl vor der Durchführung der Versuche als auch unmittelbar nach Beendigung der Apnoeserie mit sofortigem Verlassen des Wassers wurde die Vermessung der Milz zur Bestimmung des aktuellen Milzvolumens der jeweiligen Probanden vorgenommen (siehe Abb. 8).

Diese befanden sich für die Vermessungen mittels Ultraschall in der Rechtsseitenlage, um den Untersuchern die bestmöglichen Schallbedingungen zu schaffen, die für eine schnelle und exakte Vermessung der Organe notwendig ist. Das Ultraschallgerät war mit einem 3-MHz Sektorschallkopf (Siemens Sonoline SI-250, Deutschland, (siehe Abb. 8) ausgestattet.



Abb. 8:

vor Ort unmittelbar nach Beendigung der Apnoephase durchgeführten sonografischen Messungen zur Größenbestimmung der Milz.

Aus den mittels Transversal- (schräg) und Longitudinal-Schnitt erhaltenen Ultraschallbildern (off-line Bilder) wurden jeweils die maximalen longitudinalen (=Länge L) und transversalen (=Breite B) Durchmesser ermittelt (siehe Abb. 9).

Während der Durchführung wurden sämtliche zur Berechnung des Milzvolumens notwendigen Parameter aller Versuchsteilnehmer sofort schriftlich dokumentiert und zur nachfolgenden Auswertung festgehalten (siehe Tabelle 3).

Dazu gehören sowohl Werte, die unmittelbar vor Beginn der Apnoeserie zur Ermittlung der Ausgangsgrößen unter Ruhebedingungen festgestellt wurden als auch diejenigen, die direkt im Anschluss an die Apnoephase gemessen wurden - einschließlich der ausgeschiedenen Urinmenge. Die Apnoeserie oder -phase bestand aus fünf aufeinander folgenden Tauchgängen.

Die Berechnung des Milzvolumens erfolgt, wie bei Koga et al. [20] beschrieben, in zwei Schritten:

- Zuerst wird aus den sonografisch bestimmten maximalen Längs- und Querdurchmessern eine im Ultraschall schräg liegende Schnittfläche A_{Milz} bestimmt.

- Im zweiten Schritt wird diese Schnittfläche in die von Koga ermittelte Formel zur Berechnung des Milzvolumens (V_{Milz}) eingesetzt. Somit errechnet sich das Milzvolumen nach folgenden Formeln:

$$\text{Milzfläche: } A_{\text{Milz}} [\text{cm}^2] = 0,8 \cdot (\text{Länge} [\text{cm}] \cdot \text{Breite} [\text{cm}])$$

$$\text{Milzvolumen: } V_{\text{Milz}} [\text{ml}] = 7,53 \cdot A_{\text{Milz}} - 77,56$$

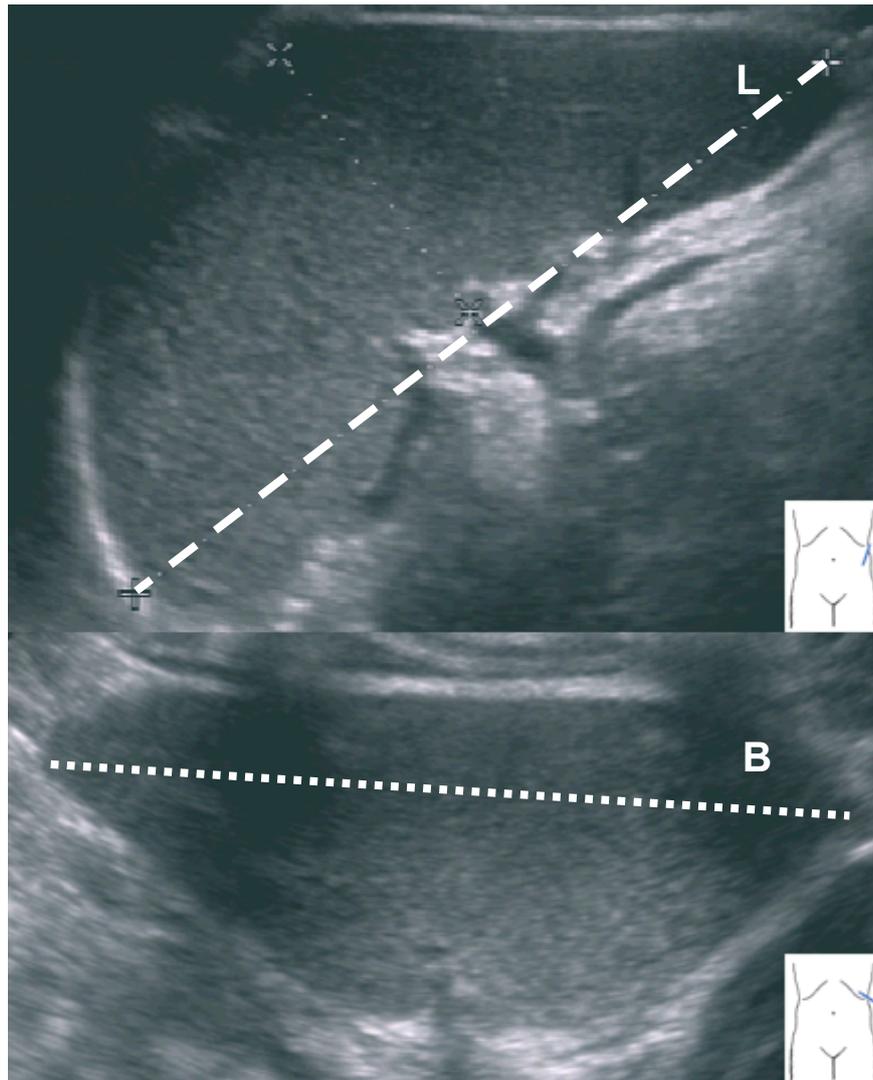


Abb. 9: sonografische Darstellung der Milz in zwei Ebenen. Das obere Sonogramm wurde von intercostal links (bei 2:00 Uhr) dargestellt, dabei in der Längsachse der maximale Längsdurchmesser ermittelt (gestrichelte Linie), dieser entspricht der Länge L. Im unteren Sonogramm stellt sich die Milz trapezförmig dar und die Breite B entspricht dabei dem breitesten Durchmesser des dargestellten Trapezes (gepunktete Linie). [Freundlicher Weise zur Verfügung gestellt von Prof. Dr. Kratzer, Innere Medizin I].

2.4. Statistische Analyse:

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit Hilfe der in der Forschungsabteilung gängig verwendeten Software SigmaStat Version 9 (Systat Software Inc., Kalifornien, USA). Zur Prüfung einer normal verteilten Datenlage wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test herangezogen, welcher besonders gut geeignet ist zur Testung bei kleinen Stichproben Zahlen (hier mit Fallzahl $n=17$) [33].

Die so getesteten Daten sind tabellarisch, zur Reduktion der Messfehler als Mittelwerte \pm Standardabweichung, dargestellt. Die Daten vor und nach den Apnoetauchgängen einer Versuchsperson wurden unter Anwendung eines t-Tests für verbundene Stichproben [33] miteinander verglichen. Die Unterschiede innerhalb einer Gruppe wurden unter Anwendung eines unpaired student tests, sowie Anwendung eines einseitigen ANOVA- und eines „subsequent post-hock Scheffe-Tests“ auf signifikante Unterschiede getestet [35]

Bei dem statistischen Vergleich zwischen Werten vor und nach den Apnoetauchgängen wurden die Daten der speziell trainierten Apnoetaucher der Versuchsgruppe als ganzes (Männer und Frauen zusammen) aufgeführt.

Eine Wahrscheinlichkeit von $p < 0,05$ wurde hierbei als signifikant angesehen. Der Versuchsaufbau und die Durchführung lieferten aussagekräftige Messwerte, welche im anschließenden Abschnitt näher betrachtet werden.

3. Ergebnisse

3.1. Ergebnisse der Apnoeserien

Die Versuchspersonen der Kontrollgruppe erreichten nach der Serie aus fünf aufeinander folgenden Apnoetauchgängen eine Gesamttauchzeit von lediglich $10:30 \pm 2:30$ [min:sec], wohingegen die speziell trainierten Apnoetaucher der Versuchsgruppe eine signifikant höhere Gesamttauchzeit von $17:00 \pm 2:48$ [min:sec] ($p < 0,001$) erbrachten.

Die Gesamtzeit der benötigten Oberflächenpause ergab sich durch Aufaddieren der jeweils individuell benötigten Oberflächenpausen zwischen den einzelnen Tauchgängen. Diese betrug bei der Kontrollgruppe durchschnittlich $15:42 \pm 6:48$ [min:sec] und bei der Versuchsgruppe im Schnitt $19:54 \pm 3:00$ [min:sec]. Dies entspricht einem p-Wert $p = 0,100$ und ist damit nicht signifikant unterschiedlich. Im Durchschnitt entspricht dies einer einzelnen Oberflächenpause von ca. vier bis fünf Minuten zwischen den einzelnen Tauchgängen, sowohl bei der Versuchs- wie auch bei der Kontrollgruppe.

Die Urinausscheidung fiel in beiden Probandengruppen mit 122 ± 116 ml in der Kontrollgruppe zu 160 ± 200 ml bei den trainierten Apnoetauchern der Versuchsgruppe ähnlich hoch aus und war mit $p = 0,658$ ebenfalls nicht signifikant unterschiedlich.

3.2. Ergebnisse der Milzvermessungen

Die Ergebnisse der sonografisch durchgeführten Messungen der Milzvolumina sind zusammengefasst nachfolgend in Tabelle 3 und Abb.10 dargestellt. Vor den Apnoetauchgängen der Apnoephase konnten keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Milzvolumina zwischen den speziell trainierten Apnoetauchern und den untrainierten Probanden der Kontrollgruppe (191 ± 47 ml zu 229 ± 55 ml, $p = 0,142$) festgestellt werden.

Nach den Apnoetauchgängen hingegen fielen bei den Mitgliedern der Kontrollgruppe die Messungen der Milzvolumina signifikant höher aus (206 ± 55 ml zu 144 ± 50 ml, $p = 0,029$) als bei den trainierten Apnoetauchern ($p < 0,001$ zu $p = 0,121$ der Versuchsgruppe), was einer Abnahme des Milzvolumens um 26% entspricht.

Tabelle 3:

Milzvolumina der trainierten Apnoetaucher der Versuchsgruppe und der Probanden der Kontrollgruppe jeweils vor und nach Apnoe. Die Daten sind angegeben als Mittelwerte \pm Standardabweichung. $p < 0,001$ wird als signifikant angesehen.

	Apnoetaucher (männlich + weiblich)	Kontrollgruppe	p-Wert
V_{Milz} vor Apnoe [ml]	191 \pm 47	229 \pm 55	0,142
V_{Milz} nach Apnoe [ml]	144 \pm 50	206 \pm 55	0,029
p-Wert vor Apnoe zu nach Apnoe	$p < 0,001$	0,121	

Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Größe der Milz nicht durch gezieltes Apnoetraining gesteigert werden kann, wohl aber ihre Kontraktionsfähigkeit, die als eine Teilreaktion des trainierbaren Tauchreflexes anzusehen ist.

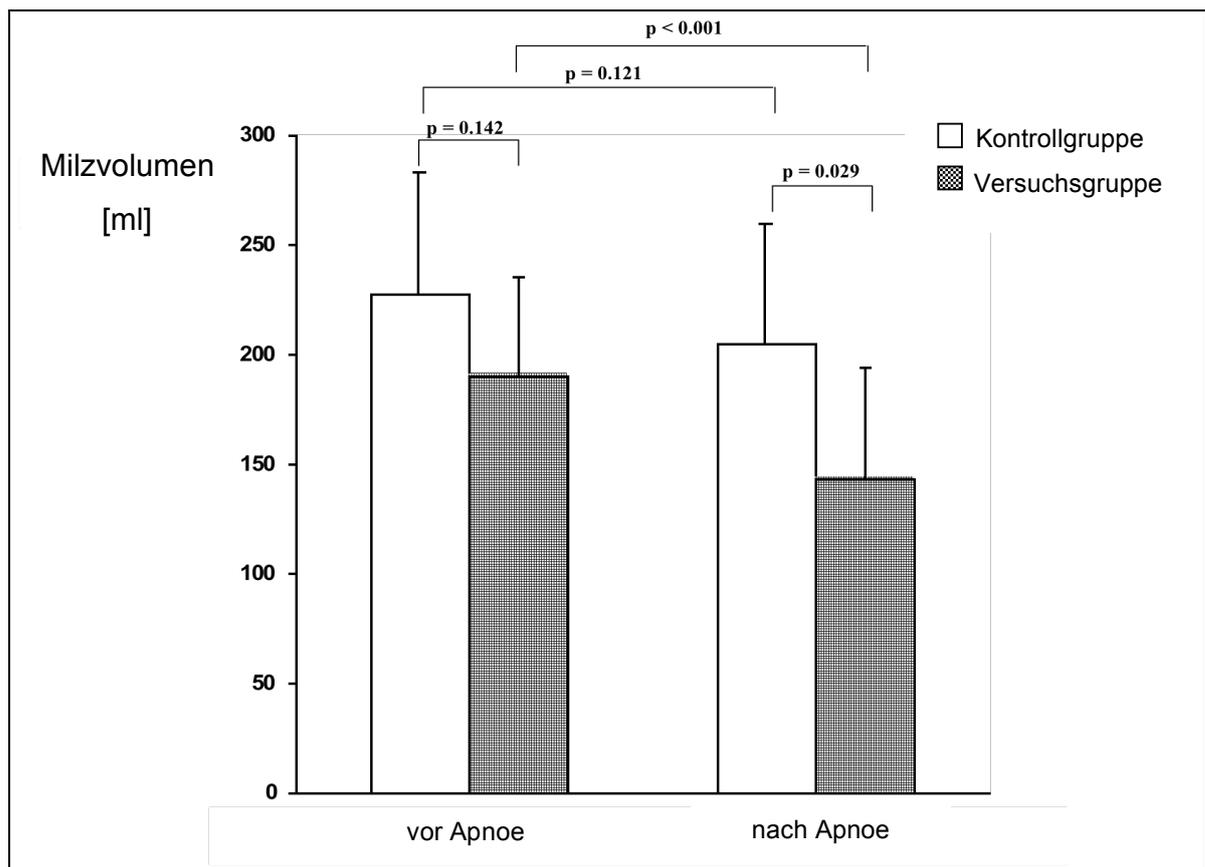


Abb. 10:

Milzvolumina vor (linkes Balkenpaar) und unmittelbar nach den fünf durchgeführten Apnoetauchgängen (rechtes Balkenpaar) bei der Kontrollgruppe (weiße Säule, $n = 7$) und den trainierten Apnoetauchern (schraffierte Säule, $n = 9$). Die Daten sind angegeben als Mittelwerte \pm Standardabweichung.

3.3. Ergebnisse der Blutanalyse

Die hämatologischen Messergebnisse sind in Tabelle 4 zusammenfassend für die Hämoglobinkonzentration [Hb], die Gesamthämoglobinmenge (tHb-mass), das Gesamtblutvolumen (RCV) und das Plasmavolumen (PV) wiedergegeben. Sie wurden bei den beiden Probandengruppen (Apnoe-Taucher männlich, n=7 und Apnoe-Taucher weiblich, n=3) zur Kontrollgruppe einerseits, trainierte Apnoe-Taucher andererseits - vor und nach der Apnoephase mittels der optimierten CO-Rückatmungsmethode gemessen.

Hieraus ist ersichtlich, dass die Werte der Hämoglobinkonzentration bei den trainierten Apnoe-Tauchern vor und nach Apnoe deutlich gefallen sind.

Diese Veränderung ist jedoch bei allen Probandengruppen als nicht signifikant zu betrachten.

Stellt man die Hb-Konzentration nach Apnoe der Kontrollgruppe den Werten der männlichen Apnoe-Taucher gegenüber, dann ist das Resultat mit $p = 0,11$ nicht signifikant verschieden. Betrachtet man allerdings die Werte der beiden Gruppen vor Apnoe ergibt sie hierbei ein p-Wert von $p = 0,03$. Dieses Ergebnis stellt einen signifikanten Unterschied der Kontroll- gegenüber der Versuchsgruppe dar.

Bei der Gesamthämoglobinmenge stellen sich die Veränderungen vor- zu nach Apnoe wie folgt dar:

Die Werte der Hb-Menge trainierter Apnoe-Taucher männlich mit 850 ± 83 [ml] zu 840 ± 76 [ml], bei den Apnoe-Taucherinnen mit 613 ± 87 [ml] zu 613 ± 86 [ml] mit jeweils $p = 1,0$ und bei den Tauchern der Kontrollgruppe mit 863 ± 125 [ml] zu 857 ± 123 [ml] mit $p = 1,0$ ohne signifikante Veränderung.

Stellt man hier wiederum die Werte der Gesamthämoglobinmenge vor Apnoe von Versuchs- und Kontrollgruppe gegenüber so ergibt sich folgendes Bild:

Die Werte vor Apnoe ergeben einen p-Wert mit $p = 0,82$ und die Werte nach Apnoe einen p-Wert von $0,76$ und sind damit ebenfalls nicht signifikant unterschiedlich.

Betrachtet man die Resultate des Gesamterthrozytenvolumens so betragen die Werte vor- zu nach Apnoe bei den männlichen Apnoetauchern 2392 ± 216 [ml] zu 2404 ± 279 [ml], bei den Apnoe-Taucherinnen 1811 ± 277 [ml] zu 1776 ± 275 [ml] jeweils mit $p = 0,95$.

Bei den Gerätetauchern verhielt es sich beim Gesamthämoglobinvolumen wie folgt: 2445 ± 352 [ml] zu 2432 ± 374 [ml] mit $p = 0,67$. Stellt man hier die Werte

der beiden Gruppen für die Werte vor- und nach Apnoe gegenüber so ergibt sich vor Apnoe ein p-Wert mit $p = 0,74$ und nach Apnoe mit $p = 0,87$, wiederum nicht signifikant unterschiedlich.

Zuletzt wurde das Plasmavolumen betrachtet, welches ein vergleichbares Ergebnis liefert wie die zuvor genannten Ergebnisse der Hb-Konzentration, der Gesamthämoglobinmenge und des gesamten Erythrozytenvolumens.

Zunächst der Vergleich der Werte innerhalb der Gruppen vor- und nach Apnoe: Bei den Apnoe-Tauchern betrug das Plasmavolumen 3702 ± 350 [ml] zu 3781 ± 204 [ml] bei den Apnoe-Taucherinnen 2978 ± 410 [ml] zu 3126 ± 482 [ml] jeweils mit $p = 0,35$. Die Werte der Kontrollgruppe betragen 3685 ± 587 [ml] zu 3600 ± 204 [ml] mit $p = 0,20$, d.h. wiederum keinen signifikanten Unterschied.

Stellt man hier die Kontrollgruppe der Versuchsgruppe gegenüber so erhält man für die Werte vor Apnoe einen p-Wert von $p = 0,95$ und nach Apnoe einen p-Wert von $p = 0,41$ und damit abermals keinen signifikanten Unterschied.

Zusammenfassend lässt sich damit sagen, dass keiner der aufgeführten hämatologischen Parameter (mit Ausnahme der Hämoglobinkonzentration unmittelbar vor den Tauchgängen) einen signifikanten Unterschied zeigte - weder zwischen den beiden beobachteten Gruppen noch zwischen den gewonnenen Daten vor und unmittelbar nach den durchgeführten Apnoetauchgängen.

Tabelle 4:

Hämatologische Ergebnisse der Probanden der Kontroll- (n = 7) und der trainierten Apnoetaucher (Versuchsgruppe n = 10) vor Apnoe an Tag 1 (Test-1) und nach den Serien der fünf nacheinander durchgeführten Apnoetauchgänge an Tag 2 (Test 2). Alle Daten sind als Mittelwerte \pm Standardabweichung mit dazu gehörigem p-Wert aufgelistet.

			Probanden der Kontroll- Gruppe (n=7)	Trainierte Apnoe- Taucher (männlich, n=7)	Trainierte Apnoe- Taucher (weiblich, n=3)	p-Wert Kontroll-Gr. vs Profitaucher (männlich)
Hämoglobin Konzentration [g · l ⁻¹]	Test-1		154 \pm 9	152 \pm 5	141 \pm 9	0,52
	Test-2	vor Apnoe	161 \pm 9	150 \pm 7	141 \pm 9	0,03
		nach Apnoe	156 \pm 9	149 \pm 6	138 \pm 10	0,11
p-Wert			0,33	0,41		
gesamte Hämoglobin Menge [ml]	Test 1		863 \pm 125	850 \pm 83	613 \pm 87	0,82
	Test 2					
		nach Apnoe		857 \pm 123	840 \pm 76	613 \pm 86
p-Wert			1,0	1,0		
gesamte Hämoglobin Menge [g kg ⁻¹]	Test 1		10,7 \pm 1,6	10,8 \pm 1,1	9,2 \pm 0,6	0,92
	Test 2					
		nach Apnoe		10,7 \pm 1,6	10,7 \pm 1,1	9,2 \pm 0,9
p-Wert			1,0	1,0		
gesamtes Erythrozyten Volumen [ml]	Test 1		2464 \pm 358	2442 \pm 198	1812 \pm 304	0,89
	Test 2	vor Apnoe	2445 \pm 352	2392 \pm 216	1811 \pm 277	0,74
		nach Apnoe		2432 \pm 374	2404 \pm 279	1776 \pm 275
p-Wert			0,67	0,95		
Plasma Volumen [ml]	Test 1	vor Apnoe	3685 \pm 587	3702 \pm 350	2978 \pm 410	0,95
	Test 2	nach Apnoe	3416 \pm 388	3770 \pm 225	2982 \pm 505	0,06
				3600 \pm 521	3781 \pm 204	3126 \pm 482
p-Wert			0,20	0,35		

4. Diskussion

Das Ziel dieser Studie bestand darin die kurzzeitigen Effekte von in Wasser wiederholt durchgeführten Apnoetauchgängen auf die Größe der Milz und auf die Hämoglobinkonzentration zu untersuchen. Ein weiteres Ziel bestand in der quantitativen Bestimmung der Gesamthämoglobinmenge (tHb-mass) der speziell trainierten Apnoetaucher.

Die zentralen Erkenntnisse aus dieser Studie sind zusammengefasst:

1. Es konnte eine deutliche Kontraktion der Milz und somit eine Abnahme des Milzvolumens bzgl. der errechneten Organgröße (von 26%) nur bei den speziell trainierten Apnoetauchern nachgewiesen werden.
2. Die durch die Milzkontraktion bedingte Größenabnahme spiegelte sich jedoch weder in einem signifikanten Anstieg der Hämoglobinkonzentration [Hb] noch in einem Anstieg der Gesamthämoglobinmenge (tHb-mass) wieder.

Die Milz dient den speziell trainierten Apnoetauchern somit nicht als zusätzlicher Sauerstoffspeicher.

4.1. Kontraktion der Milz

Bei dieser prospektiven experimentellen Studie zeigte sich jeweils nur bei den trainierten Apnoetauchern der Versuchsgruppe eine signifikante Abnahme des errechneten Milzvolumens. Bei den Versuchspersonen der Kontrollgruppe konnten dagegen keine Unterschiede hinsichtlich der Werte vor und nach den wiederholt durchgeführten Apnoetauchgängen festgestellt werden.

Diese Erkenntnisse stimmen mit den Ergebnissen früherer Veröffentlichungen von Hurford et al [18] überein, in denen diese Autoren über eine 20%ige Abnahme der Milzvolumina bei koreanischen Ama-Taucherinnen berichteten. Diese Abnahme zeigte sich hierbei nachdem diese das Wasser verlassen hatten, während bei den Gerätetauchern, die im Apnoetauchen untrainiert waren und als Kontrollgruppe dienten, keine Unterschiede festgestellt werden konnten.

Diese Ergebnisse stehen aber im deutlichen Gegensatz zu den in jüngerer Zeit erschienenen Veröffentlichungen [1, 2, 7, 28] die über eine ausgeprägte Kontraktion der Milz nach wiederholt durchgeführten Apnoetauchgängen bei trainierten Tauchern wie auch bei Probanden ohne gezieltes Apnoetraining berichteten:

eine 20-46%ige Abnahme der Milzvolumina gegenüber einer 26%igen Abnahme bei dieser Studie. Allerdings wird im Zusammenhang jener Studien [1, 2, 7, 28] darauf hingewiesen, dass die wiederholt vorgenommenen Apnoetauchgänge an Land durchgeführt wurden und den jeweiligen Versuchspersonen lediglich das Gesicht in 10°C kaltes Wasser getaucht wurde.

Es wurden also jene Apnoephasen unter einer reinen Gesichtsimmersion durchgeführt. Bei dieser Studie hingegen, war man um möglichst realitätsnahe Bedingungen bemüht, daher fand diese Studie unter Bedingungen statt, die der von Hurford et al [18] durchgeführten Studie vergleichbar waren:

- Sie wurde im beheizten Wasser (28°C) eines beheizten Hallenbads durchgeführt.
- Die Apnoetauchgänge erfolgten submers, d.h. der ganze Körper befand sich dabei unter Wasser.
- Es wurden auch allgemein gebräuchliche thermoisolierende Neoprennassanzüge getragen.

Bei Hurford et al. wurden dabei hauptberufliche Apnoetaucher in Neoprennassanzügen untersucht, die sie tagtäglich bei ihren Tauchgängen in 25°C warmem Meerwasser verwendeten.

Aufgrund der unterschiedlichen Ausgangssituationen der hier und bei Hurford et al durchgeführten Studie gegenüber denen in den jüngeren Studien [1, 2, 7, 28] muss dem „Tauchreflex“ in mehrerer Hinsicht eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden:

Der Tauchreflex [10, 14] ist ein evolutionsgeschichtlich entwickelter Schutzmechanismus aller lungenatmenden Lebewesen. Beim Eintauchen ins Wasser wird dieser über spezifische Rezeptoren im Bereich der Nase und des Mundes, besonders im Bereich der Oberlippe, ausgelöst und als cutiviszeraler Reflex über das parasympathische Nervensystem geleitet.

Dadurch wird zum einen ein Verschluss der Stimmbänder und der Atemwege als Schutz vor einer Aspiration von Wasser ausgelöst. Zum anderen kommt es initial zu einer Abnahme des Herzminutenvolumens und der Herzfrequenz (Bradykardie) um 6 – 15% [10]. Dies führt zu einer Abnahme der peripheren Durchblutung (Arme, Beine) mittels peripherer Vasokonstriktion. Dadurch kommt es zu einer Zentralisation des Kreislaufs und zu einem reflektorischen Anstieg des Blutdrucks, bei Abnahme der Herzfrequenz (Bradykardie).

Somit bleibt dann das Herzzeitvolumen weitgehend konstant und die Sauerstoffversorgung der lebenswichtigen Organe Gehirn und Herz wird sichergestellt.

Beim Menschen ist dieser Tauchreflex umso ausgeprägter, je niedriger die Wassertemperatur ist; wobei starke interindividuelle Schwankungen bestehen. Auch eine Apnoe an Land kann diesen Reflex auslösen, allerdings erfolgt er dann über Dehnungsrezeptoren in der Thoraxwand. Dass dieser Reflex sich auch durch gezieltes Training verstärken lässt, versuchen Apnoetaucher bei ihrem speziellen Training zur Verlängerung ihrer Apnoetauchzeiten zu nutzen.

Nimmt man diese den „Tauchreflex“ beeinflussende Sachverhalte zur Kenntnis, dann liegt die Folgerung nahe, dass bei den an Land mit ausschließlich unter Gesichtsimmersion durchgeführten Apnoetauchgängen bei geringerer Wassertemperatur (10°C) dieser Tauchreflex stärker ausgeprägt war [10, 11]. Das gilt dann auch für die Kontraktion der Milz, die ebenfalls als eine Teilreaktion des Tauchreflexes, beim Eintauchen des Körpers ins Wasser, angesehen wird und darum stärker ausgeprägt war als bei der Durchführung der Apnoetauchgänge unter Wasser in 28°C warmen Wasser [7, 10, 11].

Außerdem muss in Bezug auf die erst unlängst veröffentlichten Arbeiten [1, 7, 28] beachtet werden, dass die an Land mit reiner Gesichtsimmersion in 10°C kaltem Wasser absolvierten Apnoetauchgänge ohne die Bekleidung mit Neoprenanzügen vorgenommen wurden. Aufgrund dessen hatten die Untersucher zu jedem gewünschten Zeitpunkt uneingeschränkten Zugang zu den Versuchspersonen. Die Messungen konnten dadurch unmittelbar, ohne zeitliche Verzögerung des Milzvolumens vorgenommen werden.

In vorliegender Studie mussten die Versuchspersonen nach der absolvierten Apnoeserie erst einmal das Wasser verlassen und ihre Neoprenanzüge ablegen, bevor mit den Messungen begonnen werden konnte.

Diese verstrichene Zeitspanne von etwa zwei bis drei Minuten könnte eine weitere Erklärung für die Diskrepanzen zwischen den aktuell gewonnen Ergebnissen und den in der Literatur angegebenen Daten liefern.

In jenen Studien wurde auch darüber berichtet, dass sich der Effekt auf die Milzgröße nach den wiederholt durchgeführten Apnoetauchgängen bei untrainierten Personen innerhalb von zwei bis zehn Minuten wieder normalisierte [2, 7, 28].

Diese Beobachtung lässt es möglich erscheinen, dass auch bei dieser Studie nach zwei bis drei Minuten Verzögerung erfolgten Messungen die Milzgröße wieder eine Normalisierung – und zwar bei der untrainierten Kontrollgruppe – stattgefunden hat.

4.2 Änderung Blutparameter

Es konnten, im hochgradigen Gegensatz zu allen bislang existierenden Publikationen [1, 2, 7, 18, 27, 28], keinerlei Veränderungen bei der Hämoglobinkonzentration, der Gesamthämoglobinmenge oder bei dem Gesamtblutvolumen festgestellt werden. Dies war weder bei den trainierten Apnoetauchern noch bei den untrainierten Gerätetauchern der Kontrollgruppe möglich.

Die immersionsbedingte Harnproduktion und –ausscheidung kann bei dieser Studie vernachlässigt werden, da mit Ausnahme eines einzigen trainierten Apnoetauchers die Urinausscheidung knapp unter 3-4% des berechneten Plasmavolumens lag.

Somit konnte jener künstlich hervorgerufene Anstieg der Hämoglobinkonzentration, der das Ergebnis einer durch Immersionsdiurese verursachten Konzentrierung des Blutes hätte sein können, wie bei Hurford et al [18] diskutiert wurde, ausgeschlossen werden.

Angenommen das von der Milz freigesetzte Blut hätte einen Hämatokritwert von 95%, und nimmt man zusätzlich ferner eine durchschnittliche Kontraktion der Milz von ca. 25% an, dann würde dies einem Anstieg der sich im Kreislauf befindlichen Gesamthämoglobinmenge, bei den trainierten Apnoetauchern, von lediglich 15g entsprechen.

Dieses Ergebnis ist gleich bedeutend mit einem Anstieg der Hämoglobinkonzentration von 2g l^{-1} , bzw. entspricht etwa 2% der Gesamthämoglobinmenge.

Dieses Ergebnis ist von entscheidender Bedeutung, weil es die hier verwendete Messmethode, die optimierte CO-Rückatmungsmethode, erlaubt, die Gesamthämoglobinmenge zu bestimmen, ohne irgendwelchen störenden Einflüssen, wie beispielsweise den sich stets verändernden Werten von Hämatokrit und/ oder des Plasmaproteingehalts, ausgesetzt zu sein. Diese beiden Werte unterliegen aufgrund der sich stetig verändernden Körperwasserverteilung zwischen intra- und extravasalem Raum gewissen Schwankungen.

Doch auch diese Messmethode hatte ihre Schwächen, die weitere Möglichkeiten für die Diskrepanzen bei den erhaltenen Messergebnissen darstellt. In Bezug auf die Blutproben wurde gemäß dem Protokoll von Schmidt und Prommer [29], wie in Kapitel 2.3.1. ausführlich beschrieben wurde, verfahren.

Danach wurden die Gesamthämoglobinmenge und das Gesamtblutvolumen aus den zwei Blutproben errechnet, die zum Zeitpunkt der fünften Minute abgenommen wurden. Sie wurden als Mittelwert der kapillären Blutproben zum Zeitpunkt der vierten und sechsten Minute nach der CO-Rückatmung berechnet, wobei sich hieraus lediglich ein Messfehler von 1,7% ergab.

Untersuchungen von Gore et al [12], die sich mit den optimalen Abnahmezeitpunkten für kapilläre wie gemischtvenöse Blutproben bei der optimierten CO-Rückatmungsmethode beschäftigt haben, bestätigen zwar die hohe Messgenauigkeit der optimierten CO-Rückatmungsmethode für kapilläre Blutproben und stellen in ihren Versuchen sogar einen Messfehler von lediglich 1,1% fest.

Es zeigte sich jedoch hierbei durch Vergleiche zwischen den zeitgleich abgenommenen kapillären und gemischtvenösen Blutproben (in Minute vier und sechs), dass bei der vierten Minute ein signifikanter Unterschied zwischen den kapillären und gemischtvenösen Proben besteht.

Bei den venösen Blutproben fielen die Werte im Schnitt 3,4% niedriger aus als bei den kapillären Blutproben. Dieser Unterschied nahm jedoch im Vergleich der kapillären zu venösen Blutproben ab, je später der Zeitpunkt der gemischtvenösen Blutentnahme war.

Acht Minuten nach CO-Rückatmung bestand kein signifikanter Unterschied mehr zwischen den kapillären und den gemischtvenösen Blutproben. Es wurde daher vermutet, dass bei einigen Probanden die Durchmischung von Kohlenmonoxid-beladenem Hämoglobin (COHb) mit dem Sauerstoff-beladenen Hämoglobin noch nicht vollständig abgeschlossen und daher ungleichmäßig war.

Aus diesem Grund empfehlen Gore et al [12] trotz der insgesamt hohen Messgenauigkeit bei der optimierten CO-Rückatmungsmethode, dass auch die kapillären Blutproben nicht schon in Minute vier und sechs, sondern erst später in Minute acht und zehn abgenommen werden sollten, um eine vollständige und damit gleichmäßige Durchmischung des Blutes mit Kohlenmonoxid-beladenem Hämoglobin (COHb) bei allen untersuchten Personen zu gewährleisten.

So wird schließlich durch die Studie von Gore et al [12] bestätigt, dass die weiterentwickelte optimierte CO-Rückatmungsmethode eine gleich präzise Messmethode zur Bestimmung der Gesamthämoglobinmenge und des Gesamtblutvolumens darstellt wie die bereits etablierte konventionelle CO-Rückatmungsmethode. Der gegenüber bieten sich aber jetzt als wesentliche Vorteile:

- Zeitersparnis und größeres Maß an Sicherheit für die Probanden: zwei Minuten Rückatmung eines einmalig applizierten Bolus eines CO/O₂-Gemisches in einem geschlossenen System bei der optimierten Methode. Dem stehen zwanzig Minuten Rückatmung eines CO/O₂-Gemisches in einem halbgeschlossenen/geschlossenen System bei der konventionellen Methode gegenüber.
- minimalinvasives Vorgehen und geringerer technischer Aufwand: lediglich eine venösen und vier kapillären Blutentnahmen ohne Notwendigkeit eines Venenverweilkatheters gegenüber der konventionellen Methode. Bei der konventionellen Methode erfolgt die Blutabnahme über einen während der ganzen Versuchszeit in der Vene verbleibenden großlumigen Venenverweilkatheter, der für die zahlreichen venösen Blutentnahmen notwendig wäre.

Die Messungen waren neun Minuten nach Verlassen des Wassers abgeschlossen, sodass auch hier die zur Durchführung der optimierten CO-Rückatmungsmethode benötigte Zeit reduziert werden konnte, welche bei der Studie gewonnenen Ergebnisse hätte beeinflussen können.

Dies entspricht früheren Berichten darüber, dass ein Anstieg der Hämoglobinkonzentration und eine Kontraktion der Milz nur von vorübergehender Natur ist und sich die Werte innerhalb von zwei bis zehn Minuten nach dem Apnoetauchen wieder normalisieren [2, 7, 28].

Die Ergebnisse der tHb-mass Bestimmung, unterstützen jedoch die Vermutung, dass auch die optimierte CO-Rückatmungsmethode trotz sehr hoher Messgenauigkeit, großer Zeitersparnis und minimaler Invasivität ungeeignet ist, um diese geringfügigen und äußerst kurzzeitig bestehenden Veränderungen bei der Gesamthämoglobinmenge zu erfassen:

Die durchschnittliche Passagezeit eines Erythrozyten durch die Milz beträgt nur eine halbe bis zwei Minuten [8, 22] und die Blutentnahmen wurden fünf Minuten

nach Beginn der CO-Rückatmung abgenommen, so dass angenommen werden muss, dass die in der Milz gespeicherten Erythrozyten nicht vollständig mit Kohlenmonoxid markiert werden konnten.

Daraus ergibt sich die Tatsache, dass auch die optimierte CO-Rückatmungsmethode mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit diese minimalen und nur kurzzeitig bestehenden Veränderungen im zirkulierenden Blut nicht erfassen kann. In diesem Zusammenhang ist es bemerkenswert, dass Bakovic et al [2] von einem gerade mal 4,9%igen Anstieg des Gesamtblutvolumens berichtet hat. Dieser Anstieg des Hämatokritwertes erfolgte bei den ohne zeitliche Verzögerung durchgeführten Messungen, wurde jedoch von dem sich ständig verändernden Plasmaproteingehalt abgeleitet.

In Bezug auf die Sauerstofftransportkapazität wurde bislang angenommen, dass die speziell trainierten Apnoetaucher höhere Ausgangs-Hämatokritwerte als die untrainierten Gerätetaucher der Kontrollgruppe besitzen würden.

Dadurch wurde vermutet, dass es ihnen möglich sei, mehr Sauerstoff zu speichern, um dadurch ihre Tauchzeit zu verlängern. In der Tat besitzen ausdauertrainierte Leistungssportler eine 40 bis 50% höhere Gesamthämoglobinmenge als untrainierte Personen [16, 15]. Dies würde eine zusätzliche Sauerstoffverfügbarkeit von 500ml Blut entsprechen, wenn die Gesamthämoglobinmenge 1050g anstatt 700g entspricht.

Die Ergebnisse dieser Studie aber zeigen eindeutig, dass die Gesamthämoglobinmenge bei den trainierten Apnoetauchern und den ausdauertrainierten, in Apnoe untrainierten Gerätetauchern der Kontrollgruppe gleich hoch waren. Teilweise entsprachen die Werte jenen Personen, die einer überwiegend sitzenden Tätigkeit nachgehen und lagen sogar 30% unterhalb derjenigen Werte, die für gut trainierte Ausdauersportler (Bsp. Radsportler) angegeben werden [21, 26].

Vielmehr stimmen die Ergebnisse mit Werten von Patienten überein, die unter dem sog. mittelgradigen Schlaf-Apnoe-Syndrom leiden und ebenfalls ein normales Blutvolumen haben, trotz wiederholter nächtlicher Abfälle in der Sauerstoffsättigung im arteriellen Blut. [30]

Die ausdauertrainierte Gruppe der Gerätetaucher besaß eine um 250g höhere Gesamthämoglobinmenge, was einem Anstieg der Sauerstofftransportkapazität von 350ml Blut entspricht. Der fehlende Anstieg in der Gesamthämoglobinmenge

bei den trainierten Apnoetauchern lässt darauf schließen, dass trainierte Apnoetaucher keine genetische Veranlagung haben, wie es bei den ausdauertrainierten Leistungssportlern im Profibereich [30] der Fall ist.

Schlussfolgernd lässt sich sagen, dass die Dauer der hypoxischen Zustände bei den Tauchern nicht ausreichend lang genug ist, um eine effiziente Erythropoese anzuregen.

Es wird angenommen, dass mindestens 80 Minuten lange, durchgehend andauernde hypoxische Zustände bzw. 240 Minuten kumulierte intermittierende Hypoxien notwendig sind (zweieinhalb minütige Hypoxie mit 10,5% Sauerstoff – Stickstoffgemisch gefolgt von eineinhalb Minuten normalen Sauerstoffverhältnissen, [5, 19]).

Die während dieser Studie gewonnenen Ergebnisse widersprechen der gängigen Meinung, dass eine erhöhte Gesamthämoglobinmenge einen zusätzlichen Sauerstoffspeicher für die Apnoetaucher darstellt. Nichtsdestotrotz muss der fehlende Langzeiteffekt des Apnoetrainings auf die Gesamthämoglobinmenge in Langzeitstudien weiterhin untersucht und noch nachgewiesen werden.

Mit den aus dieser Studie gewonnenen Erkenntnissen lässt sich abschließend sagen, dass die Berichte bestätigt werden können, in denen eine deutliche Kontraktion der Milz nach wiederholten Apnoetauchgängen festgestellt wurde. Aber anders als in diesen Berichten konnten bei diesen Untersuchungen keinerlei Veränderungen bezüglich eines Anstiegs der Hämoglobinkonzentration oder eines Anstiegs beim Gesamtblutvolumen nach der Durchführung von Apnoetauchgängen registriert werden.

Nachdem ein immersionsdiuresebedingter Anstieg der Blutkonzentration ausgeschlossen werden kann, stellen die verstrichenen Zeitspannen von zwei bis drei Minuten zwischen Verlassen des Wassers nach Beendigung der Apnoephase eine mögliche Fehlerquelle dar.

Ferner führt die verstrichene Zeit bis zur Gewinnung der Blutproben vor und während der CO-Rückatmung und die zur sonografischen Vermessung der Milz benötigte Zeit, ebenfalls vor der CO-Rückatmung, eine mögliche Ursache für diese Ergebnisse dar, welche von den Angaben in der bisherigen Literatur abweichen.

Dies wird auch durch die Annahme gestützt, dass ein durch Apnoetauchen-induzierter Anstieg des Hämoglobinspiegels nur von bescheidenem und vorübergehendem Charakter war.

Zu guter Letzt kann aufgrund der gleich hohen Gesamthämoglobinmenge, sowie des unter normalen Umständen gleichen Milzvolumens bei trainierten Apnoetaucher sowie untrainierten Personen der Kontrollgruppe folgendes gesagt werden:

Eine besondere Anpassung der Milz als Blutspeicher und des Hämoglobinsystems als Sauerstoffspeicher zur Verbesserung der Ausdauerfähigkeit beim Menschen ist unwahrscheinlich.

5. Zusammenfassung

Bei Meeressäugern, wie der Weddell-Robbe, steigt durch eine Kontraktion der Milz das Blutvolumen an. Dadurch steht dann eine größere Sauerstoffmenge zur Verfügung, die das Tier zu einer längeren Tauchzeit befähigt. Beim Menschen hingegen wurde von einem Anstieg der Hämoglobinkonzentration berichtet.

Dieser könnte möglicherweise auf eine Steigerung der Blutkonzentration aufgrund immersionsbedingter Diurese zurückzuführen sein. Um diese Frage eindeutig klären zu können, untersuchte diese Arbeit die Auswirkung wiederholter Apnoetauchgänge auf die Größe der Milz, die Gesamthämoglobinmenge (tHb-mass), das Erythrozyten- und Plasmavolumen sowie auf die Hämoglobinkonzentration.

Bei der Versuchsgruppe aus zehn trainierten Apnoetauchern und einer Kontrollgruppe aus sieben Gerätetauchern (ohne besonderes Apnoetraining) wurden mit Hilfe der optimierten CO-Rückatmungsmethode die Gesamthämoglobinmenge und das Plasmavolumen quantitativ bestimmt. Das Milzvolumen wurde mit Hilfe sonografischer Messungen ermittelt, die vor und unmittelbar nach einer Serie von fünf aufeinander folgenden Apnoetauchgängen, im Becken in 4m Tiefe eines beheizten Hallenbades, bei 25°C Wassertemperatur durchgeführt wurden.

Bei den trainierten Apnoetauchern ergab sich nach der Apnoeserie durchschnittlich eine Reduktion des Milzvolumens von 26% und damit eine hoch signifikante Abnahme ($p < 0,001$). Bei der Kontrollgruppe dagegen wurde kein signifikanter Effekt beobachtet.

In Bezug auf die hämatologischen Parameter war bei beiden Probandengruppen keine signifikante Änderung zu verzeichnen – im Gegensatz zu Berichten in der Literatur.

In der Urinausscheidung ergaben sich zwischen beiden Gruppen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede.

Beide Tatsachen, sowohl die bescheidene und kurzzeitige Milzkontraktion als auch die unverändert gebliebenen Blutparameter in Bezug auf Hämoglobinkonzentration, Gesamthämoglobinmenge und Gesamtblutvolumen nach den wiederholten Apnoetauchgängen, spiegeln die Rolle der Milz als wichtigen Blutspeicher zur Verlängerung der Apnoetauchzeit beim Menschen nicht wider.

Mit dieser Feststellung sind gleichzeitig einige Aussagen bzw. Ungereimtheiten, die in der relevanten Literatur auftauchen zu korrigieren oder zu klären:

Ein diuresebedingter Anstieg der Blutkonzentration konnte ebenso ausgeschlossen werden wie eine Abschwächung des Tauchreflexes durch Submersion im beheizten Wasser eines Hallenbads mit Verwendung von Neoprenanzügen.

Einzig die verstrichene Zeitspanne zwischen Beendigung des letzten Apnoetauchgangs und Gewinnung der Blutproben für die optimierte CO-Rückatmung, könnten die aufgetretenen Abweichungen erklären. Das würde Berichte bestätigen, die von nur geringfügigen und vorübergehenden apnoeinduzierten Anstiegen der Hämoglobinspiegel berichteten.

Neben der Bestätigung der wichtigen Rolle der Milz beim Apnoetauchen sind zwei weitere Fragestellungen für das Gesamtergebnis dieser Studie von entscheidender Bedeutung:

- die prinzipiell gleich hohen Gesamthämoglobinmengen bei trainierten Apnoetauchern als auch bei untrainierten Gerätetauchern.
- die Tatsache, dass bei allen Probanden die Gesamthämoglobinmengen denjenigen von Personen entsprachen, die überwiegend im Sitzen tätig sind – wobei die Mengen sogar 30% niedriger als bei ausdauertrainierten Sportlern waren.

Zudem unterstützen jedoch die Ergebnisse der tHb-mass Bestimmung die Vermutung, dass auch die optimierte CO-Rückatmungsmethode trotz sehr hoher Messgenauigkeit, kurzen Messdauer und minimaler Invasivität ungeeignet ist, um die geringfügigen und äußerst kurzzeitig bestehenden Veränderungen bei der Gesamthämoglobinmenge durch Milzkontraktion bei Apnoe zu erfassen.

Daraus folgt in Zusammenschau aller Ergebnisse abschließend, dass beim Menschen eine besondere Anpassung der Milz und des Hämoglobinsystems als Blut- und Sauerstoffspeicher bei kurzweiliger Belastung (im Minuten-Bereich) durch Apnoe bedingt ist nach dieser Studie nicht bestätigt werden kann.

6. Literaturverzeichnis

1. AIDA International. www.aida-international.org, Stand 18.01.2010, Quelltext:
<http://www.aidainternational.org/asportal1/code/page.asp?sType=wr&CountryID=4&actID=3&ObjectID=136>
2. Bakovic D, Eterovic D, Saratlija-Novakovic Z, Palada I, Valic Z, Bilopavlovic N, Dujic Z. Effect of human splenic contraction on variation in circulating blood cell counts. *Clin Exp Pharm Physiol* 2005;32:944-951
3. Bakovic D, Valic Z, Eterovic D, Vukovic I, Obad A, Marinovic-Terzic I, Dujic Z. Spleen volume and blood flow response to repeated breath-hold dives. *J Appl Physiol* 2003;95:1460-1466
4. Burge CM, Skinner SI. Determination of hemoglobin mass and blood volume with CO: evaluation and application of a method. *J Appl Physiol* 1995;79:623-631
5. Eckardt KU, Bouttellier U, Kurtz A, Schopen M, Koller EA, Bauer C. Rate of erythropoietin formation in humans in response to acute hypobaric hypoxia. *J Appl Physiol* 1989;66:1785-1788
6. Epstein M. Renal effects of head-out water immersion in humans: a 15-year update. *Physiol Rev* 1992;72:563-621
7. Espersen K, Frandsen H, Lorentzen T, Kanstrup IL, Christensen NJ. The human spleen as an erythrocyte reservoir in diving-related interventions. *J Appl Physiol* 2002;92:2071-2079
8. Ferrant A, Leners N, Michaux JL, Verwilghen RL, Sokal G. The spleen and haemolysis: evaluation of the intrasplenic transit time. *Br J Haematol* 1987;65:31-34
9. Ferretti G, Costa M. Diversity in and adaptation of breath-hold diving in humans. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 2003;136:205-213
10. Foster GE, Sheel AW. The human diving response, its function, and its control. *Scand J Med Sci Sports* 2005;15:3-12
11. Gooden BA. Mechanism of the human diving response. *Integr Physiol Behav Sci* 1994;29:6-16

12. Gore CJ, Bourdon PC, Woolford SM, Ostler LM, Eastwood A, Scroop GC. Time an Sample Site Dependency of the Optimized CO-Rebreathing Method. *Med Sci Sports Exc* 2006;38:1187-1193
13. Gore CJ, Hopkins WG, Burge CM. Errors of measurement for blood volume parameters: a meta-analysis. *J Appl Physiol* 2005;99:1745-1758
14. Heek CWJ. Untersuchungen zum Tauchreflex beim Menschen und zu Atemgrößen beim Gerätetauchen, Med. Dissertation, Universität Düsseldorf (2001)
15. Heinicke K, Prommer N, Cajigal J, Viola T, behn C, Schmidt W. Long-term exposure to intermittent hypoxia results in increased haemoglobin mass, reduced plasma volume, and elevated erythropoetin plasma levels in man. *Eur J Appl Physiol* 2003;88:535-543
16. Heinicke K, Wolfarth B, Winchenbach P, Biermann B, Schmid A, Huber G, Friedmann B, Schmidt W. Blood volume and haemoglobin mass in elite athletes of different disciplines. *Int J Sports Med* 2001;22:504-512
17. Hurford WE, Hochchka PW, Schneider RC, Guyton GP, Stanek KS, Zapol DG, Liggins GC, Zapol WM. Splenic contraction, catecholamine release, and blood volume redistribution during diving in the Weddell seal. *J Appl Physiol* 1996;80:298-306
18. Hurford WE, Hong SK, Park YS, Ahn DW, Shiraki K, Mohri M, Zapol WM. Splenic contraction during breath-hold diving in the Korean ama. *J Appl Physiol* 1990;69:932-936
19. Knaupp W, Khilnani S, Sherwood J, Scharf S, Steinberg H. Erythropoetin response to acute normobaric hypoxia in humans. *J Appl Physiol* 1992;73:837-840
20. Koga T. Correlation between sectional area of the spleen by ultrasonic tomography and actual volume of the removed spleen. *J Clin Ultrasound* 1979;7:119-120
21. Martino M, Gledhill N, Jamnik V. High VO_2 max with no history of training is primarily due to high blood volume. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34:966-971
22. Matsuda S, Uchida T. Blood cell kinetics in the spleen. *Rinsho Ketsueki* 1989;30:1261-1265
23. Muth CM, Ehrmann U, Radermacher P. Physiological and clinical aspects of apnea diving. *Clin Chest Med* 2005;26:381-394

24. Overgaard K, Friis S, Pedersen RB, Lykkeboe G. Influence of the lung volume, glossopharyngeal inhalation and $P_{ET}O_2$ and $P_{ET}O_2$ on performance in trained breath-hold divers. *Eur J Appl Physiol* 2006;97:158-164
25. Radermacher P, Muth CM. Apnoetauchen – Physiologie und Pathophysiologie. *Dtsch Z Sportmed* 2002;53:185-191
26. Richardson M, de Bruijn R, Holmberg HC, Björklund G, Haughey H, Schagatay E. Increase in haemoglobin concentration after maximal apneas in divers, skiers, and untrained humans. *Can J Appl Physiol* 2005;30:276-281
27. Schagatay E, Andersson JPA, Hallén M, Pålsson B. Selected contribution: role of spleen emptying in prolonging apneas in humans. *J Appl Physiol* 2001;90:1623-1629
28. Schagatay E, Haughey H, Reimers J. Speed of spleen volume changes evoked by serial apneas. *Eur J Appl* 2005;93:447-452
29. Schmidt W, Prommer N. The optimised CO-rebreathing method: a new tool to determine total haemoglobin mass routinely. *Eur J Appl Physiol* 2005;95:486-495
30. Schmidt W. Effects of intermittent hypoxia to high altitude on blood volume and erythropoetic activity. *High Alt Med Biol* 2002;3:167-176
31. Stewart IB, McKenzie DC. The human spleen during physiologic stress. *Sports Med* 2002;32:361-369
32. Stewart IB, Warburton DER, Hodges ANH, Lyster DM, McKenzie DC. Cardiovascular and splenic responses to exercise in humans. *J Appl Physiol* 2003;94:1619-1626
33. Teubners Taschenbuch der Mathematik Teil 1 - B.G. Teubner 1996 - Ss.78-101, Ss.1032-1059, Ss.1067-1070 - Herausgeber E. Zeidler
34. Thornton SJ, Spielman DM, Pelc NJ, Block WF, Crocker DE, Costa DP, LeBoeuf BJ, Hochachka PW. Effect of forced diving on the spleen and hepatic sinus in northern elephant seal pups. *Proc Natl Acad Sci USA* 2001;98:9413-9418
35. Univariate Statistics – ANOVA Post Hocs – Quelltext:
<http://www.uwsp.edu/psych/cw/statmanual/posthocs.html>

Danksagung

Ich möchte mich zuerst bei all denjenigen bedanken, die unterstützend und beratend oder als Freiwillige bei den Untersuchungen zur Erstellung dieser Arbeit beigetragen haben.

An erster Stelle sei Herr Prof. Dr. med. P. Radermacher genannt, dem ich für die freundliche Überlassung des Themas, für seine stets wertvolle Unterstützung und Beratung bei der Planung, Organisation und Durchführung der Arbeit, sowie für die verständnisvolle Begleitung bedanken möchte.

Ferner möchte ich mich bei Herrn Professor Dr. J.M. Steinacker (Sektion für Sport- und Rehabilitationsmedizin der Universität Ulm) und bei Herrn Professor Dr. W. Schmidt (Abteilung für Sportmedizin und Sportphysiologie der Universität Bayreuth) für deren kompetente und freundliche Kooperation bedanken. Ohne deren Mitwirken wäre die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Mein Dank gilt ebenfalls Dr. C.M. Muth für seine stets konstruktive Kritik, Beratung und Durchsicht der Arbeit.

Auch spreche ich den Mitarbeitern beider Sportmedizinischen Abteilungen der Universität Ulm und Bayreuth meinen Dank für die freundliche Unterstützung, aus.

Abschließend möchte ich mich auch bei meinem ehemaligen Deutschlehrer, Herrn D. Furkert und Studienkollegen Herr M. Predeschly, bedanken, die freundlicherweise die Tätigkeit des Lektors bei dieser Arbeit übernommen haben.

Curriculum vitae

PERSÖNLICHE ANGABEN:

NAME: Eva Harasta

WOHNORT: Daucherstr. 4, in 86156 Augsburg

GEBURTSDATUM/ -ORT: 06.12.1978 in Brünn

FAMILIENSTAND: ledig, keine Kinder

SCHULBILDUNG:

1985 - 1989: 4 Jahre Volksschule bei St. Ägidius (Grundschule)

1989 - 1998: 9 Jahre am Justus - Von – Liebig – Gymnasium in Neusäß

AUSBILDUNG:

April 1999 – Oktober 2001: 2 ½ Jahre an der Berufsfachschule für
Krankenpflege beim Zentralklinikum Augsburg

STUDIUM:

Oktober 2001 – Februar 2007:

- Studium der Humanmedizin an der Universität Ulm
- Februar 2007 – Januar 2008: Praktisches Jahr
 - Februar – Juni 2007: Krankenhaus St. Elisabeth in Ravensburg, Abteilung für Innere Medizin

- Juni - Oktober 2007: Kantonsspital Aarau in Aarau (Schweiz), Abteilung für Chirurgie
- Oktober 2007 – Januar 2008: Uniklinik Balgrist in Zürich (Schweiz), Abteilung für Orthopädie
- 20.05.2008: Studiumsabschluss mit bestandenem Staatsexamen

PRAKTIKA:

28.02.2005 – 01.04.2005: Famulatur am Klinikum Augsburg, Abteilung Allgemein-, Viszeral- und Transplantationschirurgie

16.09.2005 – 16.10.2005: Famulatur an der Orthopädischen Universitätsklinik am RKU in Ulm, Abteilung für Orthopädie

06.03.2006 – 23.04.2006: Ambulanzfamulatur in der unfallchirurgischen Wundversorgung und Notaufnahme am Klinikum Augsburg

25.09.2006 – 28.10.2006: Famulatur an der Universitätsklinik Berlin, Campus Charité Mitte, Abteilung Anästhesie und operative Intensivmedizin

PROMOTION:

Thema: „Auswirkung wiederholt durchgeführter Apnoetauchgänge auf die Größe der Milz, das Gesamtblutvolumen, den Hämatokrit und die Gesamthämoglobinmenge“, als prospektive experimentelle Studie an speziell trainierten Apnoetauchern, trainierten Nichttauchern und untrainierten Probanden

Betreuer: Prof. Dr. med. P. Radermacher, Sektionsleiter der Sektion Anästhesiologische Pathophysiologie und Verfahrensentwicklung, der Klinik für Anästhesiologie am Universitätsklinikum Ulm

BERUFLICHE TÄTIGKEITEN:

seit 01.08.2008: Anstellung als Assistenzärztin in der Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie am Klinikum Augsburg

SONSTIGE TÄTIGKEITEN:

1999 – 2001: 2 ½ Jahre praktische Tätigkeit am Klinikum Augsburg im Rahmen der Krankenpflegeausbildung

11.2001 – 11.2002: 1 Jahr Sitzwachtätigkeit am Klinikum Augsburg

01.08.2003 – 31.07.2008: studentische Hilfskraft am DRK - Blutspendedienst Baden-Württemberg - Hessen, Institut Ulm in der Produktion und Verarbeitung von Vollblutkonserven

SONSTIGES:

Fremdsprachen: Englisch, Tschechisch

Hobbys: Skifahren, Snowboarden, Tauchen, Rennradfahren, Inlineskaten, Lesen

Eva Harasta, Daucherstr. 4, in 86156 Augsburg

Email: eva.harasta@web.de

Ort, Datum

Unterschrift