

Aus dem Zentrum für Operative Medizin I
Forschungsgruppe Experimentelle Chirurgie
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Geschäftsf. Direktor: Prof. Dr. H.-D. Röher

Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. J. D. Schipke

Untersuchungen zum Tauchreflex beim Menschen
und zu Atemgrößen beim Gerätetauchen

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

Der Medizinischen Fakultät der
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Christoph Walter Johann Heek

2001

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez. Univ.-Prof. Dr. med. Dieter Häussinger

Dekan

Referent: Prof. Dr. Schipke

Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Thämer

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	4
2. Methodik	5
2.1. Allgemeines	5
2.1. Protokoll	5
2.1.1. Apnoeversuch	5
2.1.2. Ventilationsversuch	7
2.2. Datenerfassung und -auswertung	7
2.3. Untersuchte Größen	8
2.4. Statistische Methoden	8
3. Ergebnisse	9
3.1. Deskriptive Statistik	9
3.1.1. Differenzierung des Probandenkollektivs	9
3.1.2. Deskriptive Darstellung der gemessenen Ergebnisse	12
3.2. Analytische Statistik	20
3.2.1. Apnoeversuch	20
3.2.2. Ventilationsversuch	23
4. Diskussion	26
4.1. Änderungen der Herzfrequenz während Apnoe	26
4.1.1. Apnoe außerhalb des Wassers	26
4.1.2. Apnoe während Immersion mit Gesichtsimmersion	27
4.1.3. Apnoe während Submersion mit Drucklufttauchgerät	30
4.1.4. Apnoe in der Druckkammer	30
4.1.5. Herzfrequenzverlauf	31
4.2. Einflüsse auf die Herzfrequenz während Apnoe	31
4.2.1. Umgebungsbezogene Variable	32
4.2.2. Personenbezogene Variable	35
4.3. Änderung von Atemgrößen beim Gerätetauchen	39
5. Zusammenfassung	43
5.1. Tauchreflex	43
5.2. Atemgrößen beim Gerätetauchen	44
Literaturverzeichnis	45
Anhang	49
Ergebnisse der analytischen Statistik	49
Lebenslauf	52
Danksagung	53
Abstract	54

1. Einleitung

Im Jahr 1870 beschrieb der Franzose Paul Bert eine Herzfrequenzsenkung bei tauchenden Enten von 100 /min auf 14 /min (Bert 1870). Eine entsprechende Beobachtung wurde für einige Seevögel und Seesäugetiere gemacht (Zapol 1987; Anonymus, 1992; Schagatay und Holm 1996) und von Scholander im Jahre 1940 erstmals auch für Säugetiere. Die erste Beschreibung einer Herzfrequenzänderung beim Menschen während Immersion des Gesichtes in Wasser stammt von Irving, Scholander und Grinell (1941).

Der Tauchreflex (im Englischen als „diving response“ oder „diving reflex“ bezeichnet) wird in der wissenschaftlichen Literatur in unterschiedlicher Bedeutung verwendet. U. a. wird damit der expiratorische Atemstillstand beim Untertauchen unter Wasser beschrieben (Ebbecke 1943). In der vorliegenden Arbeit ist die Reaktion des Organismus auf die bei Gesichtsimmersion auftretende Abnahme der Herzfrequenz und Erhöhung des peripheren Vasotonus gemeint. In diesem Sinne wird der Tauchreflex für den Menschen kontrovers diskutiert.

Die vorgelegte Untersuchung soll zur Klärung von Fragen zum Tauchreflex beim Menschen beitragen. Es wird daher untersucht, ob dieser Reflex beim Menschen reproduzierbar existiert, und von welchen Größen er beeinflusst wird.

Ein weiterer Teil der vorgelegten Untersuchung bezieht sich nicht auf den Tauchreflex, sondern befaßt sich mit der Frage, ob und in welcher Form sich die Atmung von Menschen beim Tauchen mit einem Drucklufttauchgerät im Vergleich zum Atemverhalten außerhalb des Wassers ändert.

2. Methodik

Bei der vorliegenden Untersuchung handelt es sich um eine prospektive, nicht randomisierte, experimentelle Studie. Die Daten wurden im Zeitraum von 1996 bis 1998 erhoben. Die Probanden nahmen freiwillig an der Studie teil. Es handelte sich um Sport- oder Hobbytaucher eines Düsseldorfer und eines Kaarster Tauchvereines, sowie um sich in der Ausbildung zum Rettungstaucher befindende Feuerwehrmänner und deren 2 Ausbilder.

2.1. Allgemeines

Daten wurden von insgesamt 145 Personen im Alter von 13 bis 68 Jahren erhoben. Ausgewertet wurden nur die zum Abschluß der Datenerhebung mindestens in einem der beiden Teiluntersuchungen vollständig untersuchten Probanden. Das waren für die Untersuchung zum Tauchreflex 102 Probanden; davon waren 20 weiblich. Für die Untersuchung über das Atemverhalten stellten sich 118 Probanden zur Verfügung; davon waren 26 weiblich.

2.1. Protokoll

Entsprechend den beiden zu beleuchtenden Fragen gliedert sich die Untersuchung in zwei voneinander unabhängige Teiluntersuchungen. Zum einen wurden im „Apnoeversuch“ Daten zur Herzfrequenzänderung vor, während und nach einer Apnoephase gewonnen.

Im „Ventilationsversuch“ wurden Daten zu Atemgrößen während des Tauchens mit Drucklufttauchgerät (DTG) und an Land gewonnen.

2.1.1. Apnoeversuch

Vor der Versuchsdurchführung wurden die Probanden über den Versuchsablauf informiert und um ihre freiwillige Mitwirkung gebeten. Es wurden keine Angaben zu den erwarteten Ergebnissen gemacht. Die Probanden wurden gebeten, vor den Versuchen nicht zu hyperventilieren. Es wurde keine Vorgabe hinsichtlich des Inspirationsniveaus vor oder während des Atemanhaltens gemacht.

Die Herzfrequenz der Probanden wurde mit handelsüblichen, wasserdichten Herzfrequenzmeßgeräten (Firma Polar, Büttelborn) erfaßt.

Außerhalb des Wassers wurde zunächst die Ruheherzfrequenz bestimmt. Nach beliebig tiefer Inspiration begann die individuell unterschiedlich lange Apnoephase. Danach folgte spontane Atmung. Diese Versuchsbedingung wird im folgenden mit „außerhalb des Wassers“ bezeichnet.

Während Immersion des Körpers bis zum Hals wurde die Ruheherzfrequenz bestimmt. Nach beliebiger Inspiration wurde fußwärts bis auf maximal 3,5 m abgetaucht. An diese unterschiedlich lange Apnoephase schloß sich nach Auftauchen des Kopfes eine spontane Atmung an. Die Probanden befanden sich während dieses Protokolls immer in senkrechter Position. Diese Versuchsbedingung wird im folgenden „Immersion mit Gesichtsimmersion“ genannt. In der Literatur wird mehrfach über Versuchsbedingungen mit alleiniger Gesichtsimmersion berichtet, dies ist hier nicht gemeint.

Die Ruheherzfrequenz wurde unter Wasser (3,5 m) während normaler Atmung mit einem DTG bestimmt. Auf eine beliebig tiefe Inspiration folgte eine Apnoe unterschiedlicher Dauer, an die sich wiederum spontane Atmung anschloß. Diese Versuchsbedingung wird im folgenden „Submersion mit DTG“ genannt.

Die Probanden notierten ihre Herzfrequenz während Ruhebedingungen und nach dem Apnoebeginn alle 10 s auf einem vorbereiteten, wasserfesten Formular. Die Herzfrequenz wurde außerdem alle 10 s nach Beendigung der Apnoe über insgesamt 30 s in das Formular eingetragen.

Mit einem Teil der Probanden wurden zusätzlich noch Untersuchungen zur Herzfrequenzänderung in einer Druckkammer des Zentrums für Hyperbare Medizin in Moers durchgeführt. Analog zu der Bestimmung der Herzfrequenz unter Submersionsbedingungen wurde ebenfalls die Ruheherzfrequenz sowie alle 10 s die Herzfrequenz während der Apnoephase und 30 s nach Wiedereinsetzen der Atmung registriert.

Die genannten Messungen wurden jeweils zweimal pro Versuchsperson durchgeführt.

2.1.2. Ventilationsversuch

In diesem Versuch wurden spirometrische Größen wie Vitalkapazität und forcierte Vitalkapazität gemessen. Außerdem wurde der Tiffeneautest durchgeführt und dabei der Peak Flow gemessen. Die Messung wurde mit dem Pneumotachographen (SP-100AT der Firma Schiller AG, Baar CH), durchgeführt. Von den je drei Messungen mit dem Pneumotachographen kam der beste Wert in die Auswertung. Zusätzlich wurde das Atemminutenvolumen, die Atemfrequenz und das durchschnittliche Atemzugvolumen gemessen. Die Messung der letztgenannten Größen erfolgte ein zweites mal unter Wasser. Dazu tauchten die Probanden mit einem kleinen DTG (0,5 oder 2 l) auf den Beckenboden und zählten drei Minuten lang ihre Atemzüge. Zu Beginn und zum Ende wurde anhand eines Manometers der Flaschendruck registriert, und anhand der Druckdifferenz wurde der Luftverbrauch berechnet. Der Luftverbrauch wurde auf die Druckbedingung an der Oberfläche umgerechnet (alle in dieser Untersuchung angegebenen Volumenangaben beziehen sich also auf normalen Luftdruck). Diese Umrechnung in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck (Wassertiefe) erfolgte nach folgender Formel:

$$V_{\text{Luft}} = V_{\text{Flasche}} * \Delta P / \text{Umgebungsdruck} * \text{Zeit}$$

V_{Luft} : Luftverbrauch [l/min]

V_{Flasche} : Volumen der verwendeten Druckluftflasche [l]

ΔP : Druckdifferenz zwischen abgelesenem Flaschendruck vor und nach der Atemfrequenzbestimmung [bar]

Umgebungsdruck: [bar]

Zeit Tauchzeit [min]

2.2. Datenerfassung und -auswertung

Die im Beobachtungszeitraum von 3 Jahren gesammelten Daten wurden auf einem Personalcomputer bearbeitet. Die statistische Analyse erfolgte mit Microsoft Excel. Für die Erstellung von Grafiken wurde ebenfalls Microsoft Excel verwendet. Die Textverarbeitung erfolgte mittels Microsoft Word.

2.3. Untersuchte Größen

Als personenbezogene Daten wurden Alter, Geschlecht, Körpermasse und Körpergröße erfaßt. Zur Abschätzung der Taucherfahrung wurde die Anzahl der Tauchgänge herangezogen. Neben den Herzfrequenzmessungen konnte durch Lungenfunktionsuntersuchung zwischen lungengesunden und nicht lungengesunden Probanden unterschieden werden. Zudem wurde auch das Rauchverhalten (Raucher/ Nichtraucher) erfaßt.

Folgende Daten wurden quantitativ erhoben und ausgewertet:

1. Apnoedauer

2. Herzfrequenz

3. Spirometrische Daten (Beckenrand):

Vitalkapazität	(VC)
Atemminutenvolumen	(AMV)
Atemfrequenz	(AF)
Atemzugvolumen	(AZV)
Forcierte Vitalkapazität	(FVC)
Forciertes Expiratorisches Volumen nach 1 s	(FEV1.0)
Forciertes Expiratorisches Volumen nach 1 s /Vitalkapazität	(FEV1.0/VC)

2.4. Statistische Methoden

Für einfache Vergleiche zwischen zwei Variablen wurde der t-Test verwendet.

Mit der Hypothese, daß zwischen der Veränderung der Herzfrequenz und anderen erfaßten Daten eine Abhängigkeit besteht, wurde in einem ersten Schritt eine lineare Regressionsrechnung durchgeführt. In einem weiteren Schritt wurde mittels einer multiplen linearen Regressionsrechnung untersucht, inwieweit einzelne Variable an der Änderung der Herzfrequenz beteiligt sind. Als signifikant wurden nur Zusammenhänge mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p \leq 0,05$ angesehen.

3. Ergebnisse

Im folgenden werden die gewonnenen Daten mit Hilfe der deskriptiven Statistik präsentiert. Danach werden mit den Mitteln der analytischen Statistik Zusammenhänge zwischen den Herzfrequenzänderungen und verschiedenen Einflußgrößen untersucht.

3.1. Deskriptive Statistik

3.1.1. Differenzierung des Probandenkollektivs

Alle Teilnehmer der Untersuchungen waren Taucher. Der größte Anteil rekrutierte sich aus dem Deutschen Unterwasser Club Düsseldorf. Weitere Teilnehmer waren Mitglieder eines Tauchvereins aus Kaarst und tauchende Mitglieder der Berufsfeuerwehren aus Duisburg und Essen.

Das Probandenkollektiv wird im folgenden nach unterschiedlichen Kriterien differenziert, die für die analytische Statistik als unabhängige Variable dienen. Bei den Resultaten handelt es sich um Mittelwerte, Standardabweichung des Mittelwertes sowie im Einzelfall auch Median und Spannweite.

Geschlecht

Beim Apnoeversuch führten 102 Probanden den Versuchsablauf vollständig durch; davon waren 20 weiblich. Für den Ventilationsversuch stellten sich 118 Probanden zur Verfügung; davon waren 26 weiblich.

Alter

Das durchschnittliche Alter betrug im Apnoeversuch (n=102) $35,1 \pm 9,9$ Jahre (Median 34,0 Jahre, Spannweite 13 - 68 Jahre) und im Ventilationsversuch (n=118) $36 \pm 10,4$ Jahre (Median 34,5 Jahre, Spannweite 13 - 68 Jahre)

Das Durchschnittsalter der Frauen betrug in beiden Versuchsteilen $34,2 \pm 4,2$ Jahre (Median 34,0 Jahre, Spannweite 25 - 42 Jahre).

Das Durchschnittsalter der Männer (n=80) lag im Apnoeversuch bei $35,5 \pm 10,8$ Jahren (Median 34 Jahre, Spannweite 13 - 66 Jahre). Im Ventilationsversuch lag das mittlere Alter der Männer (n=92) bei $36,5 \pm 11,4$ Jahren (Median; 35,5 Jahre; Spannweite 13 - 68 Jahre). Damit gab es weder für die beiden Versuchsteile noch zwischen den Geschlechtern nennenswerte Unterschiede.

Größe, Körpermasse und Body Mass Index

Im Apnoeversuch und im Ventilationsversuch betrug die Körpergröße der Probanden jeweils $1,78 \pm 0,08$ m.

Im Apnoeversuch betrug die Körpermasse der Probanden $75,5 \text{ kg} \pm 13,0 \text{ kg}$, im Ventilationsversuch lag sie mit $76,1 \pm 14,2 \text{ kg}$ geringfügig höher.

Der Body Mass Index wurde als Maß für den Ernährungszustand herangezogen und folgendermaßen berechnet: Quotient der Körpermasse [kg] pro dem Quadrat der Körpergröße [m]. Dabei gilt ein Wert von 20 - 25 als normal, Werte unter 20 als untergewichtig, Werte zwischen 25 - 30 als übergewichtig, zwischen 30 und 40 als adipös. Es fand sich folgende Verteilung (Tab.1):

Tab. 1: Aufteilung der Probanden nach Body Mass Index (BMI) in beiden Versuchsteilen. Die meisten Probanden waren normalgewichtig. Etwa 10 % waren untergewichtig und ca. 30 % hatten leichtes Übergewicht

Apnoeversuch			Ventilationsversuch		
	n =			n =	
BMI <20	11	10,8 %	BMI <20	11	9,3 %
BMI 20-25	61	59,8 %	BMI 20-25	73	61,9 %
BMI 25-30	29	28,4 %	BMI 25-30	30	25,4 %
BMI 30-40	1	1,0 %	BMI 30-40	4	3,4 %
Summe:	102	100 %	Summe:	118	100 %

Taucherfahrung

In Europa gibt es ca. 3 Millionen Freizeittaucher mit unterschiedlichem Erfahrungshintergrund. Die Taucherfahrung der in dieser Studie untersuchten Taucher wurde nach Absprache mit langjährigen Tauchausbildern über folgendes Schema erfaßt (Tab. 2):

Tab. 2: Aufteilung der Probanden nach Taucherfahrung. Etwa die Hälfte der Probanden gehörte zu den Experten

Tauchgänge	Taucherfahrung	Probanden [%]
0 - 40	Anfänger	20
41 - 150	Fortgeschrittene	34
> 150	Experten	46

In der Literatur konnte lediglich eine Einteilung gefunden werden, die jedoch für diese Untersuchung nicht übertragbar war, da sie nach Tauchstunden und nicht nach Tauchgängen unterscheidet (Hong et al. 1970). Hong teilt seine 29 Probanden nach Taucherfahrung in 4 Gruppen ein (weniger als 100 Tauchstunden, 100 - 500 Tauchstunden, 500 - 1000 Tauchstunden und > 1000 Tauchstunden).

Lungengesundheit

Durch die spirometrischen Untersuchungen konnte zwischen lungengesunden und nicht lungengesunden Probanden unterschieden werden. Mögliche Störungen der Atmung wurden durch Auswertung folgender spirometrischer Faktoren diagnostiziert:

Restriktive Veränderungen der Luftwege liegen vor, wenn die individuelle Vitalkapazität weniger als 80 % des Wertes der entsprechenden Population beträgt. Eine Obstruktion liegt vor, wenn das forcierte expiratorische Volumen nach 1 s (FEV1.0) kleiner als 70 % der Vitalkapazität ist (= Tiffeneautest). Falls beide Bedingungen erfüllt sind, wird eine Kombination beider Störungen angenommen.

Im untersuchten Probandenkollektiv fanden sich 10 männliche Probanden mit einer leichtgradigen obstruktiven Ventilationsstörung und 1 männlicher Proband mit einer leichtgradigen restriktiven Ventilationsstörung.

Rauchverhalten

Im Apnoeversuch lagen von 102 Probanden lediglich für 89 Probanden Angaben zum Rauchverhalten vor. 65 Probanden waren Nichtraucher (73 % von 89), 24 Probanden waren Raucher (27 %).

Im Ventilationsversuch machten 98 von 118 Probanden Angaben zum Rauchverhalten. 71 Probanden rauchten nicht (72 % von 98) und 27 Probanden

rauchten (28 %). Der Anteil der Raucher war also bei beiden Versuchen ungefähr gleich.

3.1.2. Deskriptive Darstellung der gemessenen Ergebnisse

Apnoeversuch

Herzfrequenzverlauf

Die Werte aus jeweils zwei Messungen wurden gemittelt. Um die individuelle Apnoedauer für die Mittelwertbildung zu berücksichtigen, wurde das Apnoeende mit t bezeichnet und die Herzfrequenzen nur zu folgenden Zeitpunkten angegeben: Ruhebedingungen, Apnoebeginn, 30, 20 und 10 s vor Apnoeende und 10, 20 und 30 s nach Apnoeende (Tab. 3 und Abb. 1). Es liegen keine Herzfrequenzwerte vor, die exakt zum Apnoeende (t) bestimmt wurden, da die Probanden entweder kurz vor oder kurz nach Registrierung der Herzfrequenz wieder atmeten.

Tab. 3: Herzfrequenzen während Apnoe. Der Zeitpunkt t kennzeichnet das individuell unterschiedliche Ende der Apnoe. Wiedergegeben ist also jeweils die Phase 30 s vor und nach dem individuellen Apnoeende. Unabhängig von der Umgebung kam es zu einer Abnahme der Herzfrequenz. Luft: außerhalb des Wassers; Imm: Immersion mit Gesichtsimmersion; Sub: Submersion mit DTG; DK: Druckkammer (1,2 bar entsprechend einer Wassertiefe von 2 m)

	Ruhe- wert	0 s	t - 30 s	t - 20 s	t - 10 s	t + 10s	t + 20 s	t + 30 s
Luft	85 ± 13	88 ± 14	85 ± 15	83 ± 15	82 ± 14	82 ± 13	84 ± 13	86 ± 17
Imm	84 ± 14	88 ± 16	74 ± 19	75 ± 15	73 ± 14	75 ± 16	83 ± 15	84 ± 15
Sub	82 ± 15	81 ± 16	74 ± 19	74 ± 15	72 ± 14	74 ± 14	77 ± 14	78 ± 16
DK	76 ± 12	78 ± 12	72 ± 7	71 ± 8	71 ± 6	71 ± 6	72 ± 8	71 ± 12

Bei allen Protokollen mit Ausnahme der Submersion mit DTG führte das Anhalten der Luft zunächst zu einer leichten Steigerung der Herzfrequenz. Im Apnoeverlauf kam es dann zu einer unterschiedlich stark ausgeprägten Senkung der Herzfrequenz. 30 s nach Ende der Apnoe waren die Ruhewerte im wesentlichen wieder erreicht (Tab. 4).

Tab. 4: Relative Änderungen der Herzfrequenzen [%]. Wurde als Referenz die Ruheherzfrequenz (oben) gewählt, waren die Herzfrequenzabnahmen weniger stark ausgeprägt, als wenn der Apnoebeginn (unten) als Referenz gewählt wurde. Die grau unterlegten Zellen beinhalten die maximalen Änderungen der Herzfrequenz. t = Apnoeende; Luft: außerhalb des Wassers; Imm: Immersion mit Gesichtsimmersion; Sub: Submersion mit DTG; DK: Druckkammer (1,2 bar)

	Ruhewert 0 s	t -30 s	t-20 s	t-10 s	t+10 s	t+20 s	t+30 s
Luft	0 %	3%	-1%	-3%	-4%	-2%	0%
Imm	0 %	5%	-12%	-11%	-14%	-1%	0%
Sub	0 %	-1%	-10%	-10%	-11%	-10%	-5%
DK	0 %	2%	-5%	-6%	-6%	-5%	-2%

	Ruhewert 0 t	t -30 s	t-20 s	t-10 s	t+10 s	t+20 s	t+30 s
Luft	-3%	0%	-3%	-5%	-7%	-4%	-3%
Imm	-5%	0%	-16%	-15%	-18%	-5%	-4%
Sub	1%	0%	-9%	-9%	-10%	-9%	-4%
DK	-2%	0%	-7%	-8%	-8%	-7%	-4%

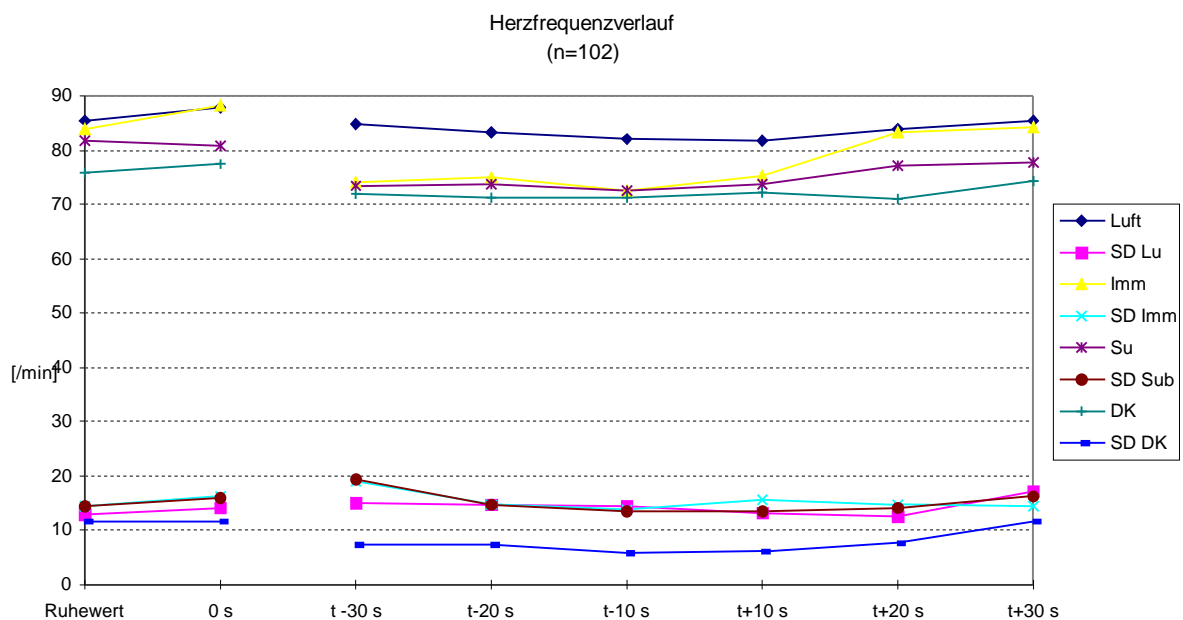


Abb. 1: Verlauf der Herzfrequenz bei den vier Apnoeprotokollen. SD = Standardabweichung; Luft: außerhalb des Wassers; Imm: Immersion mit Gesichtsimmersion; Sub: Submersion mit DTG; DK: Druckkammer

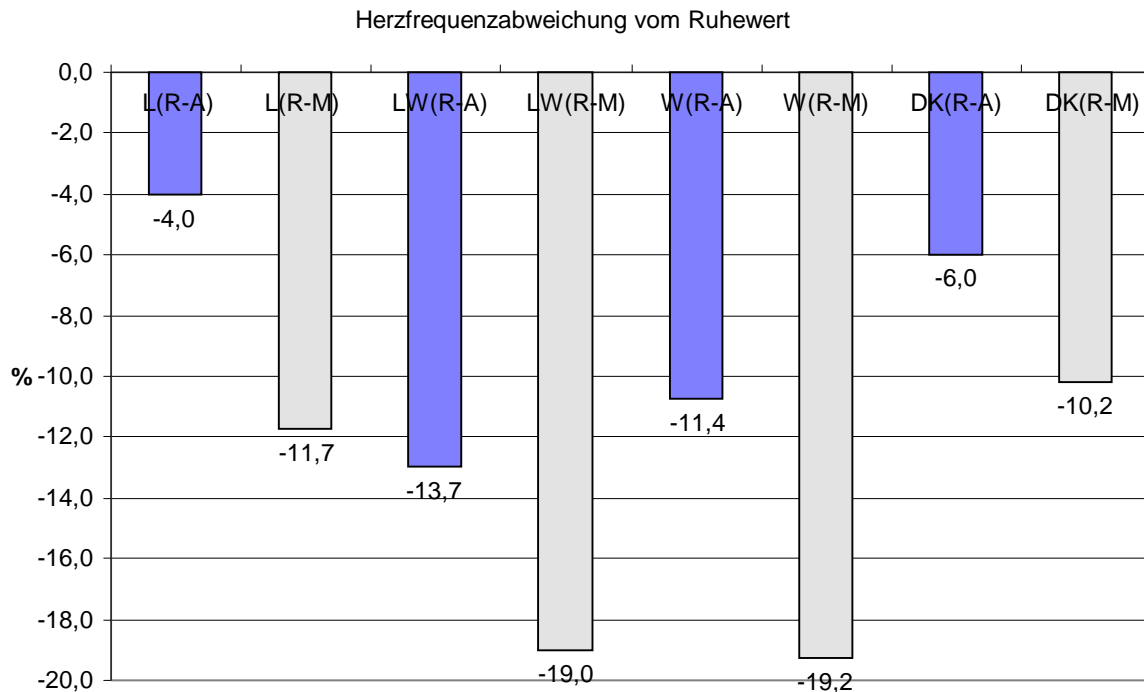


Abb. 2: Vergleich der relativen Änderungen der Herzfrequenzen. Die individuelle maximale Herzfrequenzabnahme war bei Immersion gleich stark wie beim Gerätetauchen und in jedem Protokoll größer als die bei Apnoeende bestimmte Abnahme. (R-A) = Differenz der Herzfrequenz Ruhewert - Ende der Apnoephase, (R-M) = maximal aufgetretene Differenz, L: Luft; L-W: Luft - Wasser, während Immersion mit Gesichtsimmersion; W: Wasser, Submersion mit DTG; DK: Druckkammer)

Die Herzfrequenzen nahmen im Mittel bis zum Ende der Apnoe außerhalb des Wassers und in der Druckkammer relativ moderat um 4,0 bzw. um 6,0 % ab. Im Wasser, also während Immersion mit Gesichtsimmersion und Submersion mit DTG, waren die Abnahmen deutlich größer und betrugen 13,7 % bzw. 11,4 %. Betrachtet man die individuelle maximale Herzfrequenzabnahme unabhängig vom Zeitpunkt ihres Auftretens und vergleicht sie mit der Herzfrequenzabnahme zum Ende der Apnoe, ergibt sich ein verändertes Bild (Abb. 2). Die maximalen Abnahmen der Herzfrequenz waren in jedem der Protokolle größer als die zum Ende der Apnoe. Auch bei dieser Berechnungsart blieben die Herzfrequenzabnahme bei den beiden Protokollen, in denen sich die Probanden im Wasser befanden, größer als bei der Apnoe am Beckenrand oder in der Druckkammer.

Die Verteilung der Herzfrequenzabnahme war individuell sehr unterschiedlich. So gab es bei jedem der vier Protokolle Probanden, die mit einer deutlichen Herzfrequenzabnahme im Vergleich zum Ruhewert reagierten, aber auch solche,

deren Herzfrequenz zunahm (Abb. 3). Es fiel auf, daß die Zahl derer, die während Apnoe mit einer Herzfrequenzzunahme reagierten, am Beckenrand deutlich größer war als bei der Apnoe im Wasser (ohne DTG und mit DTG).

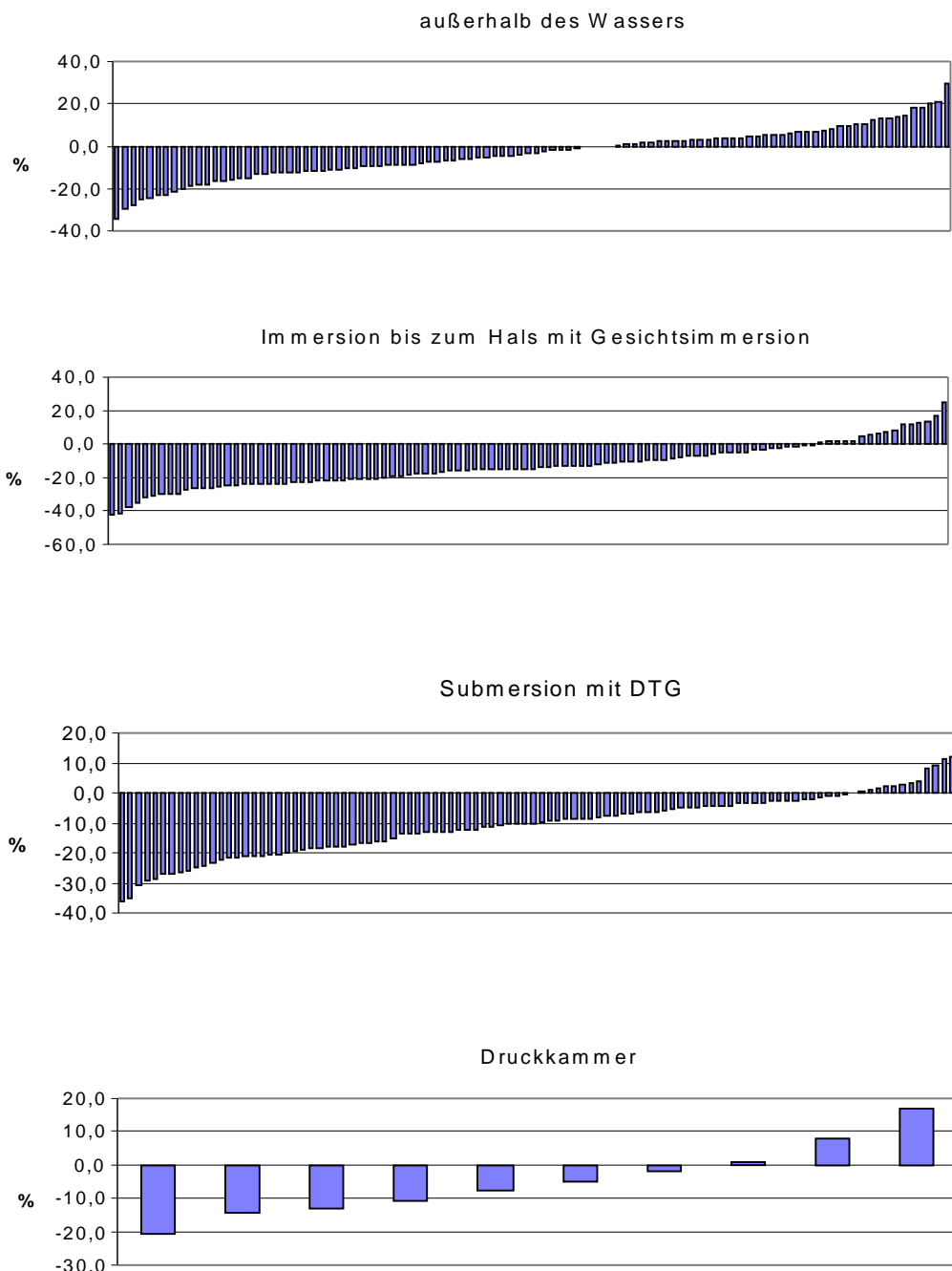


Abb. 3: Relative, nach Größe sortierte Herzfrequenzänderungen (Ruhewert - Ende Apnoe) außerhalb des Wassers (oben), bei Immersion mit Gesichtsimmersion (Mitte oben), während Submersion mit DTG (Mitte unten) (jeweils n=102) und in der Druckkammer (unten) (n=10)

Diese unterschiedlichen Reaktionen lassen sich weiter veranschaulichen, wenn die Mittel- und die Extremwerte der Herzfrequenzänderungen (z.B. während Immersion mit Gesichtsimmersion) wiedergegeben werden (Abb. 4). Im Extrem kam es zu einer Zunahme der Herzfrequenz um 40 % und zu einer Abnahme um 53 % (jeweils nicht gemittelte Einzelmessung).

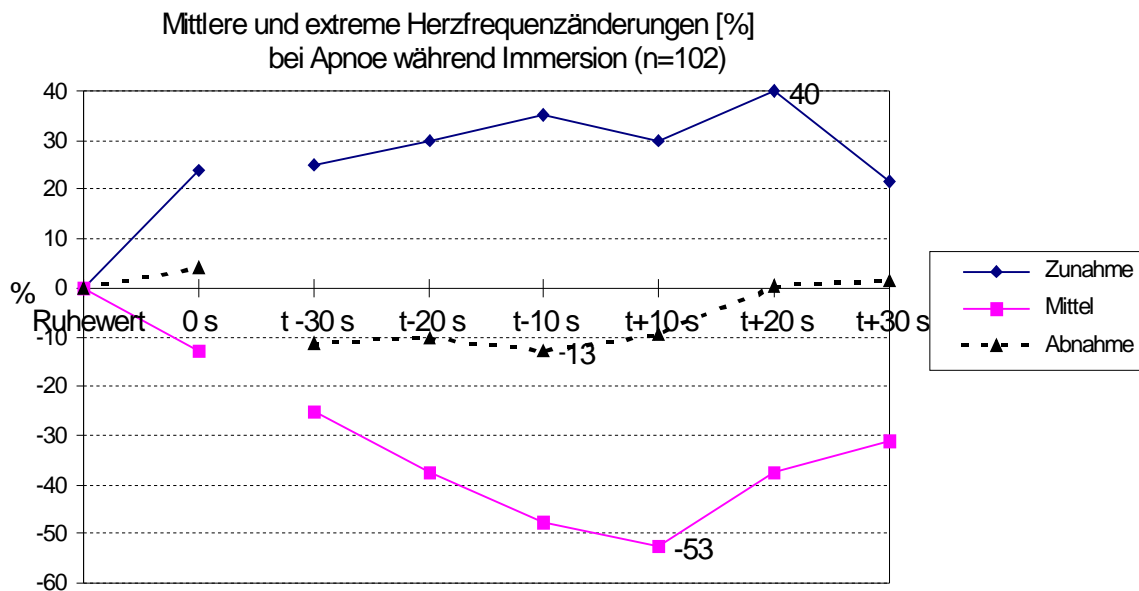


Abb. 4: Die Abbildung macht am Beispiel der Immersion mit Gesichtsimmersion deutlich, in welchem breiten Spektrum sich die Herzfrequenz ändern kann: Während diese Intervention im Mittel zu einer Herzfrequenzabnahme führt, kann es bei einzelnen Probanden zu einer 40 %igen Zunahme oder zu einer 53 %igen Abnahme der Herzfrequenz kommen (n = 102).

Nicht nur die Betrachtung der Extremwerte sondern auch der zeitliche Ablauf der Herzfrequenzreaktion bietet interessante Aspekte:

Mit Beginn der Apnoe kam es mit Ausnahme des mit einem DTG durchgeführten Versuchs zu einer deutlichen initialen Herzfrequenzzunahme (Abb. 5). Die Latenzzeit bis zum Auftreten von Herzfrequenzabnahmen im Vergleich zum Ruhewert betrug 20 - 30 s.

relative Herzfrequenzänderung der ersten 40 s,
Ruhewert als Referenz

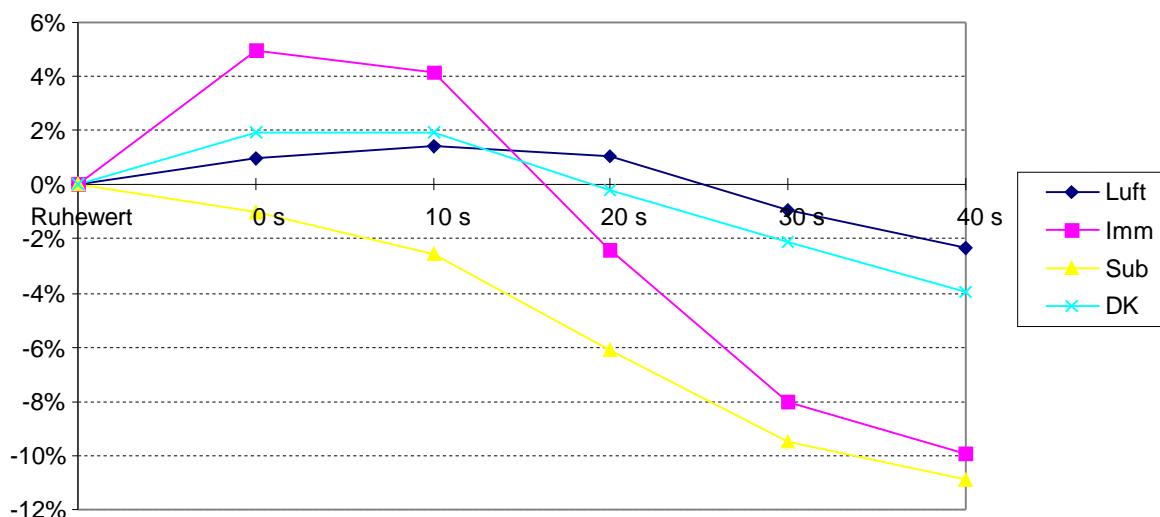


Abb. 5: Relative Änderung der Herzfrequenz. Mit Ausnahme der Submersion kommt es initial zu einer unterschiedlich ausgeprägten Herzfrequenzzunahme. Unter Submersionsbedingungen findet sich eine näherungsweise lineare Herzfrequenzabnahme. Die Herzfrequenzabnahme bei Immersion mit Gesichtsimmersion (Imm) und bei Submersion mit DTG (Sub) war nach initial unterschiedlichem Anstieg bei 30 s und 40 s gleich stark. Die Werte außerhalb des Wassers (Luft) und in der Druckkammer (DK) bei 1,2 bar verhielten sich nahezu gleich.

relative Herzfrequenzänderung der ersten 40 s,
Beginn der Apnoe als Referenz

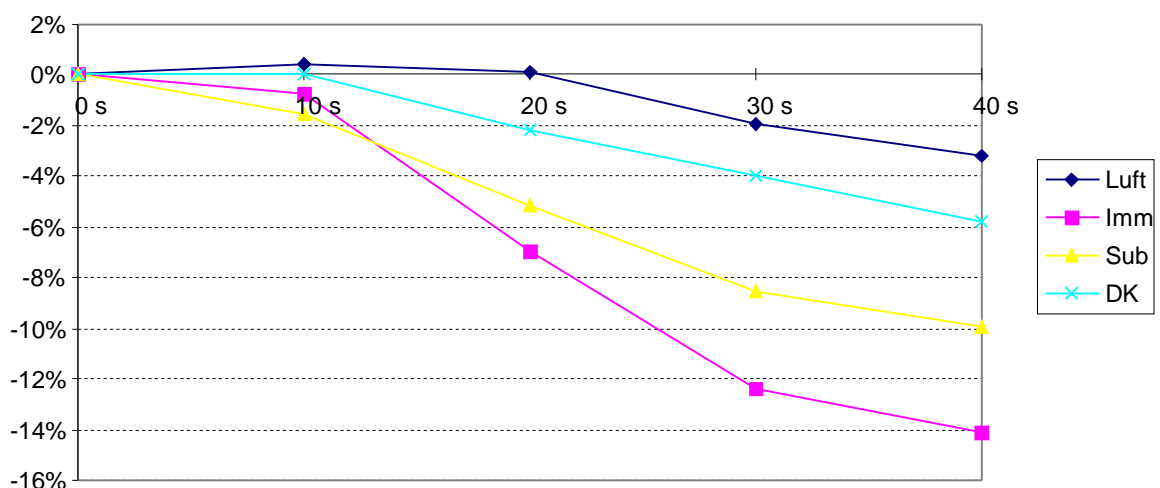


Abb. 6: Relative Änderung der Herzfrequenz. Die Herzfrequenzabnahme bei Immersion mit Gesichtsimmersion (Imm) hat die größte Steilheit.

Betrachtet man den Beginn der Apnoe als Referenzpunkt, so fällt die Herzfrequenz am schnellsten bei Apnoe unter Immersionsbedingungen (Abb. 6). Danach folgen die Herzfrequenzen unter Submersionsbedingungen und in der Druckkammer. Am langsamsten fällt die Herzfrequenz bei Apnoe am Beckenrand.

Apnoedauer

Die Apnoezeitlagen in der Größenordnung von 60 s (Spannweite 10 - 180 s) relativ dicht zusammen. Tendenziell waren sie bei der Gesichtsimmersion und während der Submersion mit DTG kürzer als außerhalb des Wassers und in der Druckkammer (Tab. 5).

Tab. 5: Die Apnoedauer lag in der Größenordnung von 60 s. Luft: außerhalb des Wassers; Imm: Immersion mit Gesichtsimmersion; Sub: Submersion mit DTG; DK: Druckkammer (1,2 bar)

	Luft [s]	Imm [s]	Sub [s]	DK [s]
Gesamt	63,6 ± 26,6	57,5 ± 28,3	56,0 ± 29,6	68,5 ± 19,6
Frauen (n=22)	54,1 ± 16,2	45,2 ± 15,0	44,3 ± 17,1	entfällt
Männer (n=80)	66,3 ± 26,9	60,9 ± 29,0	59,3 ± 30,9	68,5 ± 19,6

Die Apnoedauer bei Frauen war im Mittel kürzer als bei Männern. Frauen hatten im Durchschnitt eine um 16,5 % (18,1 %) kürzere Apnoedauer bei Immersion mit Gesichtsimmersion (Submersion mit DTG) als an Land. Bei Männern fiel die Differenz mit 8,1 % (10,6 %) deutlich geringer aus (Tab. 6).

Tab. 6: Veränderung der Apnoedauer im Vergleich zur Apnoe außerhalb des Wassers. Die Apnoedauer nimmt bei Frauen unter Immersion und Submersion deutlich stärker ab als bei Männern. Luft: außerhalb des Wassers; Imm: Immersion mit Gesichtsimmersion; Sub: Submersion mit DTG; DK: Druckkammer (1,2 bar)

	Luft	Imm	Sub	DK
Gesamt	100 %	-9,6 %	-11,9 %	7,7 %
Frauen (n=22)	100 %	-16,5 %	-18,1 %	entfällt
Männer (n=80)	100 %	-8,1 %	-10,6 %	-3,3 %

Ventilationsversuch

Im Ventilationsversuch wurden Daten zum Atemgrößen in Ruhe am Beckenrand außerhalb des Wassers und unter Wasser mit DTG ermittelt.

Atemvolumina und Atemfrequenz

Es konnten deutliche Unterschiede in den Atemgrößen registriert werden (Tab.7).

Tab. 7: Atemvolumina und Atemfrequenz außerhalb des Wasser am Beckenrand (L) und unter Wasser mit DTG (W). Die Atemfrequenz nimmt unter Wasser stark ab, das Atemzugvolumen wird größer.

AF L [/min]	AF W [/min]	AZV L [l]	AZV W [l]	AMV L [l/min]	AMV W [l/min]
11,49 ± 3,36	7,17 ± 3,00	1,14 ± 0,50	1,62 ± 0,63	12,47 ± 4,64	10,64 ± 4,31

Die gemessenen Atemzugvolumina unterscheiden sich deutlich von den sonst bei normgewichtigen Erwachsenen in Ruhe beobachteten Werten (AZV ca. 500 ml und AMV ca. 7 l).

Bei einer mittleren Körpermasse der untersuchten Probanden von $76,1 \pm 14,2$ kg kann von einem Totraumvolumen von ca. 150 ml ausgegangen werden (Thews 1987). Bei einem Atemzugvolumen außerhalb des Wassers von $1,14 \pm 0,50$ l und unter Wasser von $1,62 \pm 0,63$ l ergibt sich bei einem Totraumvolumen von 150 ml eine im Mittel etwa gleich große alveoläre Ventilation außerhalb des Wassers von 11,4 l/min gegenüber 10,5 l/min unter Wasser. Die alveoläre Belüftung des einzelnen Atemzugs ist jedoch mit 1,47 l ($1,62$ l - 0,15 l) im Wasser um 48,5 % größer als mit 0,99 l ($1,14$ l - 0,15 l) an Land.

3.2. Analytische Statistik

Im Folgenden wurde mit der analytischen Statistik untersucht, ob eine oder mehrere der gemessenen Variablen statistisch signifikanten Einfluß auf den Verlauf der Herzfrequenz im Apnoeversuch oder auf die Atemvolumina im Ventilationsversuch haben.

3.2.1. Apnoeversuch

Die lineare Regressionsrechnung für die Apnoedauer und die Lungenfunktion ergab, daß die Vitalkapazität mit der Apnoedauer korrelierte (außer für Druckkammerbedingungen). Andersherum ergab sich nur außerhalb des Wassers zwischen der Apnoedauer und dem forcierten, expiratorischen Volumen ein signifikanter Zusammenhang (Tab. 8).

Tab. 8: Zusammenhang zwischen der Apnoedauer und der Lungenfunktion. Schraffierte Zellen kennzeichnen einen signifikanten Zusammenhang. VC %: relative Vitalkapazität; FEV1 %: relatives, forciertes, expiratorisches Volumen nach 1 s

Apnoedauer	VC%		FEV1%	
	r	p	r	p
außerhalb des Wassers	0,212	0,032	0,195	0,049
Immersion mit Gesichtsimmersion	0,214	0,030	0,191	0,055
Submersion mit DTG	0,218	0,028	0,135	0,175
Druckkammer	0,096	0,791	0,261	0,467

Es wurde untersucht, ob die Herzfrequenzänderungen in den einzelnen Versuchsteilen (außerhalb des Wassers am Beckenrand (=Luft), Gesichtsimmersion, Submersion mit DTG und Druckkammer) von Alter, Geschlecht, konstitutionellen Faktoren (Größe, Masse, Body Mass Index) oder von pulmonalen Faktoren (Vitalkapazität, forcierte 1 Sekundenkapazität) oder dem Rauchverhalten (Nichtraucher, Raucher) statistisch abhängen. Weiter wurde untersucht, ob ein Zusammenhang mit der Taucherfahrung oder mit der jeweiligen Ruheherzfrequenz bestand. Die einfache lineare Regression ergab, daß das Ausmaß der Herzfrequenzänderung von verschiedenen Größen abhängig war (Tab. 9):

Tab. 9: Abhängigkeit der relativen Herzfrequenzänderungen im Vergleich zur Ruheherzfrequenz [%] von einzelnen Größen. Für alle vier Protokolle und unabhängig davon, ob der Wert zum Apnoeende (Ende) oder der maximale Wert der Herzfrequenzabnahme (max) verwendet wurde, korrelierte die Ruheherzfrequenz mit den Herzfrequenzänderungen. Für die anderen untersuchten Variablen ergab sich kein systematisches Bild.

		Irrtumswahrscheinlichkeit	Korrelationskoeffizient	
		p	r	
außerhalb des Wassers	Ruhe - Ende	• Ruheherzfrequenz	0,030	-0,215
	Ruhe - max	• Ruheherzfrequenz	0,005	-0,279
Immersion mit Gesichtsimmersion	Ruhe - Ende	• Ruheherzfrequenz	0,022	-0,227
		• Body Mass Index (BMI)	0,005	-0,277
		• Geschlecht	0,000	0,373
		• Größe	0,007	-0,266
		• Körpermasse	0,001	-0,336
	Ruhe - max	• Ruheherzfrequenz	0,000	-0,357
		• Body Mass Index	0,030	-0,215
		• Geschlecht	0,004	0,286
• Körpermasse	0,012	-0,247		
Submersion mit DTG	Ruhe - Ende	• Ruheherzfrequenz	0,013	-0,246
		• Geschlecht	0,002	0,307
		• Taucherfahrung	0,026	0,242
	Ruhe - max	• Ruheherzfrequenz	0,000	-0,373
		• Geschlecht	0,014	0,243
		• Taucherfahrung	0,024	0,247
Druckkammer	Ruhe - Ende	• Ruheherzfrequenz	0,008	-0,781
	Ruhe - max	• Ruheherzfrequenz	0,003	-0,827

Zwischen den Herzfrequenzänderungen und dem Alter und dem Rauchverhalten wurden keine signifikanten Abhängigkeiten gefunden. Konstitutionelle Variable (Größe, Masse und Body Mass Index) hatten keinen Einfluß auf die Herzfrequenzänderungen außerhalb des Wassers und bei Submersion mit DTG. Geschlecht und Taucherfahrung waren außerhalb des Wassers und bei Gesichtsimmersion sowie in der Druckkammer statistisch ohne faßbaren Einfluß auf die Herzfrequenzänderung. Im Gegensatz dazu korrelierten die Ruheherzfrequenz und die Herzfrequenzänderungen

bei allen Versuchsbedingungen und unabhängig davon, ob die Änderungen als Differenz zwischen Ruhewert und Apnoeende oder Ruhewert und maximaler Änderung berechnet wurden, in dem Sinn, daß bei Probanden mit einer hohen Ruheherzfrequenz die Herzfrequenz während der jeweiligen Apnoe stark abnahm.

Die multiple Regressionsrechnung wurde wegen der niedrigen Probandenzahl für die Herzfrequenzänderungen unter Druckkammerbedingungen nicht durchgeführt.

Es zeigte sich für die anderen Bedingungen, daß es bei niedrigen Ruheherzfrequenzen zu größeren Herzfrequenzabnahme kam als bei höheren Ruheherzfrequenzen. Männer hatten größere Herzfrequenzabnahmen als Frauen (Tab. 10). Die bei der linearen Regression signifikanten Größen wie BMI und Taucherfahrung wurden bei der multiplen Regression als nicht signifikant bewertet. Körpergröße und Körpermasse wurde nicht gesondert als unabhängige Variable untersucht, da sie bereits über den BMI in der Regressionsrechnung enthalten waren.

Tab. 10: Geschlecht und Ausgangsherzfrequenz beeinflussen das Ausmaß der Herzfrequenzänderung. Ruhe - Ende = Herzfrequenzabnahme vom Ruhewert bis zum Apnoeende (= abhängige Variable); Ruhe - max. = Wert der maximalen Herzfrequenzabnahme (= abhängige Variable); p = Irrtumswahrscheinlichkeit; C = Regressionskoeffizient; multiples r = multipler Korrelationskoeffizient; n = Anzahl der in die Regressionsrechnung eingehenden Probanden

	Abhängige Variable	Unabhängige Variable	p	C	multiples r	n
außerhalb des Wassers	Ruhe - Ende	Ruheherzfrequenz	0,030	-0,196	0,215	83
	Ruhe - max.	Ruheherzfrequenz	0,005	-0,193		0,279
Immersion mit Gesichtsimmersion	Ruhe - Ende	Ruheherzfrequenz	0,034	-0,182	} 0,422	83
		Geschlecht	0	-5,783		83
	Ruhe - max.	Ruheherzfrequenz	0	-0,272	} 0,440	83
		Geschlecht	0,005	-3,361		83
Submersion mit DTG	Ruhe - Ende	Ruheherzfrequenz	0,028	-0,165	} 0,407	83
		Geschlecht	0,001	-3,922		83
	Ruhe - max.	Ruheherzfrequenz	0	-0,272	} 0,456	83
		Geschlecht	0,009	-3,173		83

3.2.2. Ventilationsversuch

Es wurde untersucht, ob die im Ventilationsversuch bestimmten Atemvolumina von konstitutionellen Faktoren (Größe, Körpermasse und BMI), pulmonalen Variablen (Vitalkapazität, forcierte 1 Sekundenkapazität) oder dem Rauchverhalten (Nichtraucher, Raucher) statistisch abhängig sind. Weiterhin wurde überprüft, ob ein Zusammenhang mit der Taucherfahrung der Probanden bestand.

Die einfache lineare Regression wurde für die Atmung außerhalb des Wassers und während des Tauchens mit DTG durchgeführt. Die Atemvolumina waren von

verschiedenen Variablen abhängig (Tab. 11). Mit Zunahme von Alter, Körpermasse, Body Mass Index und Taucherfahrung nahm die Atemfrequenz unter Wasser ab. Das Atemminutenvolumen unter Wasser verringerte sich mit zunehmendem Alter und zunehmender Taucherfahrung ebenfalls. Die anderen Variablen veränderten sich gleichsinnig.

Tab. 11: Abhängigkeit der Atemvolumina und der Atemfrequenz von einzelnen Größen. Außerhalb des Wassers beeinflussten VC% und FEV1% das AZV und das AMV. Unter Wasser zeigte sich ein Einfluß des Alters und der Taucherfahrung (Anzahl Tauchgänge) auf AF und AMV. Geschlecht und Gewicht waren für die Größe des AZV (außerhalb des Wassers und unter Wasser) von Bedeutung. Für die anderen untersuchten Variablen ergab sich kein systematisches Bild.

Abhängige Variable		Unabhängige Variable	Irrtumswahrscheinlichkeit p	Korrelationskoeffizient r
AF(L)	Atemfrequenz außerhalb des Wassers	• ∅		
AZV(L)	Atemzugvolumen außerhalb des Wassers	• Geschlecht	0,038	-0,19
		• Körpermasse	0,046	0,18
		• VC%	0,000	0,40
		• FEV1%	0,005	0,26
AMV(L)	Atemminutenvolumen außerhalb des Wassers	• VC%	0,001	0,30
		• FEV1%	0,002	0,28
AF(W)	Atemfrequenz unter Wasser	• Alter	0,007	-0,25
		• Körpermasse	0,009	-0,24
		• BMI	0,009	-0,24
		• Zahl Tauchgänge	0,013	-0,25
AZV(W)	Atemzugvolumen unter Wasser	• Körpermasse	0,001	0,31
		• Geschlecht	0,001	-0,30
		• Größe	0,002	0,29
		• BMI	0,010	0,24
AMV(W)	Atemminutenvolumen unter Wasser	• Alter	0,027	-0,20
		• Zahl Tauchgänge	0,013	-0,21

Die Ergebnisse der multiplen Regressionsrechnung für die Atemgrößen beim Gerätetauchen (Tab. 12) zeigten dagegen lediglich eine Beeinflussung der

Atemfrequenz und des Atemminutenvolumens durch das Geschlecht und die Taucherfahrung (Anzahl der Tauchgänge der Probanden vor der Untersuchung). Je mehr Tauchgänge ein Proband vor Untersuchungsbeginn durchgeführt hatte, desto seltener atmete er unter Wasser. Die Einteilung der Probanden nach Tauchstatus (Anfänger, Fortgeschrittene, Experten) erwies sich dagegen nicht als signifikant. Das Atemzugvolumen (AZV) wurde nur durch das Geschlecht beeinflusst.

Tab. 12: Geschlecht und Anzahl Tauchgänge beeinflussen die Atemgrößen unter Wasser. (p = Irrtumswahrscheinlichkeit; C = Regressionskoeffizient; multiples r = multipler Korrelationskoeffizient; n = Anzahl der Probanden)

Abhängige Variable	Unabhängige Variable	p	C	multiples r	n
AF (W)	Geschlecht	0,035	-0,753	} 0,330	95
	Anzahl Tauchgänge	0,022	-0,001		95
AZV (W)	Geschlecht	0,001	0,277	0,303	118
AMV (W)	Geschlecht	0,009	1,474	} 0,303	95
	Anzahl Tauchgänge	0,014	-0,002		95

4. Diskussion

4.1. Änderungen der Herzfrequenz während Apnoe

Die Senkung der Herzfrequenz und eine begleitende Vasokonstriktion sind offensichtlich eine sinnvolle Reaktion auf das Eintauchen in Wasser. In diesem Sinne beschreiben Schagatay und Anderson (1998) den Tauchreflex als einen sauerstoffsparenden Mechanismus, der u. a. bei tauchenden Pinguinen, Bibern und Seelöwen die Herzfrequenz auf ein Sechstel der Oberflächenrate senken kann. Ein ähnlich sinnvoller Mechanismus wird aber offenbar auch bei Fischen ausgeübt, die ebenfalls mit einer Bradykardie reagieren, wenn sie ihr natürliches Milieu verlassen und aus dem Wasser gehoben werden (Anonymus 1992).

Ein anderer Gesichtspunkt wird von Nemiroff (1977) angeführt, der den Tauchreflex als einen protektiven Mechanismus beschreibt, da die Prognose für das Beinahe-Ertrinken im kalten Wasser durch Bradykardie und Blutumverteilung verbessert wird.

4.1.1. Apnoe außerhalb des Wassers

Die Ergebnisse über das Verhalten der Herzfrequenz des Menschen bei Apnoe außerhalb des Wassers sind in der Literatur widersprüchlich. Bei dieser Apnoe nimmt die Herzfrequenz ab (Hong et al. 1970; Strömme et al. 1970). Die letzteren Autoren sowie Harding et al. (1965) zeigten außerdem, daß die Apnoe Voraussetzung für das Zustandekommen einer Herzfrequenzabnahme ist, denn Schnorcheln ohne Apnoe löste keine Bradykardie aus, was dagegen spricht, daß allein das Befeuchten der Gesichtshaut für eine Herzfrequenzabnahme verantwortlich ist.

An 25 Probanden führte Apnoe außerhalb des Wassers zu einer Herzfrequenzabnahme (Giesler, 1982), und bei 21 männlichen Probanden führte Apnoe bei einer Lufttemperatur von 22 - 26 °C zu einer Herzfrequenzabnahme um 8 % (Andersson und Schagatay 1998). Ganz ähnlich nahm die Herzfrequenz während Apnoe ohne Immersion bei 40 Probanden von 78 auf 73 /min (6,8 %) ab (Strömme et al. 1970).

Keinen Einfluß alleiniger Apnoe fanden Scholander et al. (1962) und Craig et al. (1968), und sogar eine Herzfrequenzzunahme bei Apnoe ohne Immersion um 21 % (19 % bei Untrainierten und 24 % bei Trainierten) ist beschrieben. Bei einer anderen Studie fiel die Herzfrequenz nur bei einem von zwölf Teilnehmern ab (Harding et al.

1965). Bei schrittweiser Immersion wurde die Apnoetachykardie allerdings immer kleiner, und bei einem Wasserspiegel auf Xiphoidniveau verhält sich die Herzfrequenz neutral. Steigt der Wasserspiegel weiter, entwickelte sich eine Apnoebradykardie (Harding et al. 1965).

In der vorliegenden Untersuchung führte alleinige Apnoe ohne Immersion im Mittel zu einer moderaten, doch signifikanten Abnahme der Herzfrequenz: bis zum Ende der Apnoe um 4,0 %. Bei einem Vergleich zwischen dem Ruhewert und der individuellen, maximalen Antwort ergab sich allerdings eine deutlichere Abnahme der Herzfrequenz um 11,7 %.

Eine Erklärung für die in der Literatur beschriebenen widersprüchlichen Antworten könnte die Betrachtung der Einzelwerte liefern. Werden nämlich die individuellen Herzfrequenzänderungen betrachtet (Abb. 3), zeigen 58 % der Probanden eine Abnahme der Herzfrequenz, welche über 30 % betragen kann. Bei den restlichen 42 % ändert sich die Herzfrequenz nicht oder steigt sogar bis zu 30 % an.

Die Messungen wurden jeweils zweimal und an einem Kollektiv durchgeführt, welches mit mehr als 100 Probanden gegenüber der zitierten Literatur relativ groß war. Wahrscheinlich sind die genannten Widersprüche mindestens zum Teil dadurch zu erklären, daß die anderen Kollektive deutlich kleiner waren und nur Mittelwerte präsentiert werden. Zu einem anderen Teil könnten die Ergebnisse auch durch eine Präselektion von Probanden verfälscht worden sein, denn ein nicht zu vernachlässigender Teil des hier untersuchten Kollektives zeigte keine Herzfrequenzabnahme. Es wird jedoch über eine große Variabilität in der Ausprägung der Tauchbradykardie bei Gesichtsimmersion berichtet (Ebbecke 1943; Arnold 1985). Lediglich in Einzelfällen wird über eine Zunahme berichtet, die dann als Ausnahme von der Regel betrachtet wird (Struckmann 1983). Warum bei einigen Probanden diese 'paradoxe' Reaktion auftritt, soll im zweiten Teil der Diskussion angesprochen werden.

4.1.2. Apnoe während Immersion mit Gesichtsimmersion

Durch den Auftrieb hat die Immersion deutliche hämodynamische Konsequenzen auf den Menschen. An 10 Freiwilligen verschoben sich 0,7 l Blut aus der Peripherie in den Thorax bei Immersion bis zum Hals in 35 °C warmem Wasser, wodurch der

zentralvenöse Druck (ZVD) um ca. 13 mmHg stieg. Durch die rasche Dehnung des rechten Vorhofes entwickelten sich bei allen Probanden in den ersten Minuten Extrasystolen. Die erhöhte Vordehnung der Ventrikel führte zu einer Zunahme des Herzzeitvolumens (+32 %). Bei gleichzeitigem Anstieg des mittleren arteriellen Blutdrucks von 86 auf 98 mmHg sank der periphere Gefäßwiderstand (ca. 30 %). Dieser Abfall des Gefäßwiderstands scheint in der zitierten Studie mit 30% sehr hoch auszufallen, wenn gleichzeitig der mittlere arterielle Druck um 13 mmHg steigt. Bei dieser Untersuchung fiel die Herzfrequenz nur unwesentlich um ca. 3% von 73 auf 71 /min (Arborelius et al. 1972). Ganz ähnlich verhielt sich die Herzfrequenz in der vorliegenden Studie. Die Ruheherzfrequenz am Beckenrand unterschied sich mit 85 /min am Beckenrand fast nicht von der bei Immersion bis zum Hals (84 /min).

In thermoneutralem Wasser stieg an 20 Probanden bei Immersion bis zum Hals der ZVD um 10 mmHg an während die Vitalkapazität um 8 % abnahm (Risch et al. 1978). In dieser Untersuchung fiel allerdings die Herzfrequenz bei gradueller Immersion von der Hüfte bis zum Xiphoid um 15 %.

Als Begründung für die Tauchbradykardie wird ein erhöhter venöser Rückstrom aufgrund des veränderten hydrostatischen Druckes angegeben (Jung und Stolle 1983), und Gauer (1955) vergleicht die Immersion mit einer massiven Transfusion, durch welche sich das Schlagvolumen vergrößert, der Blutdruck ansteigt und reflektorisch die Herzfrequenz sinkt. Offenbar setzt sich dieser physiologische Mechanismus nicht immer durch, denn bei Immersion während Schnorchelatmung kann die Herzfrequenz auch nahezu gleichbleiben (+3 % bei Untrainierten und +1 % bei Tauchtrainierten, Harding et al. 1965), so daß offensichtlich auch andere Größen eine Rolle spielen (vgl. auch Strömme et al. 1970).

Bei der Immersion des Körpers einschließlich des Gesichts kommt es zu einer eindeutigen Tauchbradykardie: Alle Teilnehmer an einem Streckentauchen (18 Männer, 18 Frauen) in Wasser mit einer Temperatur von 28 °C zeigten eine Tauchbradykardie (Struckmann 1983), und die Teilnehmer eines anderen, kleinen Kollektivs (13 Probanden) entwickelten ebenfalls ohne Ausnahme eine Bradykardie (Craig 1963). Ähnliche Befunde waren schon früher erhoben worden, wobei aber das Ausmaß der Tauchbradykardie stark variierte (Ebbecke 1943).

Die Herzfrequenzabnahme ist bei Gesichtsimmersion stärker ausgeprägt als bei Apnoe an Luft (Strömme et al. 1970; Hong et al. 1967; Hong et al. 1970). Dieser auch hier erhobene Befund spricht bereits dafür, daß mindestens zwei Systeme am Zustandekommen der Bradykardie beteiligt sind, die möglicherweise synergistisch wirken. Diese Bradykardie bei Gesichtsimmersion unterscheidet sich nicht von der beim Apnoetauchen (Hong et al. 1967).

In einigen Untersuchungen wird für die Herzfrequenzabnahme nicht der Tauchreflex, sondern die niedrige Wassertemperatur – also ein Kältere reflex - verantwortlich gemacht. Bei 21 männlichen Probanden ergab sich eine deutliche Herzfrequenzabnahme ($-14 \pm 1 \%$) bei Gesichtsimmersion in $10 \text{ }^\circ\text{C}$ kaltes Wasser bei einer Umgebungslufttemperatur von $22 - 26 \text{ }^\circ\text{C}$ (Andersson, Schagatay, 1998). Unterstützt wird die Kältere reflex-Hypothese durch eine Untersuchung (Giesenhausen, 1981), bei welcher eine intermittierende Gesichtsimmersion zu einer stärkeren Bradykardie führte als eine kontinuierliche Immersion, bei welcher die Kälterezeptoren adaptieren sollen (Sterba et al. 1988).

Einen Hinweis darauf, daß der Tauchreflex nicht allein durch die Gesichtsimmersion ausgelöst wird, liefert eine Untersuchung, bei welcher die Herzfrequenz bei Gesichtsimmersion ohne Apnoe unverändert blieb. Bei einer Atemfrequenz von 20 /min, löste die Gesichtsimmersion allein jedoch eine Bradykardie aus (Hayashi et al. 1997). In der vorliegenden Untersuchung sank die Herzfrequenz während der Immersion gegenüber der Herzfrequenz außerhalb des Wassers bei nur 19 % (versus 42 % außerhalb des Wassers) der Probanden nicht ab; im Mittel fiel sie aber bei der Gesichtsimmersion deutlich stärker ab. Die Beobachtung, daß sich bei etwa 20 % der Probanden die Herzfrequenz nicht änderte oder sogar anstieg, wurde bisher nicht beschrieben

Ein weiterer Unterschied ergab sich aus der Geschwindigkeit, mit welcher die Herzfrequenz abnahm. Während die Herzfrequenz bei Apnoe außerhalb des Wassers initial zunahm, um dann linear abzunehmen und teilweise erst nach Ende der Apnoe ihr Minimum zu erreichen, nahm die Herzfrequenz bei Gesichtsimmersion initial deutlich ab, um danach relativ stabil auf einem Niveau zu bleiben. Zusätzlich normalisierte sich die Herzfrequenz rascher nach dieser Intervention als nach Apnoe

außerhalb des Wassers (ca. 10 s). Das unterschiedliche Zeitverhalten spricht dafür, daß es mindestens zwei Regelsysteme mit unterschiedlichen Zeitkonstanten gibt.

4.1.3. Apnoe während Submersion mit Drucklufttauchgerät

Es gibt nur wenig Literatur über Änderungen der Herzfrequenz als Folge einer Apnoe während Submersion mit Drucklufttauchgerät. Bei diesem Manöver reagierten etwa 87 % der Probanden mit einer Abnahme der Herzfrequenz. Insgesamt ergab sich eine Herzfrequenzabnahme zum Ende der Apnoedauer, die nicht ganz so umfangreich, wie bei der Gesichtsimmersion aber deutlich stärker als bei der Apnoe außerhalb des Wassers war. Die individuellen maximalen Herzfrequenzänderungen vom Ruhewert waren mit 19 % genauso hoch wie bei Apnoe bei Immersion. Andererseits nahm die Herzfrequenz nicht derart rasch ab, wie bei der Gesichtsimmersion, sondern hatte einen Verlauf, der ähnlich linear war, wie bei der Apnoe außerhalb des Wassers. Wir interpretieren diese Ergebnisse erneut so, daß das Befeuchten des Gesichtes mit kaltem oder warmem Wasser allein nicht für das Zustandekommen der Tauchbradykardie ausreicht, sondern von anderen Mechanismen überlagert sein muß.

4.1.4. Apnoe in der Druckkammer

Die Ruheherzfrequenz war unter Druckkammerbedingungen (=1,2 bar) deutlich niedriger als außerhalb des Wassers (76 ± 12 /min vs. 82 ± 12 /min), was sich durch einen erhöhten Vagotonus unter hyperbaren Bedingungen erklären läßt (Anonymus, 1992).

Craig (1963) fand bei 5 untersuchten Probanden keinerlei bradykarde Antwort auf Apnoe bei hyperbaren Bedingungen, die einer Wassertiefe von 2,3 m entsprachen. Während hyperbarer Bedingungen (entsprechend 2 m Wassertiefe) kam es in der vorliegenden Studie während Apnoe zu einer signifikanten Bradykardie. Eine solche Reaktion, bei welcher es nicht zu einer Gesichtsimmersion kam, ist in Übereinstimmung mit der Literatur (Anonymus, 1992). Die Bradykardie war bei diesen Probanden jedoch ähnlich (-6 %) wie bei denen außerhalb des Wassers (-4 %) und damit niedriger als bei Gesichtsimmersion (-13 %) und während Submersion mit DTG (-11 %), bei welcher ein Druck ähnlich wie in der Druckkammer herrschte. Das geringere Ausmaß der Bradykardie ist also entweder auf den fehlenden Nässe- oder Kältereiz aber nicht auf einen erhöhten Umgebungsdruck zurückzuführen.

Konstitutionelle Faktoren, Rauchverhalten, Taucherfahrung oder Alter hatten hier keinen Einfluß auf die Herzfrequenzänderungen. Auch pulmonale Faktoren wie Vitalkapazität und forcierte 1 Sekundenkapazität waren unter Druckkammerbedingungen ohne Einfluß auf den Herzfrequenzverlauf. Ein geschlechtsabhängiger Einfluß auf die Herzfrequenz konnte nicht überprüft werden, da in diesem Versuchsteil nur männliche Probanden teilnahmen. Hierzu liegt bisher keine Literatur vor.

4.1.5. Herzfrequenzverlauf

Mit Beginn der Apnoe nimmt in Übereinstimmung mit Jung und Stolle (1983) und im Widerspruch zu den anderen zitierten Autoren die Herzfrequenz initial zu, ehe sich im Mittel eine Tauchbradykardie ausbildet. Eine Ausnahme bildet der unter Submersionsbedingungen durchgeführte Apnoeversuch mit Drucklufttauchgerät. Hier beginnt der Herzfrequenzabfall unmittelbar.

Wie schon gezeigt, variiert die Herzfrequenzreaktion auf Apnoe erheblich. Nicht selten bleibt die Herzfrequenz unverändert oder nimmt sogar zu. Über eine Zunahme der Herzfrequenz berichteten bisher nur Harding et al. (1965) für Apnoe ohne Immersion. Ansonsten finden alle Autoren ausnahmslos eine Tauchbradykardie. Fagius und Sundlöf (1986) fanden ein Andauern der Bradykardie nach dem Auftauchen für „einige Sekunden“, während in der vorliegenden Untersuchung die Ruheherzfrequenz erst nach 20 - 30 s erreicht wurde. Eine Ausnahme bildet Apnoe während Gerätetauchens und Apnoe in der Druckkammer. Hier wird nach Ende des Beobachtungsintervalls (30 s nach Ende der Apnoe) die Ruheherzfrequenz noch nicht erreicht. In Übereinstimmung mit Ebbecke (1943), Hong et al. (1970) und Stömme et al. (1970) wird eine Latenzzeit bis zum Auftreten einer Herzfrequenzabnahme im Vergleich zum Ruhewert von 10 - 20 s gefunden.

4.2. Einflüsse auf die Herzfrequenz während Apnoe

In diesem zweiten Teil der Diskussion wird zu klären versucht, warum die Tauchbradykardie bei Versuchsteilnehmern unterschiedlich stark ausgeprägt ist, und warum es bei einigen Probanden sogar zu einer Zunahme der Herzfrequenz kommt. Im folgenden werden zunächst personenbezogene und dann umgebungsbezogene

Faktoren untersucht, die auf das Ausmaß der Herzfrequenzänderung einen Einfluß haben könnten.

4.2.1. Umgebungsbezogene Variable

Gesichtsimmersion

Die alleinige Gesichtsimmersion war nicht im Design dieser Untersuchung enthalten. Da sie aber unvermeidbarer Bestandteil von Immersion und Submersion war, soll sie hier diskutiert werden, denn die Benetzung des Gesichts mit Wasser löst nach Meinung mehrerer Untersucher bereits eine Bradykardie aus. Als erster beschrieb Ebbecke 1943 eine Bradykardie bei Gesichtsimmersion und deutete dies als Trigemiusreflex. Andersson und Schagatay (1998) sahen bei 21 männlichen Probanden eine Herzfrequenzabnahme um $13,6 \pm 1,0$ % bei Gesichtsimmersion in $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ kaltes Wasser bei einer Umgebungslufttemperatur von $22\text{-}26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die niedrigste bekannte Herzfrequenz betrug $8,8$ /min während eines Apnoemanövers mit Gesichtsimmersion (Strömme et al. 1970). Gesichtsimmersion führt immer zu einer Bradykardie, welche stärker ausgeprägt ist, als die Bradykardie bei alleiniger Apnoe (Strömme et al. 1970; Hong et al. 1970). Die Bradykardie bei Gesichtsimmersion unterscheidet sich nicht von der beim Tauchen (Strömme et al. 1970). Eine Abnahme der Gesichtsmaske beim Apnoetauchen führt zudem zu nochmaliger Verstärkung der Bradykardie (Strömme et al. 1970). Dies belegt die Bedeutung des Gesichts als Triggerzone für bradykarde Herz-Kreislaufreaktionen. Wir schließen mit der vorliegenden Untersuchung den Teil des Gesichtes aus, der üblicherweise von einer Tauchermaske abgedeckt wird, denn der Umfang der Herzfrequenzreduktion war gleichermaßen unabhängig davon, ob die Probanden die Apnoe während Gesichtsimmersion oder Submersion durchführten.

Hayashi et al. (1997) fand ein anderes Ergebnis. Die Herzfrequenz fiel bei alleiniger Gesichtsimmersion in $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ warmes Wasser bei einer Atemfrequenz von 5, 10 oder 15 in der Minute nicht ab. Bei einer Atemfrequenz von 20 /min fiel sie allerdings ab. Die Autoren berichten aber über eine Zunahme der Herzfrequenzvariabilität bei allen Atemfrequenzen, so daß es während dieser Bedingung offenbar zu einer Aktivierung des parasympathischen Systems gekommen war, die eigentlich zu einer Herzfrequenzabnahme führen müßte.

Vermutlich spielen Nässe, aber auch wie nachfolgend beschrieben, die Temperatur des umgebenden Mediums (Wasser oder Luft) für das Auslösen einer Bradykardie eine Rolle.

Wassertemperatur und Temperatur der Umgebungsluft

Wassertemperaturen zwischen 34,5 und 35 °C und Lufttemperaturen von 28 °C gelten als thermoindifferent für den Menschen (Sterba 1993). Bei der großen Zahl von Teilnehmern dieser Studie war es nicht möglich, die Untersuchung in thermoneutralem Wasser durchzuführen. Alle Versuchsteile fanden aber unter konstanten Bedingungen von 28 °C Wasser- und Lufttemperatur statt.

Die Wärmeleitfähigkeit des Wassers ist 25 mal größer als die von Luft (Glickmann-Weiss 1991). Der Aufenthalt im Wasser von 20-22 °C bedeutet daher 3-4 mal mehr Wärmeabgabe als an Luft bei 20-22 °C. Dünne Personen können die gleiche Körpertemperatur wie dickleibige Personen durch Muskelzittern erreichen (Bühlmann 1995). Dieser Aspekt kann die in dieser Untersuchung gefundene negative Korrelation zwischen dem Body Mass Index und dem Ausmaß der bradykarden Antwort auf die Immersion erklären, da bei niedrigem Gewicht mehr Energie aufgewendet werden muß und damit die Herzfrequenzabnahme geringer ausfällt, um die Körpertemperatur aufrecht zu erhalten als bei hohem Gewicht. Vermutlich spielen Wärmeverluste aber durch die Kürze der durchgeführten Versuche keine wesentliche Rolle.

Der Einfluß der Wasser- und Lufttemperatur auf die Herzfrequenz ist seit langem belegt. So beschreibt bereits Ebbecke (1943) die bradykardisierende Wirkung von Gesichtsimmersion in kaltes Wasser. Das Anblasen des Gesichts mit kalter Luft hat den gleichen Effekt. Craig (1963) und Schagatay et al. (1996) belegten die Abhängigkeit der bradykarden Tauchantwort von der Wassertemperatur, wobei Craig sogar während Immersion und Submersion bei einer Wassertemperatur von 32,5 °C ein bradykarde Antwort auf Apnoe fand. Hong et al. 1970 postulierten einen Einfluß von Kälterezeptoren im Gesicht auf das Ausmaß der Tauchbradykardie. Schuitema und Holm 1988 beschreiben das Vorderhaupt (Stirn) als wichtigste sensorische Zone für die kälteinduzierte Komponente der Tauchantwort. Einen weiteren Aspekt führten Sterba et al. (1988) in die Diskussion ein. Intermittierende Gesichtsimmersion führte zur stärkeren Bradykardie als kontinuierliche, bei welcher es möglicherweise zu einer Adaptation der Kälterezeptoren kommt.

Die Rolle der Thermorezeptoren wird von Giesenhagen (1981) sogar als alleiniger Grund für beobachtete Bradykardien im Zusammenhang mit Tauchen genannt, und entsprechend gibt es seiner Meinung nach keinen Tauchreflex, sondern nur einen Temperaturreflex. Petersen (1975) fand keine Änderungen der Herzfrequenz bei Apnoeimmersion in 35 °C warmes Wasser. Im Gegensatz dazu fand Hong (1970) ebenso wie Craig (1963) unter gleichen Bedingungen eine Abnahme der Herzfrequenz.

Die ausschließliche Abhängigkeit der Tauchbradykardie von der Wassertemperatur ist jedoch bei der Vielzahl der belegten Einflußfaktoren und auch angesichts der kontroversen Versuchsergebnisse in der Literatur schwer haltbar.

Schagatay et al. 1996 zeigten, daß die Bradykardie umgekehrt proportional zur Wassertemperatur ist, dies aber innerhalb einer Spanne, die durch die Umgebungslufttemperatur bestimmt ist. So führt Gesichtsimmersion in kaltes Wasser bei einer höheren Umgebungstemperatur zu einer stärkeren Bradykardie. Die Autoren forderten daher stets die Angabe der Umgebungstemperatur. In dieser Studie betrug sie 28 °C.

Lungenvolumen, Inspirationslage und Lungenfüllung

Die erhobenen Parameter (Vitalkapazität, forcierte 1 Sekundenkapazität) sind im Probandenkollektiv ohne Einfluß auf das Ausmaß oder den Verlauf der Herzfrequenzänderungen. Hong et al. 1970 fanden dagegen eine signifikante Korrelation zwischen dem Quotienten aus Residualvolumen und Totalkapazität, also einem Maß für restriktive Lungenveränderungen, und der maximalen Herzfrequenzabnahme.

Diese unterschiedlichen Befunde lassen sich möglicherweise durch unterschiedliche Inspirationsniveaus der Probanden erklären, denen in der vorliegenden Studie keine Vorgaben hinsichtlich des In- oder Expirationsniveaus gemacht wurden. Sterba et al. (1988) und Anderson et al. (1998) zeigten nämlich, daß eine submaximale Lungenfüllung (60 % der VC) zu einer stärkeren Bradykardie führt als eine maximale Lungenfüllung (Inspiration). Im Gegensatz dazu zeigten Song et al. (1969), daß die Bradykardie bei maximaler Inspiration am größten ist.

Körperposition

Auf eine Vorgabe hinsichtlich der im Wasser einzunehmenden Körperlage konnte verzichtet werden, denn beim Tauchen sind Schwerkrafteinflüsse weitgehend aufgehoben, da biologisches Gewebe und Wasser eine ähnliche Dichte haben. Jede Körperposition im Wasser ist daher vergleichbar mit den Schwerkraftbedingungen bei flachem Liegen auf dem Rücken (Lanphier und Camporesi 1993).

4.2.2. Personenbezogene Variable

Alter

In der untersuchten Probandengruppe konnte keine signifikante Abhängigkeit der Herzfrequenz hinsichtlich des Alters gefunden werden. Zum gleichen Ergebnis kam Arnold (1985). Im Widerspruch dazu fanden Hong et al. (1970) einen Zusammenhang in dem Sinne, daß die Herzfrequenzabnahme um so kleiner war, je älter die Probanden waren.

Geschlecht

Im Apnoeversuch während Immersions- und Submersionsbedingungen nahm das Geschlecht statistisch signifikant Einfluß auf die Herzfrequenzabnahme. Männer zeigten stärkere Herzfrequenzabnahmen als Frauen. Auch die Apnoedauer unterschied sich signifikant. Männer erreichten im Durchschnitt längere Apnoezeiten als Frauen. Das Geschlecht war jedoch bei Apnoe an Land statistisch ohne faßbaren Einfluß auf die Herzfrequenz. Auffällig war weiterhin, daß für die Apnoe unter Submersionsbedingungen neben der Taucherfahrung und der Ruheherzfrequenz das Geschlecht als einzig statistisch einflußnehmender Faktor auf die Herzfrequenzabnahme ermittelt wurde.

Ein Hinweis auf die Abhängigkeit der Herzfrequenzabnahme vom Geschlecht findet sich bei Hong (1967). In seiner Untersuchung „scheint“ die Bradykardie bei Frauen in Übereinstimmung mit den Ergebnissen dieser Studie geringer ausgeprägt als bei Männern. Ebenfalls konnte Struckmann (1983) geschlechtsspezifische Unterschiede beim apnoeischen Streckentauchen feststellen. So fand sich bei Männern zwar eine initiale Tachykardie, aber das Ausmaß der Bradykardie war bei Männern ebenfalls größer als bei Frauen.

Konstitutionelle Variablen

Während Immersionsbedingungen gab es einen Zusammenhang zwischen Körpergröße, Körpermasse, Body Mass Index und dem Ausmaß der Herzfrequenzänderung. Dabei gilt: je höher Körpergröße, Körpermasse und Body Mass Index, desto größer das Ausmaß der entstehenden Apnoebradykardie unter Immersionsbedingungen. An Land und unter Wasser übten konstitutionelle Variablen keinen Einfluß auf die Bradykardie aus.

Die Angaben in der Literatur hinsichtlich des Body Mass Index oder der Körpermasse als Einflußfaktoren sind spärlich. Hong et al. (1970) fanden keine signifikante Korrelation zwischen Bradykardieausprägung und Körperfettgehalt (n=37) bei alleiniger Gesichtsimmersion in unterschiedlich temperiertem Wasser.

Apnoedauer

Die Überlegung, daß es bei Vorhandensein eines Tauchreflexes über einen von einigen Autoren postulierten sauerstoffsparenden Effekt (Schagatay und Andersson 1998) zu einer Verlängerung der Apnoedauer kommen müßte, konnte in dieser Studie nicht belegt werden. Die Apnoedauer an Land ($63,6 \pm 26,6$ s) und unter Druckkammerbedingungen ($68,5 \pm 19,6$ s) war sogar etwas länger, als die bei Immersion ($57,5 \pm 28,3$ s) und vergleichbar mit den Werten bei Submersion mit DTG ($68,5 \pm 19,6$ s). Die Apnoedauer ist aber möglicherweise noch von vielen hier nicht erfaßten Faktoren, wie psychischem Streß oder Trainingszustand abhängig. Auffällig waren die Unterschiede zwischen Männern und Frauen. Frauen hatten eine im Schnitt um 16,5 % (18,1 %) kürzere Apnoedauer bei Immersion (Submersion) als an Land. Bei Männern fiel die Differenz mit 8,1 % (10,6 %) gegenüber der Apnoedauer an Land deutlich geringer aus.

Es konnte bei 102 Probanden kein statistischer Zusammenhang zwischen Herzfrequenzänderung und Apnoedauer gefunden werden. Auch für den in der Druckkammer mit 10 Probanden durchgeführten Apnoeversuch ergab sich kein Zusammenhang zwischen Herzfrequenzänderung und Apnoedauer.

Hong et al. (1970), Olsen et al. (1962) und Corriol und Rohner (1968) fanden ebenfalls keine Korrelation zwischen Apnoedauer und Bradykardiestärke. Asmussen und Kristiansson (1968) hingegen zeigten, daß das Ausmaß der Bradykardie von der

Apnoedauer ist abhängig. Schagatay und Anderson 1998 zeigten an 112 Frauen und Männern einen signifikanten linearen Zusammenhang zwischen Apnoedauer und Herzfrequenzabnahme bei Gesichtsimmersion.

Eine Erklärung für diese divergierenden Ergebnisse kann aus den zur Verfügung stehenden Daten dieser Studie nicht erfolgen. Es könnte jedoch sein, daß die mittlere Apnoedauer in den letzten beiden Studien relativ kurz waren. Unmittelbar nach Apnoebeginn sehen auch wir den beschriebenen Zusammenhang (s. Abb. 6), der dann aber bei den relativ langen Apnoezeiten verlorenght.

Rauchverhalten

Das Ausmaß der Bradykardie wurde nicht vom Rauchverhalten beeinflusst. In der Gruppe der rauchenden Probanden (n=24) gab es aber nur zwei, die als starke Raucher zu bezeichnen waren. In der Literatur konnte kein Hinweis über den Stellenwert des Rauchverhaltens gefunden werden.

Lungengesundheit

Im untersuchten Probandenkollektiv (n=102) fanden sich 10 männliche Probanden mit einer leichtgradigen obstruktiven Ventilationsstörung und 1 männlicher Proband mit einer leichtgradigen restriktiven Ventilationsstörung. Es konnten in keinem der Versuchsprotokolle Einflüsse dieser Störungen auf die Abnahme der Herzfrequenz nachgewiesen werden. In der Literatur konnte kein Hinweis über den Stellenwert von obstruktiven oder restriktiven Ventilationsstörungen gefunden werden.

Ruheherzfrequenz und Streß

Psychometrische Messungen emotionaler Faktoren wurden im hier vorgestellten Experiment nicht erhoben. Emotionale Faktoren wie Angst oder Freude nehmen jedoch Einfluß auf das autonome Nervensystem und verschieben das Sympathikus-Parasympathikus-Gleichgewicht in Richtung Sympathikus: Es kommt zu einer Zunahme der Herzfrequenz. Das Herzfrequenzniveau kann aber durch supramedulläre Zentren moduliert werden. Fagius und Sundlöf (1986) zeigten, daß Rechenübungen beim Tauchen das Ausmaß der Bradykardie reduzieren. Dies bedeutet, daß supramedulläre Aktivität in der Lage ist, Einfluß auf das Ausmaß der Bradykardiestärke zu nehmen.

Geistige, psychische und körperliche Beanspruchung (supramedulläre Aktivität) bewirken eine Aktivierung des Sympathikus. Wie nach dem Ausgangswertegesetz zu erwarten, findet man bei den hier untersuchten Probanden mit höheren Ruheherzfrequenzen eine stärkere Abnahme der Herzfrequenz als bei niedrigeren Ruheherzfrequenzen. Vermutlich verstärkt also eine höhere Sympathikusaktivität das Ausmaß der Herzfrequenzabnahme durch den Tauchreflex oder durch alleinige Apnoe. Andererseits scheint der durch den Tauchreflex ausgeübte parasymphatische Reiz nicht bei jedem Probanden vorhanden zu sein, oder er ist nicht in der Lage, das Gleichgewicht des autonomen Nervensystem zugunsten des Parasympathikus zu verschieben, um eine Bradykardie zu erzeugen.

Taucherfahrung

Die Taucherfahrung war an Land und bei Apnoe während Immersion statistisch ohne faßbaren Einfluß auf die Herzfrequenzänderungen. Allerdings ergab sich bei Submersion mit DTG ein signifikanter Zusammenhang mit der Taucherfahrung. Personen mit großer Taucherfahrung hatten eine geringere prozentuale Herzfrequenzabnahme als Personen mit geringer Taucherfahrung. Möglicherweise ist dies durch niedrigere Ruheherzfrequenzen von Individuen mit viel Taucherfahrung zu begründen. Denn niedrigere Ruheherzfrequenzen korrelieren in allen Versuchsteilen signifikant mit einer weniger ausgeprägten Bradykardieantwort. Man kann davon ausgehen, daß Personen mit einer größeren Taucherfahrung einer geringeren sympathischen Aktivierung durch psychischen Stress haben, als solche, für die der Aufenthalt unter Wasser relativ ungewohnt ist.

Hong (1970) fand jedoch eine stärkere Bradykardie bei taucherfahrenen Individuen.

Trainingszustand

Zum Trainingszustand wurden keine Daten erhoben, und auch die hier erhobene Taucherfahrung korreliert wahrscheinlich nicht mit dem Trainingszustand. In der Literatur finden sich unterschiedliche Angaben zur Beeinflußbarkeit der Tauchantwort durch den jeweiligen Trainingszustand der Probanden.

Schagatay und Andersson (1998) wollen den Einfluß von Training auf Tauchbradykardie nicht abschließend beurteilen, da longitudinale Untersuchungen

fehlen, die am gleichen Subjekt die Herzfrequenzantwort vor und nach einer Trainingsperiode eruieren.

4.3. Änderung von Atemgrößen beim Gerätetauchen

Der Luftverbrauch beim Gerätetaucher stellt aufgrund der begrenzten Kapazität der Druckluftflaschen einen limitierenden Faktor der Bewegungsfreiheit unter Wasser dar. Unter Wasser unterliegt der Gerätetaucher verschiedenen Einflüssen. Der Umgebungsdruck steigt mit zunehmender Tiefe, dies führt zu erhöhten Atemgaspartialdrücken im Blut und im Gewebe (Gasgesetze von Dalton und Henry). Wasser selbst bietet einen erhöhten Bewegungswiderstand (Wasser ist 800 mal dichter als Luft). Hinzu kommen häufig Kälte, Streß und erhöhter Atmungswiderstand (Doubt 1996).

Der erhöhte Umgebungsdruck führt neben den bereits beschriebenen Veränderungen auch zu Veränderungen hinsichtlich der Atmung. So führt schon die Immersion bis zum Hals zu einer Reduktion der Vitalkapazität um 8-10 % (Risch et al. 1978, Anonymus 1992), das expiratorische Reservevolumen (ERV) und die funktionelle Residualkapazität nehmen ab (Derion 1992). Dies läßt sich ebenso wie die Abnahme der elastischen Rückstellkräfte der Lunge (Derion 1992) und die Zunahme der intrapulmonalen Strömungswiderstände (von $2,4 \pm 0,5$ auf $3,8 \pm 0,6$ cm H₂O/l/s; Löllgen 1978) durch die Zwerchfellhochverlagerung und das erhöhte intrathorakale Blutvolumen von ungefähr 700 ml erklären (Löllgen et al. 1978). Die Blutgaspartialdrücke verhalten sich unter Wasser ebenfalls anders als an Land. In 5 m Tiefe liegt der arterielle pO₂ bei ca. 150 mmHg (Radermacher 1998). Dieser Effekt kann für die hier untersuchten Bedingungen vernachlässigt werden, da es weder zu einer relevanten Änderung der Sauerstoffsättigung des Blutes noch zu einer bedeutsamen Zunahme des physikalisch gelösten Sauerstoffanteils im Blut kommt. Erst bei größeren Tauchtiefen kommt es über die Vergrößerung des physikalisch gelösten Sauerstoffanteils zu relevanten Veränderungen.

Die Reduktion der Vitalkapazität und die erhöhten Atmungswiderstände lassen vermuten, daß es bei Tauchen mit DTG zu einer Zunahme der Atemfrequenz während des Tauchens bei gleichzeitiger Reduktion des Atemzugvolumens kommt. Es zeigt sich aber im Gegenteil eine signifikante Abnahme der Atemfrequenz von $11,5 \pm 3,4$ /min auf $7,2 \pm 3,0$ /min. Das Atemzugvolumen nimmt hingegen bei einer Wassertiefe

von 2 bis 3,5 m von $1,14 \pm 0,50$ l auf $1,62 \pm 0,63$ l zu. Das Atemminutenvolumen (AMV) im Wasser lag bei $10,6 \pm 4,3$ l/min gegenüber $12,5 \pm 4,6$ l/min an Land (= -15 %). Die verlangsamte und vertiefte Atmung könnte eine Anpassung an einen erhöhten Atemwiderstand durch die verwendeten Atemregler des DTG und ein erhöhtes intrathorakales Blutvolumen sein, die dazu führt, daß der Anstieg der Atemarbeit vermutlich in Grenzen gehalten wird. Dies steht im Einklang zu den Befunden von Doubt (1996), der ebenfalls von einer Abnahme des AMV berichtet. Erklärt wird dies ebenfalls als adaptive Antwort auf höhere Atmungswiderstände (u. a. auch durch den Atemregler des DTG). Gleichzeitig beobachtete er einen gleichbleibenden oder sogar steigenden Sauerstoffverbrauch, was von diesem Untersucher als eine Zunahme der Effizienz der Atmung gewertet wird (höhere Sauerstoffausschöpfung bei niedrigerem AMV).

Taucherfahrung

Erfahrene Tauchausbilder berichten, daß unerfahrene Taucher unter Wasser erheblich mehr Atemluft verbrauchen als Erfahrene. Dies wurde auch in verschiedenen Studien bestätigt (Weitz et al. 1989, Doubt 1996, Neubauer et al. 1997). Diese Befunde decken sich mit den hier präsentierten Ergebnissen. Die Regressionsrechnung zeigte eine Beeinflussung der Atemfrequenz und des Atemminutenvolumens unter Wasser durch die Taucherfahrung (Anzahl der Tauchgänge der Probanden vor der Untersuchung). Je mehr Tauchgänge ein Proband vor Untersuchungsbeginn durchgeführt hatte, desto niedriger waren seine Atemfrequenz und sein Atemminutenvolumen.

Im Unterschied zu den oben genannten Ergebnissen bestand lediglich eintendentieller Zusammenhang zwischen Tauchstatus (Einteilung nach Anfängern, Fortgeschrittenen und Experten) und Atemminutenvolumen, Atemzugvolumen oder Atemfrequenz, sondern nur eine tendenzielle Korrelation. Auch die gesonderte Analyse der Gruppe der Tauchanfänger (n=17 Probanden mit weniger als 41 Tauchgängen) zeigte keinen Zusammenhang mit dem Tauchstatus. Die hier vorgenommene Einteilung der Probanden nach Tauchstatus erwies sich damit als eine ungeeignete Größe, da sie im Gegensatz zur Anzahl der Tauchgänge keinen Zusammenhang zum Atemverhalten unter Wasser erfaßte.

Ein Erklärungsansatz für die divergenten Ergebnisse in der Literatur findet sich in einer Studie von Raglin et al. (1996), in welcher 17 Taucher nach psychometrischen

Untersuchungen in 3 Gruppen unterschiedlicher Angstlevel eingeteilt wurden. Bei den unter Wasser durchgeführten ergometrischen Untersuchungen hatten die 5 ängstlichsten Taucher unter Belastung signifikant niedrigere Atemfrequenzen bei gleichem AMV. Erklärt wurde dies als eine unwillkürliche Strategie, Stress durch langsame Atmung zu kompensieren. Möglicherweise ist dieser Mechanismus nur bei einem Teil des tauchunerfahrenen Probandenkollektivs deutlich ausgeprägt, denn im Unterschied zu Raglin fanden Weitz et al. (1989) einen höheren Atemluftverbrauch bei ängstlichen Probanden. So könnte ein möglicher Zusammenhang des Atemluftverbrauchs mit der Taucherfahrung je nach Zusammensetzung des Kollektivs vorhanden sein oder abwesend sein.

Alter

Es zeigt sich mit zunehmendem Alter eine abnehmende Atemfrequenz unter Wasser. Ebenfalls abnehmend ist das Atemminutenvolumen unter Wasser bei zunehmendem Alter. Das Atemzugvolumen unter Wasser wird allerdings nicht durch das Alter beeinflusst. Dies könnte ein weiterer Hinweis auf den beschriebenen Zusammenhang zwischen Taucherfahrung und Atemfrequenz und Atemminutenvolumen sein, da die älteren Probanden eine größere Taucherfahrung hatten als die jüngeren Probanden.

Geschlecht

Das Atemzugvolumen ist an Land sowie unter Wasser signifikant vom Geschlecht beeinflusst, für AMV und Atemfrequenz läßt sich aber kein gesicherter statistischer Zusammenhang nachweisen. Männer haben an Land ein AZV von $1,19 \pm 0,53$ l gegenüber $0,96 \pm 0,35$ l bei Frauen. Das AMV ist bei Männern unter Wasser um 13 % niedriger als an Land. Bei Frauen ist es dagegen um 19 % niedriger. Vermutlich wird diese Geschlechtsdeterminiertheit durch andere gesicherte Einflußfaktoren auf das AZV (Körpermasse und Body Mass Index) hervorgerufen und stellt keine eigenständige Determinante dar. Mit Hilfe der multiplen Regression konnte diese Vermutung widerlegt werden, denn es zeigte sich, daß das Geschlecht auf Atemfrequenz und Atemzugvolumen und damit als zusammengesetzte Größe auch auf das Atemminutenvolumen einen signifikanten Einfluß ausübt. Auch die Vermutung, daß sich der Einfluß des Geschlechts auf das Atemverhalten über eine unterschiedlich große Vitalkapazität erklären läßt, konnte widerlegt werden.

Konstitutionelle Variablen (Größe, Körpermasse, Body Mass Index)

Es zeigt sich mit Zunahme von Körpermasse und Body Mass Index eine jeweils signifikant abnehmende Atemfrequenz und ein zunehmendes Atemzugvolumen (AZV) unter Wasser. Das AZV nimmt zudem auch bei größeren Probanden signifikant zu. Die an Land beobachtete signifikante Abhängigkeit des Atemzugvolumens von der Vitalkapazität läßt sich unter Wasser nicht mehr nachweisen. Der Body Mass Index beeinflußt an Land keine der gemessenen Atemgrößen, ohne daß sich hierfür eine Erklärung anbietet.

Neubauer et al. (1997) fanden beim Apnoetauchen mit vorheriger Sauerstoffatmung und maximaler Inspiration und nachfolgender Bestimmung des endexpiratorischen Kohlendioxidgehalts und des Ausatemvolumens an 38 männlichen Freiwilligen einen Sauerstoffverbrauch pro kg Körpermasse (6,8 ml / (KG *min)) (Spannweite : 2,9 - 12,6 ml / (KG *min)). Dies würde erwarten lassen, daß das Atemminutenvolumen bei schwereren Probanden auch während des Tauchens mit DTG gegenüber leichteren Probanden zunimmt. Dies läßt sich jedoch für die hier untersuchten Freiwilligen nicht nachweisen. Das AMV ist unter Wasser lediglich durch das Alter, nicht jedoch durch konstitutionelle Faktoren beeinflußt.

Lungengesundheit, Lungenvolumen und Rauchverhalten

Das Rauchverhalten übt keinerlei Einflüsse auf die ermittelten Atemgrößen aus. In der Literatur konnte hierzu keine Angabe gefunden werden. An Land wurden AZV und AMV von der relativen Vitalkapazität (Vitalkapazität in Relation zu Größe und Körpermasse) und von der 1-Sekundenkapazität im Sinne einer positiven Korrelation signifikant beeinflußt. Unter Wasser verlieren sich diese Zusammenhänge.

Crosbie et al. (1979) untersuchten die Lungenfunktion von 404 Berufstauchern. Die FVC lag im Mittel bei 120 % des vorhergesagten Wertes. 16 % hatten FEV1.0/FVC von weniger als 75 % und erfüllten damit die Kriterien einer leichtgradigen Obstruktion. Diese Werte decken sich hinsichtlich der Vitalkapazität exakt mit denen des hier untersuchten Kollektivs. Der Anteil der Probanden mit obstruktiven Ventilationsstörungen war in dieser Studie allerdings mit 9 % etwas niedriger als bei Crosbie et al. mit 16 %.

5. Zusammenfassung

5.1. Tauchreflex

Nicht alle Individuen zeigen Herzfrequenzabnahmen im Sinne des Tauchreflexes. Je nach Untersuchungsbedingungen reagieren zwischen 13 % und 42 % mit stabilen Herzfrequenzen oder gar mit einem Herzfrequenzanstieg.

Im Mittel ist der Tauchreflex jedoch vermutlich als Ergebnis der Entwicklungsgeschichte auch beim Menschen vorhanden aber unterschiedlich stark ausgeprägt. Etwa die Hälfte der Herzfrequenzabnahme während der Immersion läßt sich auch während Apnoe in der Luft erreichen. Andererseits kommt es auch bei Apnoe während des Gerätetauchens zu Herzfrequenzabnahmen in einem vergleichbaren Umfang, wie er durch Immersion ausgeübt wird. Daher scheint die traditionelle Erklärung für das Zustandekommen des Tauchreflexes (Aktivierung von Rezeptoren in der Gesichtshaut) unzureichend.

Verschiedene Faktoren nehmen Einfluß auf die Herzfrequenzänderung. Je höher die Ruheherzfrequenz ist, desto größer ist unter allen Versuchsbedingungen die Herzfrequenzabnahme. Größe, Körpermasse, Body Mass Index und Geschlecht nehmen statistisch Einfluß auf das Ausmaß der Herzfrequenzänderung unter Immersionsbedingungen. Bei Apnoe unter Wasser beeinflussen nur Geschlecht und Taucherfahrung statistisch signifikant die Herzfrequenzänderung. Apnoe ohne Immersion führt zwar im Mittel zur Herzfrequenzabnahme, unterliegt aber keinem Einfluß der im Experiment erhobenen Variablen. Gleiches gilt für Apnoe unter Überdruckbedingungen ohne Immersion (Druckkammer). Diese Zusammenhänge sind zwar statistisch signifikant, erweisen sich aber als ungeeignet, um mit ihnen das Maß der Herzfrequenzänderung vorherzusagen.

Der Tauchreflex verhält sich also nicht anders als viele andere biologische Phänomene. Er wird durch eine Reihe unterschiedlicher Regelgrößen beeinflusst, ja sogar teilweise völlig unterdrückt. Vermutlich ist das Ausmaß der Herzfrequenzänderung ein Summeneffekt, der letztlich zu einer Aktivierung des Parasympathikus führt. Liegt ein hoher Sympathikotonus vor, in dieser Studie durch eine hohe Ausgangsherzfrequenz reflektiert, dann führt die Aktivierung des Parasympathikus durch den Tauchreflex zu einer überproportionalen, teils drastischen Herzfrequenzabnahme. Alternativ war die Aktivierung des Parasympathikus bei einer

niedrigeren Ausgangsherzfrequenz (also einem niedrigen Sympathikotonus) prozentual schwächer ausgeprägt und verursachte damit eine nur moderate Herzfrequenzabnahme, oder die Herzfrequenz nahm sogar während der Apnoe zu. Dieser Befund war unabhängig vom aktuellen Protokoll. Er galt auch für Apnoe am Beckenrand und während Submersion mit DTG. Die vorliegenden Ergebnisse widersprechen also der These, daß der Tauchreflex ein allein durch die Wassertemperatur oder durch die Benetzung des Gesichts hervorgerufenes Phänomen ist.

5.2. Atemgrößen beim Gerätetauchen

Die Atemgrößen unter Wasser unterscheiden sich deutlich von denen an Land. Das Atemzugvolumen nimmt um 42 % zu. Die Atemfrequenz reduziert sich dagegen um 37 %. Das Atemminutenvolumen nimmt unter Wasser um 15 % ab. Die verlangsamte und vertiefte Atmung könnte eine Anpassung an einen erhöhten Atemwiderstand durch die verwendeten Atemregler des DTG und ein erhöhtes intrathorakales Blutvolumen sein, die dazu führt, daß vermutlich der Anstieg der Atemarbeit in Grenzen gehalten wird.

Unter Wasser nehmen Atemfrequenz und Atemminutenvolumen mit zunehmenden Alter signifikant ab. Konstitutionelle Variable wie Größe, Körpermasse und Body Mass Index korrelieren positiv mit dem Atemzugvolumen während Körpermasse und Body Mass Index negativ mit der Atemfrequenz korrelieren. Die am Beckenrand vorhandene Korrelation zwischen Vitalkapazität und 1 Sekundenkapazität mit dem Atemzugvolumen und dem Atemminutenvolumen gehen während des Tauchens mit DTG verloren. Frauen haben auch unter Wasser ein geringeres Atemzugvolumen als Männer. Taucher und Taucherinnen, die bereits viele Tauchgänge absolviert haben, verbrauchen unter Wasser weniger Atemluft als Tauchunerfahrene.

Literaturverzeichnis

Andersen, H.T. The reflex nature of the physiological adjustments to diving and their afferent pathway, *Acta Physiol Scand.* 58 (1963), 263-273

Andersson, J., Schagatay, E. Effects of lung volume and involuntary breathing movements on the human diving response, *Eur J Appl Physiol.* 1998; 77(1-2): 19-24

Anonymus Physiology; in: *Diving and Subaquatic Medicine*, Third edition (Edmonds, C., Lowry, C., Pennefather, J. Hrsg.) (1992): 24 - 40

Anonymus Sudden (cardiac) death syndromes, in: *Diving and Subaquatic Medicine*, Third edition (Edmonds, C., Lowry, C., Pennefather, J. Hrsg.) (1992): 354 - 361

Arborelius, M. jr., Balldin, U.I., Lilja, B., Lundgren, C.D.G. Hemodynamic changes in man during immersion with the head above water, *Aerospace Med.* 43 (1972): 592 - 598

Arnold, R.W. Extremes in human breath hold, facial immersion bradycardia, *Undersea Biomed Res.*, Vol. 12, No. 2, June 1985

Asmussen, E., Kristiansson, N.G. The "diving bradycardia" in exercising man, *Acta Physiol Scand.* 73 (1968), 527-535

Bert, P. Lecons sur la Physiologie, in: *Lecons sur la Physiologie Comparée*, 1st ed. J.B. Baillière et fils, (Paris 1870), 544

Bühlmann, A.A. Abnorme atmosphärische Bedingungen, in: *Tauchmedizin*, 4.Auflage (Bühlmann, A.A.) (1995): 6 - 18

Butler, P.J., Jones, D.R. Physiology of diving of birds and mammals, *Physiol Rev.* 1997 Jul; 77 (3): 837 - 99

Corriol, J.H., Rohner, J.J. New facts about bradycardia in breath holding divers, *Rev Subaquat Physiol.* 1 (1968): 24 - 27

Craig, A.B. Heart rate response to apneic underwater diving and to breath hold in men, *J Appl Physiol.* 18 (1963) :854-862

Craig, A.B., Medd, W.L. Man's responses to breath hold exercise in air and in water, *J Appl Physiol.* 24 (1968): 773 - 777

Crosbie, W.A., Reed, J.W., Clarke, M.C. Functional characteristics of the large lungs found in commercial divers, *J Appl Physiol.* (1979) Apr; 46(4): 639-45

Derion, T., Reddan, W.G., Lanphier, E.H. Static lung load and posture effects on pulmonary mechanics and comfort in underwater exercise, *Undersea and Biomed Res.*, Vol 19, No. 2, 1992: 85 - 96

- Doubt, T.** Cardiovascular and thermal response to SCUBA diving, *Medicine and Science in Sports and Exercise* 1996 May; 28(5): 581 - 586
- Ebbecke, U.** Über einen von der Gesichtshaut her ausgelösten Kreislaufreflex (Trigeminusreflex), *Pflügers Arch.* Bd. 247, S. 240 - 254 (1943)
- Fagijs, J, Sundlöf, G.** The diving response in man: Effects on sympathetic activity in muscles and skin nerve fascicles, *J Physiol.* 1986 377: 429 - 443
- Gauer, H.D.** Die hydrostatische Wirkung von Bädern auf den Kreislauf, *Dtsch Med J.* 6 (1955): 462 466
- Giesenhagen, B.** Telemetrische Untersuchungen der Herzfrequenz beim Tauchen in Wasser von 28 °C, Inauguraldissertation an der Medizinischen Fakultät der Christian Albrechts-Universität Kiel, 1981
- Glickmann-Weiss, E.L., Goss, F.L., Robertson, R.J., Metz, K.F., Cassinelli, D.A.** Physiological and thermal responses of males with varying body compositions during immersion in moderately cold water, *Aviation, Space and Env Med.*, Nov 1991: 1063-1067
- Harding, P.E., Roman, D., Whelan, R.F.** Diving bradycardia in men, *J Physiol.* 181 (1965): 401
- Hayashi, N., Ishihara, M., Tanaka, A., Osumi, T., Yoshida, T.** Face immersion increases vagal activity as assessed by heart rate variability, *Eur J Appl Physiol.* (1997); 76: 394- 399
- Hong, S.K., Moore, T.O., Seto, G., Park, K.H., Hiatt, W.R., Bernauer, E.M.** Lung volumes and apneic bradycardia in divers, *J Appl Physiol.*, Vol. 29, No. 2, Aug 1970: 172 - 176
- Hong, S.K., Song, S.H., Sim, P.K., Suh, C.S.** Seasonal observations on the cardiac rhythm during diving in the Korean ama, *J Physiol.* 33 (1967): 18
- Irving, L., Scholander, P.F., Grinell, S.W.** The respiration of the porpoise, *Tursiops truncatus*, *J Cell Comp Physiol.* 17 (1941), 145 - 168
- Jung, K., Stolle, W.** Herzfrequenzverhalten und Arrhythmiehäufigkeit beim Schwimmen und Tauchen, in: *Tauchmedizin 2* (F. Gerstenbrand E. Lorenzoni K. Seemann Hrsg.) Schlütersche Verlagsanstalt und Druckerei Hannover (1983): 250 - 265
- Lanphier, E.H., Camporesi, E.M.** Respiration and exertion, in: *The Physiology and Medicine of Diving*, 4th Edition (Bennett, P., Elliott, D, Hrsg) (1993): 77 - 120

Löllgen, H., von Nieding, G., Horres, R. Häodynamik und respiratorischer Gasaustausch bei Immersion bis zum Hals, in: Tauchmedizin (F. Gerstenbrand E. Lorenzoni K. Seemann Hrsg.) Schlütersche Verlagsanstalt und Druckerei Hannover (1978): 67 - 69

Nemiroff, M.J., Saltz, C.R., Weg, J.G. Survival after cold water near-drowning: The protective effect of the diving reflex, *Am Rev Respir Dis.* 115 (4) (1977): 145

Neubauer, B., Markus, F., Zander, R. Oxygen consumption during breath-hold diving, *Undersea and Hyperb Med.* 24 (1997) (Suppl.): 149

Olsen, C.R., Fanestil, D.D., Scholander, P.F. Some effects of breath holding and underwater diving on the cardiac rhythm in men, *J Physiol.* 17 (1962): 461

Petersen, B. Vasomotorische Reaktionen und Tauchreflex, *Med. Diss. Kiel* (1975)

Radermacher, P. Apnoetauchen, *Flug- und Reisemedizin* (1998);4: 24-27

Raglin, J.S., O'Connor, P.J., Carlson, N., Morgan, W.P. Responses to underwater exercise in scuba divers differing in trait anxiety, *Undersea and Hyperb Med.* 23 (1996) (2): 77 - 82

Risch, W.D., Koubenec, H.-J., Beckmann, U., Lange, S., Gauer, O.H. The effect of graded immersion on heart volume, central venous pressure, pulmonary blood distribution, and heart rate in man, *Pflügers Arch.* 374, 115 -118 (1978)

Schagatay, E., Andersson, J. Diving response and apneic time in humans, *Undersea Hyperb Med.* 1998 ; 25(1): 13-19

Schagatay, E., Holm, B. Effects of water and ambient air temperatures on human diving bradycardia, *Eur J Appl Physiol.* 1996; 73(1-2): 1- 6

Scholander, P.F., Hammel, H.T., Le Messurier, H. Circulatory adjustments in pearl divers, *J Appl Physiol.* 17 (1962): 184 - 190

Schuitema, K.E., Holm, B. The role of different facial areas in eliciting human diving bradycardia, *Acta Physiol Scand.* 132 (1988), 119-120

Song, S.H., Lee, W.K., Chung, Y.A., Hong, S.K., Mechanism of apneic bradycardia in man, *J Appl Physiol.* 27 (1969): 323-327

Sterba, J.A. Thermal problems: Prevention and treatment, in: *The Physiology and Medicine of Diving*, 4th Edition (Bennett, P., Elliott, D., Hrsg) (1993): 301 - 341

Sterba, J.A., Lundgren, C.E.G. Breath-hold duration in man and the diving response induced by face immersion, *Undersea Biomed Res.*, 15 (1988): 361 - 375

Stroemme, S.B., Kerem, D., Elsner, R. Diving bradycardia during rest and exercise and its relation to physical fitness, *J Appl Physiol.* (1970) 28: 614-621

- Struckmann, B.** Pulsverhalten bei freiem Streckentauchen in Schwimmbadtiefe bei Apnoe, in: Tauchmedizin 2 (F. Gerstenbrand E. Lorenzoni K. Seemann Hrsg.) Schlütersche Verlagsanstalt und Druckerei Hannover (1983): 250 - 265
- Thews, G.** Lungenatmung, in: Physiologie des Menschen (23. Auflage), Schmidt, R.F., Thews, G. (Hrsg.), 1987, S.581
- Weitz, T., Ulmer, H. -V., Glanzmann, P.** Atemluftverbrauch von Tauchern unter verschiedenen Bedingungen - Eine orientierende Pilotfeldstudie, in: Tauchmedizin 4 (F. Gerstenbrand E. Lorenzoni K. Seemann Hrsg.) Schlütersche Verlagsanstalt und Druckerei Hannover (1989): 46 - 57
- Zapol, W.M.** Diving adaptations of the wedell seal, Sci Am. (1987) 255: 100-105

Anhang

Ergebnisse der analytischen Statistik

Apnoeversuch

Die Auswertung mittels t-Test ergab folgende Irrtumswahrscheinlichkeiten

Abhängige Variable (Herzfrequenzänderungen)	Unabhängige Variable	p - Wert (t-Test)
DK(R-A)%	Apnoedauer DK	0,992
DK(R-A)%	Ruheherzfrequenz DK	0,008
DK(R-A)%	Tauch	0,711
DK(R-A)%	Alter	0,706
DK(R-A)%	Größe	0,849
DK(R-A)%	Körpermasse	0,348
DK(R-A)%	BMI	0,282
DK(R-A)%	FEV1%	0,452
DK(R-A)%	VC%	0,362
DK(R-A)%	Rauch	0,829
DK(R-M)%	Apnoedauer DK	0,375
DK(R-M)%	Ruheherzfrequenz DK	0,003
DK(R-M)%	Tauch	0,482
DK(R-M)%	Alter	0,909
DK(R-M)%	Größe	0,445
DK(R-M)%	Körpermasse	0,144
DK(R-M)%	BMI	0,210
DK(R-M)%	FEV1%	0,298
DK(R-M)%	VC%	0,202
DK(R-M)%	Rauch	0,559
L(R-A)%	Apnoedauer Luft	0,798
L(R-A)%	Alter	0,857
L(R-A)%	Größe	0,158
L(R-A)%	Körpermasse	0,118
L(R-A)%	BMI	0,274
L(R-A)%	Ruheherzfrequenz L	0,030
L(R-A)%	Ruheherzfrequenz LW	0,921
L(R-A)%	Ruheherzfrequenz W	0,601
L(R-A)%	Geschlecht	0,353
L(R-A)%	Tauchstatus	0,635
L(R-A)%	Rauch	0,555
L(R-A)%	FEV1%	0,852
L(R-A)%	VC%	0,749
L(R-A)%	Lungengesundheit	0,252
L(R-M)%	Apnoedauer Luft	0,708
L(R-M)%	Alter	0,253
L(R-M)%	Größe	0,350
L(R-M)%	Körpermasse	0,161
L(R-M)%	BMI	0,200
L(R-M)%	Ruheherzfrequenz L	0,005
L(R-M)%	Ruheherzfrequenz LW	0,205
L(R-M)%	Ruheherzfrequenz W	0,853
L(R-M)%	Geschlecht	0,406
L(R-M)%	Tauchstatus	0,649
L(R-M)%	Rauch	0,978
L(R-M)%	FEV1%	0,743
L(R-M)%	VC%	0,524
L(R-M)%	Lungengesundheit	0,314
LW(R-A)%	Apnoedauer L - W	0,544
LW(R-A)%	Alter	0,677
LW(R-A)%	Größe	0,007
LW(R-A)%	Körpermasse	0,001
LW(R-A)%	BMI	0,005
LW(R-A)%	Ruheherzfrequenz L	0,688
LW(R-A)%	Ruheherzfrequenz LW	0,022
LW(R-A)%	Ruheherzfrequenz W	0,880
LW(R-A)%	Geschlecht	0,000
LW(R-A)%	Tauchstatus	0,275
LW(R-A)%	Rauch	0,922

LW(R-A)%	FEV1%	0,924
LW(R-A)%	VC%	0,689
LW(R-A)%	Lungengesundheit	0,608
LW(R-M)%	Apnoedauer L - W	0,977
LW(R-M)%	Alter	0,270
LW(R-M)%	Größe	0,059
LW(R-M)%	Körpermasse	0,012
LW(R-M)%	BMI	0,030
LW(R-M)%	Ruheherzfrequenz L	0,205
LW(R-M)%	Ruheherzfrequenz LW	0,000
LW(R-M)%	Ruheherzfrequenz W	0,839
LW(R-M)%	Geschlecht	0,004
LW(R-M)%	Tauchstatus	0,133
LW(R-M)%	Rauch	0,644
LW(R-M)%	FEV1%	0,515
LW(R-M)%	VC%	0,460
LW(R-M)%	Lungengesundheit	0,131
W(R-A)%	Apnoedauer W	0,799
W(R-A)%	Alter	0,146
W(R-A)%	Größe	0,157
W(R-A)%	Körpermasse	0,157
W(R-A)%	Body Mass Index	0,255
W(R-A)%	Ruheherzfrequenz L	0,993
W(R-A)%	Ruheherzfrequenz LW	0,525
W(R-A)%	Ruheherzfrequenz W	0,013
W(R-A)%	Geschlecht	0,002
W(R-A)%	Tauchstatus	0,026
W(R-A)%	Rauch	0,502
W(R-A)%	FEV1%	0,761
W(R-A)%	VC%	0,776
W(R-A)%	Lungengesundheit	0,823
W(R-M)%	Apnoedauer W	0,643
W(R-M)%	Alter	0,078
W(R-M)%	Größe	0,177
W(R-M)%	Körpermasse	0,261
W(R-M)%	Body Mass Index	0,498
W(R-M)%	Ruheherzfrequenz L	0,937
W(R-M)%	Ruheherzfrequenz LW	0,443
W(R-M)%	Ruheherzfrequenz W	0,000
W(R-M)%	Geschlecht	0,014
W(R-M)%	Tauchstatus	0,024
W(R-M)%	Rauch	0,693
W(R-M)%	FEV1%	0,463
W(R-M)%	VC%	0,464
W(R-M)%	Lungengesundheit	0,528

Tab. 16: Übersicht der Irrtumswahrscheinlichkeiten (p-Wert im t-Test) im Apnoeversuch. Signifikante Werte sind hinterlegt. (R-A) = Differenz der Herzfrequenz Ruhewert - Ende der Apnoephase, (R-M) = maximal aufgetretene Differenz, L: Luft; L-W: Luft - Wasser, während Immersion; W: Wasser, Submersion mit DTG; DK: Druckkammer)

	VC %	VC %	FEV1%	FEV1%
	r	p	r	p
Apnoedauer L	0,212	0,032	0,195	0,049
Apnoedauer L-W	0,214	0,030	0,191	0,055
Apnoedauer W	0,218	0,028	0,135	0,175
Apnoedauer Druckkammer	0,096	0,791	0,261	0,467

Tab. 17: Übersicht der Irrtumswahrscheinlichkeiten (p-Wert im t-Test) im Apnoeversuch. Apnoedauer versus relative und absolute VC und FEV1. Signifikante Werte sind hinterlegt

Ventilationsversuch

Die Auswertung mittels t-Test ergab folgende Irrtumswahrscheinlichkeiten

Abhängige Variable (Atemvolumina)	Unabhängige Variable	p - Wert (t-Test)
AF(L)	Rauch	0,425
AF(L)	Tauchstatus	0,461
AF(L)	Anzahl Tauchgänge	0,626
AF(L)	FEV1%	0,968
AF(L)	Geschlecht	0,052
AF(L)	VC%	0,337
AF(L)	Alter	0,460
AF(L)	BMI	0,142
AF(L)	Körpermasse	0,069
AF(L)	Größe	0,090
AF(W)	Rauch	0,328
AF(W)	FEV1%	0,728
AF(W)	Geschlecht	0,081
AF(W)	Tauchstatus	0,320
AF(W)	Anzahl Tauchgänge	0,013
AF(W)	VC%	0,410
AF(W)	Alter	0,007
AF(W)	BMI	0,009
AF(W)	Körpermasse	0,009
AF(W)	Größe	0,103
AMV(L)	Rauch	0,380
AMV(L)	FEV1%	0,002
AMV(L)	Geschlecht	0,440
AMV(L)	Tauchstatus	0,339
AMV(L)	Anzahl Tauchgänge	0,414
AMV(L)	VC%	0,001
AMV(L)	BMI	0,856
AMV(L)	Alter	0,755
AMV(L)	Körpermasse	0,462
AMV(L)	Größe	0,334
AMV(W)	Rauch	0,134
AMV(W)	FEV1%	0,502
AMV(W)	Geschlecht	0,153
AMV(W)	Tauchstatus	0,292
AMV(W)	Anzahl Tauchgänge	0,043
AMV(W)	VC%	0,198
AMV(W)	Alter	0,027
AMV(W)	BMI	0,704
AMV(W)	Körpermasse	0,709
AMV(W)	Größe	0,198
AZV(L)	Rauch	0,539
AZV(L)	Tauchstatus	0,848
AZV(L)	Anzahl Tauchgänge	0,763
AZV(L)	FEV1%	0,005
AZV(L)	Geschlecht	0,038
AZV(L)	VC%	0,000
AZV(L)	Alter	0,683
AZV(L)	BMI	0,118
AZV(L)	Körpermasse	0,046
AZV(L)	Größe	0,093
AZV(W)	Rauch	0,404
AZV(W)	FEV1%	0,848
AZV(W)	Geschlecht	0,001
AZV(W)	Tauchstatus	0,516
AZV(W)	Anzahl Tauchgänge	0,778
AZV(W)	VC%	0,931
AZV(W)	Alter	0,997
AZV(W)	BMI	0,010
AZV(W)	Körpermasse	0,001
AZV(W)	Größe	0,002

Tab 18: Übersicht der Irrtumswahrscheinlichkeiten (p-Wert im t-Test) im Ventilationsversuch. Signifikante Werte sind hinterlegt

Lebenslauf

19.10.1961 geboren in Goch
1968 - 1972 Christophorus Grundschule Kranenburg
1972 - 1981 Freiherr vom Stein - Gymnasium Kleve
1982 - 1983 Grundwehrdienst im Sanitätsdienst der Luftwaffe
1983 - 1986 Berufsausbildung zum Krankenpfleger
Sankt Antonius Hospital Kleve
1986 - 1992 Studium der Medizin an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

17.11.1992 Abschluß des Medizinstudiums mit 3. Staatsexamen

26.06.1997 Facharztprüfung zum Facharzt für Anästhesiologie

Ärztliche Tätigkeit:

01.01.1993 - 30.06.1994 (AIP) und 01.07.1994 - 30.06.1995 (Assistenzarzt)
Klinik für Anaesthesie und Operative Intensivmedizin
Städtisches Krankenhaus Heilbronn, Chefarzt Prof. Dr. med. Schulte-Sasse

01.07.1995 -31.08.1997
Abteilung für Anästhesie und Operative Intensivmedizin St. Willibrord-Spital-
Emmerich, Chefarzt Dr. med. Loers

01.11.1997 - 31.12.1998
Facharzt für Anästhesiologie am Zentrum für Hyperbare Medizin in Moers
Chefarzt Dr. med. Tirpitz

01.01.1999 - dato
Facharzt für Anästhesiologie am Wilhelm - Anton - Hospital in Goch
Chefärzte: Dr. Osmialowski, Dr. Peters, Dr. med. Strobl

Danksagung

Bei all denen, die unterstützend und beratend oder als Freiwillige zur Erstellung dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich mich bedanken.

An erster Stelle sei Herr Professor Dr. rer. nat. J. D. Schipke genannt, dem ich für die freundliche Überlassung des Themas, für seine stets wertvolle Unterstützung und Beratung bei der Planung und Durchführung der Arbeit und für die verständnisvolle Begleitung danken möchte.

Ebenfalls danken möchte ich Herrn Professor Dr. Thämer für die Durchsicht der Arbeit.

Mein Dank gilt auch dem ärztlichen Leiter des Zentrums für Hyperbare Medizin, Moers, Herrn Dr. med. D. Tirpitz für die kompetente und freundliche Kooperation und Beratung.

Auch spreche ich den Mitarbeitern des Zentrums für Hyperbare Medizin, Moers, meinen Dank für die freundliche Unterstützung aus.

*Abstract: Untersuchungen zum Tauchreflex beim Menschen
und zu Atemgrößen beim Gerätetauchen*

Die vorgelegte Studie beschäftigt sich mit der kontrovers diskutierten Frage, ob der bei Seevögeln und Seesäugetieren existente Tauchreflex, also die Abnahme der Herzfrequenz bei Gesichtsimmersion, auch beim Menschen zu finden ist.

In einem dreiteiligen Versuch wurden von 102 freiwilligen Probanden im Abstand von 10 Sekunden die Herzfrequenz registriert. Dies geschah vor, während und nach einer Apnoephase von individuell unterschiedlicher Länge. Die Messung wurde außerhalb des Wassers, unter Wasser (Submersion mit Drucklufttauchgerät) und bei Immersion bis zum Hals mit Gesichtsimmersion während der Apnoephase durchgeführt. Eine Gruppe von 10 Freiwilligen wurde zudem noch in einer Druckkammer (1,2 bar) untersucht. Die durchschnittliche Abnahme der Herzfrequenz zum Ende der Apnoephase im war in den Teilversuchen verschieden stark ausgeprägt. Die Herzfrequenz fiel außerhalb des Wassers um 4 % und unter Wasser um 11 %. Am stärksten war die Herzfrequenzabnahme bei der Immersion bis zum Hals mit Gesichtsimmersion während Apnoe (14 %). In der Druckkammer wurde eine Abnahme der Herzfrequenz um 6 % registriert. Dieses Ergebnis darf als Beleg für die im Vergleich zu den Seesäugetieren rudimentär ausgeprägte Existenz des Tauchreflexes beim Menschen gewertet werden.

Es konnte gezeigt werden, daß nicht alle Individuen den Tauchreflex aufweisen. Unter allen Versuchsbedingungen gab es Individuen, die keine Änderungen der Herzfrequenz zeigen oder die sogar mit einer Zunahme reagierten (13 - 42 %). Die Ursachen hierfür ließen sich anhand der erhobenen Daten nicht ermitteln.

In einem weiteren Teil der Studie wurde an 118 Probanden die Änderung des Atemverhaltens zwischen der Atmung an Land und unter Wasser untersucht. Das Atemzugvolumen nimmt unter Wasser um 42 % zu. Die Atemfrequenz reduziert sich dagegen um 37% und das Atemminutenvolumen um 15%. Konstitutionelle Variable wie Größe, Körpermasse und Body Mass Index korrelieren positiv mit dem Atemzugvolumen während Körpermasse und Body Mass Index negativ mit der Atemfrequenz korrelieren. Erfahrene Taucher verbrauchen unter Wasser weniger Atemluft als Tauchunerfahrene.