

Medizinische Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin  
Campus Benjamin Franklin  
aus dem Institut für Sportmedizin  
Direktor: Univ. Prof. Dr. med. D. Böning

**Arterielle Katecholaminkonzentration und Herzfrequenzvariabilität  
beim Gerätetauchen mit Sauerstoff, Luft und Heliox als Atemgas**

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung der Doktorwürde eines  
Doctor rerum medicarum  
der Charité – Universitätsmedizin Berlin  
Campus Benjamin Franklin

vorgelegt von

**Frank Weist**

Diplomingenieur für Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
aus  
**Berlin**

**Referent (= Betreuer & 1. Gutachter):**

**Univ.-Prof. Dr. med. Dieter Böning  
Institut für Sportmedizin der FU-Berlin**

**Koreferent (= 2. Gutachter):**

**Univ.-Prof. Dr. med. Lothar Röcker  
Institut für Laboratoriumsmedizin, Berlin**

Gedruckt mit Genehmigung der Charité - Universitätsmedizin Berlin  
Campus Benjamin Franklin

Promoviert im Jahre 2009 in Berlin

Diese Dissertation ist den Männern gewidmet, welche als Taucher mit ihrem arteriellen Blut zu den Ergebnissen dieser Arbeit beitrugen:

**Volker "Purzel" Bader**

**Norbert Bärwald**

**Gunnar Buchholz**

**Frank "Fossi" Förster**

**Sven "Mupi" Friebel**

**Thomas "Steffi" Graf**

**Ingo "Superingo" Habeck**

**Axel Koppernock**

**Thomas "Thomatsch" Lehmann**

**Sven Leipold**

**Sven "Biber" Minow**

**Thorsten "Thosch" Scholz**

**Jens Serbser**

**Markus "Wachi" Wachtel**

**Martin Wiemann**

**Ingmar Wolff**

Ihnen wurde vor, während und nach mehreren Tauchgängen arterielles Blut entnommen. Keiner von ihnen erhielt dafür eine Aufwandsentschädigung oder finanzielle Gratifikation. Alle sind ehrenamtliche Rettungstaucher der DLRG in Berlin und Potsdam.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
0. <b><u>Formalia</u></b>	
0.1. <b>Titelblatt</b> , Betreuer / Gutachter	1
0.2. <b>Widmung</b>	3
0.3. <b>Inhaltsverzeichnis</b>	4
1. <b><u>Einleitung</u></b>	
1.1. <b>Prolog</b>	6
1.2. <b>Physiologische Vorbemerkungen</b>	8
1.2.1. Das sympathoadrenerge System	
Sympathoadrenerges System und physische Belastung und Belastbarkeit	
Sympathoadrenerges System und psychische Belastungen	
Sympathoadrenerges System und psychische Störungen	
Sympathoadrenerges System und Herz-Kreislaufkrankungen	
1.2.2. Die Rolle des sympathoadrenergen Systems beim Tauchen	
1.3. <b>Festlegung der medizinischen Forschungsziele</b>	16
2. <b><u>Methodik I</u></b> (Grundlagen)	
2.1. <b>Bestimmung der sympathoadrenergen Aktivität</b>	17
Mikroneurographie	
Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität	
Bestimmung von Noradrenalin aus venösem und arteriellem Blut	
Noradrenalin im Urin	
2.2. <b>Spezielle taucherische Erwägungen</b>	19
2.3. <b>Technische Aspekte</b>	22
HYDRA 2000	
GUSI	
TITAN	
Tauchturm	
2.4. <b>Personelle Gesichtspunkte</b>	25
3. <b><u>Technische Arbeiten</u></b> (Durchführung des Konstruktionsprozesses)	
3.1. <b>Stand der vorhandenen technischen Gegebenheiten</b>	26
3.2. <b>Konstruktionsaufgabe</b> (technische Aufgabenstellung)	29
3.2.1. Zielsetzung	
3.2.2. Anforderungen an die konstruktive Lösung (Lastenheft)	
3.2.3. Tabellarische Anforderungsliste mit Bewertung	
3.2.4. Darstellung und Beurteilung von Alternativmöglichkeiten	
Schlussfolgerung	
3.3. <b>Konzipieren und Entwerfen</b>	38
3.3.1. Darstellung der Problematik	
3.3.2. Analyse der Funktionsstruktur einer Atemgasversorgung	
3.3.3. Beschreibung der Lösungsvarianten	
3.3.4. Auswahl einer Lösungsvariante	

3.4.	<b>Ausarbeitung</b>	42
3.4.1.	Festlegung von Werkstoffen und Bauteilen	
3.4.2.	Endgültige Festlegung von Anordnung, Form und Bemessung	
3.4.3.	Kalkulation der Kosten	
3.5.	<b>Technische Ergebnisse</b>	43
3.5.1.	Darstellung der modifizierten Atemregleranlage	
3.5.2.	Weitere Umbauten und Ergänzungen der Tauchturmanlage	
3.5.3.	Beurteilung der Umbauten im Hinblick auf ihre praktische Eignung	
4.	<b>Methodik II</b> (Physiologische Untersuchungen)	
4.1.	<b>Formale Voraussetzungen</b>	48
4.2.	<b>Vorversuch</b>	48
4.3.	<b>Personal</b>	49
4.3.1.	Probanden	
	Stichprobengröße	
	Einschlusskriterien	
	Ausschlusskriterien	
4.3.2.	Mitarbeiter	
4.3.3.	Ärzte	
4.4.	<b>Material</b> (Anlagen, Verbrauchsgüter)	51
4.4.1.	Tauchturm	
4.4.2.	Atemgase	
4.4.3.	Medizinische Verbrauchsgüter	
4.5.	<b>Studienablauf</b>	53
4.5.1.	Allgemeine Beschreibung und Sicherheitsaspekte	
	Konzeption	
	Durchführung	
4.5.2.	Tauchprofil I (100% O <sub>2</sub> )	
4.5.3.	Tauchprofil II (Luft)	
4.5.4.	Tauchprofil III (Heliox21)	
4.5.5.	Tauchprofil I & II & III	
4.6.	<b>Bestimmung der Hormone</b>	65
4.6.1.	Blutentnahme und Blutprobenaufbereitung	
	Probenbehandlung	
4.6.2.	Bestimmung der Katecholamine	
	Labor- und Analysegeräte zur Bestimmung der Katecholamine	
4.6.3.	Bestimmung von ACTH und Cortisol	
	Labor- und Analysegeräte zur Bestimmung von ACTH und Cortisol	
4.7.	<b>Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität</b>	68
	Algorithmen zur Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität	
	r-MSSD	
	pNN50	
	LF, HF und der Quotient LF/HF	
	Geräte zur Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität	
4.8.	<b>Auswertung</b>	71
4.8.1.	Datenerhebung	
4.8.2.	Datenanalyse	

5.	<b><u>Ergebnisse</u></b>	
5.1.	<b>Hormone im arterialisierten Blutplasma</b>	73
5.1.1.	Noradrenalin	
5.1.2.	Adrenalin	
5.1.3.	Dopamin	
5.1.4.	ACTH	
5.1.5.	Cortisol	
5.2.	<b>Herzfrequenzvariabilität</b>	78
5.2.1.	Meßgröße <b>r-MSSD</b> aus dem Zeit-Bereich	
5.2.2.	Meßgröße <b>pNN50</b> aus dem Zeit-Bereich	
5.2.3.	Meßgrößen niedrige ( <b>LF</b> ) und hohe Frequenzen ( <b>HF</b> ) aus dem Frequenz-Bereich	
5.2.4.	Meßgröße <b>LF/HF – Verhältnis</b> aus dem Frequenz-Bereich	
5.3.	<b>Korrelation von Hormonkonzentration und Herzfrequenzvariabilität</b>	84
5.3.1.	Korrelation von Noradrenalin und Meßgrößen der Herzfrequenzvariabilität	
5.3.2.	Korrelation von Adrenalin und Meßgrößen der Herzfrequenzvariabilität	
6.	<b><u>Diskussion</u></b>	89
6.1.	<b>Versuchsablauf</b>	90
6.2.	<b>Hormone im arterialisierten Blutplasma</b>	94
6.2.1.	Noradrenalin	
6.2.2.	Adrenalin	
6.2.3.	Dopamin	
6.2.4.	ACTH und Cortisol	
6.3.	<b>Herzfrequenzvariabilität</b>	99
6.3.1.	Meßgrößen r-MSSD und pNN50 aus dem Zeit-Bereich	
6.3.2.	Meßgrößen niedrige (LF) und hohe Frequenzen (HF) sowie LF/HF – Verhältnis aus dem Frequenz-Bereich	
6.4.	<b>PROTOIS-Korrelation</b> (Korrelation von Hormonkonzentration und Herzfrequenzvariabilität)	102
6.5.	<b>Fazit</b>	103
7.	<b><u>Zusammenfassung</u></b>	106
8.	<b><u>Danksagung</u></b>	108
9.	<b><u>Literaturverzeichnis</u></b>	110
10.	<b><u>Anhang</u></b>	folgend auf 119
10.1.	Urkunde über die Eintragung des Projektnamens als Handelsmarke	
10.2.	Einverständniserklärung und Taucher-Informationsblatt	
10.3.	Meßwerte der Blut- und Herzfrequenzuntersuchungen	
10.4.	Statistische Auswertung der Blut- und Herzfrequenzuntersuchungen	
10.5.	Verzeichnis der Bilder, Diagramme und Tabellen im Hauptteil	
10.6.	Medienecho auf das <b>PROTOIS-PROJEKT</b>	
11.	<b><u>Glossar</u></b>	folgend auf Anhang

## 1. Einleitung

### 1.1. Prolog

In den letzten zwanzig Jahren hat sich der Tauchsport von einer Randerscheinung zur Breitensportart entwickelt. Er zählt heute mit zu den beliebtesten Urlaubsangeboten der Tourismusindustrie. Obwohl Sporttauchen durch Standardisierung der Ausbildungsrichtlinien und sicherheitsrelevante Geräteentwicklungen qualitativ immer sicherer geworden ist, steht dem noch immer eine hohe Zahl von schwer oder tödlich verlaufenden Tauchunfällen gegenüber. Bei diesen kann, selbst wenn die Unfallursache nachträglich geklärt worden ist, der Einfluss des vegetativen Nervensystems auf die inneren Organe während eines Tauchganges bisher kaum abgeschätzt werden. So beinhaltet selbst eine ausführliche Tauchtauglichkeitsuntersuchung, wie sie nach G 31 [Berufgenossenschaftliche Grundsätze] für handwerklich unter Wasser arbeitende Berufstaucher seit Jahrzehnten unverändert durchgeführt wird, keinen Stresstest, um künftige oder aktive Taucher entsprechend den auf sie zukommenden Belastungen auszuwählen. Ein zusätzliches Problem besteht darin, dass die Untersuchungsinhalte identisch geblieben sind, auch wenn sich die Ausbildungs-, Trainings- und Altersstruktur der heutigen Sporttaucher erheblich von der früherer Jahre unterscheidet.

In der Vergangenheit wurde das Sporttauchen nur von einem kleinen Personenkreis als Hobby betrieben. Diese Leute tauchten meist regelmäßig das ganze Jahr hindurch in deutschen (trüben und kalten) Gewässern. Ihren Jahresurlaub verbrachten sie oft am Mittelmeer. Viele von ihnen investierten jedes freie Wochenende in ihren Sport und viel Geld in ihre Ausrüstung, deswegen waren sie mit ihr gut vertraut und die Ausrüstung hervorragend gepflegt. Als Atemgas wurde fast ausschließlich Druckluft verwendet.

Schon als objektiver Betrachter und erst recht als teilnehmender Beobachter kann man davon ausgehen, dass diese Amateurlaucher eine gewisse Routine hinsichtlich der physischen und psychischen Belastungen des Tauchens besaßen. Tauchen als Urlaubsbeschäftigung war zur damaligen Zeit in nur wenigen spezialisierten Geschäften oder Agenturen zu buchen.

Heute hingegen bietet fast jedes Reisebüro einen Badeurlaub in einem Hotel mit Tauchbasis an. Viele Urlauber und Touristen wollen in den Ferien eine so genannte "Erlebnissportart" betreiben und kaufen einen Tauchkurs. So kann es dazu kommen, dass junge Menschen, aber auch ältere Personen jenseits des vierzigsten Lebensjahres, die vorher dem Sport im Wasser eher weniger zugetan waren, alle halbe Jahre oder seltener einige Tauchgänge durchführen. Diese Leute tauchen nur gelegent-

lich, sind häufig untrainierter und weniger mit Wasser und Ausrüstung vertraut, als der typische Sporttaucher früherer Jahre. Zudem gibt es in dieser Gruppe ältere Tauchanfänger (41+) und ganz junge Tauchanfänger. (So genanntes "Kindertauchen" wird von einigen Tauchschiulen schon für Achtjährige angeboten).

Neben diesen Urlaubshobbytauchern gibt es eine zweite Gruppe von Sporttauchern. Seit etwa fünf Jahren haben auch das so genannte "Technische Tauchen" und das Tauchen mit Nitrox-Gemischen ( $O_2 + N_2$ ) im Nicht-Profi-Bereich einen exponentiellen Aufschwung erlebt. Ersteres führt mit speziellen Geräten und künstlichen Atemgasgemischen auf Tiefen bis über 100m, Letzteres erlaubt dank eines erhöhten Sauerstoffanteils im Atemgas längere Tauchzeiten im Bereich bis 50m Wassertiefe. In beiden Fällen ist das Atemgas keine verdichtete Umgebungsluft, sondern muss aufwendig gemischt werden.

Sowohl Urlaubshobbytaucher als auch Technische Taucher sind also diversen Stressfaktoren ausgesetzt, die bei einem regelmäßig tauchenden Sporttaucher nicht auftreten oder durch Routine verringert werden.

Die Problematik, dass Angst eine vermehrte Ausschüttung von Hormonen (Adrenalin) bewirkt, welche zum Hyperventilationssyndrom und damit zur Bewusstlosigkeit unter Wasser führen kann, wurde schon 1974 in der zweiten Auflage eines Leitfadens der Tauchmedizin beschrieben [Ehm, OF 1974]. Anschaulich und leicht verständlich wurde einem großen Leserkreis von Hobby- und Berufstauchern ein Gefährdungspotential offen gelegt, welches in der Erstauflage von 1968 noch nicht zu finden war [Ehm, OF und Seemann, K 1968]. Wie aktuell diese Problematik heute ist, zeigt auch die Artikelserie des Taucherarztes Dr. Roggenbach im "Sporttaucher", der Zeitschrift des Verbandes deutscher Sporttaucher [Roggenbach 2006(a)(b)(c)]. Es wird darin deutlich, dass Panik und Stress die Auslöser darstellen für tauchtypische Unfallgeschehen wie einen zu schnellen Aufstieg mit Lungenüberdruckbarotrauma oder sich daran anschließender Dekompressionskrankheit.

Doch die Auswirkungen von äußerlichen Einflüssen beim Tauchen auf die Sympathikusaktivität sind mit heutigen Methoden noch nicht gefahrlos messbar, können somit nicht quantifiziert werden, und haben daher den Stellenwert qualitativer Spekulationen. Umso wichtiger erscheint es daher, die Änderung der Sympathikusaktivität zu messen bei einem Tauchgang, der unter sehr günstigen Bedingungen (Routine, warm, hell, risikoarm) erfolgt. Sollte die gleichzeitige Bestimmung sowohl der Stresshormonausschüttung im Blut als auch der Herzfrequenzvariabilität während eines solchen Tauchganges durchführbar sein, dann könnte man erstmalig ein Maß die Aktivität des Sympathikus beim Tauchen quantifizieren. Diese Erkenntnis wird in künftige Tauchtauglichkeitsuntersuchungen einfließen.



Sollte sich darüber hinaus eine eindeutige Korrelation zwischen der Änderung der arteriellen Katecholaminkonzentration als Maß für die Sympathikuserregung und der Herzfrequenzvariabilität beim Tauchen mittels eines am Körper getragenen Herzfrequenzvariabilitäts-Messgerätes in Armbanduhrengroße (Pulsuhr) feststellen lassen, könnte auf Grundlage der in dieser Arbeit gefundenen Korrelation ein Pulsuhr-Warngerät für Taucher entwickelt werden. Dieses könnte dem Taucher oder seinen Partnern schon vor einer gefährlichen Panikattacke den kritischen Erregungszustand des sympathoadrenergen Systems signalisieren, so dass ein kontrollierter Aufstieg eingeleitet werden kann. Eine Weiterentwicklung dieses Pulsuhr-Warngerätes für den professionellen Arbeitstaucher könnte die gemessenen Daten telemetrisch dem Einsatzleiter außerhalb des Wassers übermitteln.

Sehr bald wäre es aufgrund derartig zu gewinnender Erkenntnisse dann möglich, den seit Jahrzehnten identischen Umfang einer Tauchtauglichkeitsuntersuchung an die tatsächlichen Tauchaktivitäten des zu untersuchenden Tauchers anzupassen.

**Erstmals in der Geschichte der Unterwassermedizin könnte auf der Grundlage dieser Untersuchungen ein technisches Instrument entwickelt werden, welches es ermöglicht, Tauchunfälle zu verhindern, bevor sie geschehen, anstatt die negativen Folgen eines bereits eingetretenen Unfalls zu verringern oder zu behandeln.**

## 1.2. Physiologische Vorbemerkungen

### 1.2.1. Das sympathoadrenerge System

Das sympathoadrenerge System umfasst das sympathische Nervensystem und die chromaffinen Zellen des Nebennierenmarks. In den postganglionären sympathischen Nervenfasern wird Noradrenalin als Neurotransmitter gebildet und in Vesikeln gespeichert. Bei Aktivierung des Sympathikus wird Noradrenalin in den synaptischen Spalt freigesetzt und vermittelt seine Wirkungen über Alpha oder Beta-Adrenozeptoren, wobei eine hohe Rezeptoraffinität zu Alpha-1 und eine geringe zu Beta-2 Adrenozeptoren vorliegt. Dennoch kann Noradrenalin unter körperlicher Belastung auch Beta-2 adrenerge Wirkungen vermitteln. So wurde bei Plasmakonzentrationen über 15 nmol/l Noradrenalin auch eine stoffwechselaktivierende Wirkung (welche Beta-2-Adrenozeptor-vermittelt abläuft) gefunden [Silverberg et al. 1978].

Etwa 90 % des in den synaptischen Spalt freigesetzten Neurotransmitters werden über einen neuronalen Reuptake (Uptake-1) wieder aufgenommen und intrazellulär metabolisiert oder in die Speichervesikel aufgenommen. Etwa 5 - 10 % des No-

radrenalins gelangen aus dem synaptischen Spalt in das Blut. Dieser als Spillover bezeichnete Vorgang trägt zu etwa 95 % zur Plasmakonzentration von Noradrenalin bei. Die Aktivierung des Sympathikus erfolgt nicht homogen, sondern hängt wesentlich vom jeweiligen Stimulus ab. Den stärksten physiologischen Stimulus zur Aktivierung des sympathoadrenergen Systems stellt die intensive körperliche Belastung dar [Strobel et al. 1998; Cryer 1980]. Lediglich nach akutem Myokardinfarkt [Christensen et al. 1974] und nach hypertensiven Krisen bei Phäochromozytompatienten [Bravo et al. 1984] wurden höhere Plasmakonzentrationen an Noradrenalin gemessen. Schwere Hypoxie [Asano et al. 1997], schwere Hypoglykämie [Garber et al. 1976] und Ketoacidose [Christensen 1974] hingegen bewirken eine geringere Aktivierung des sympathoadrenergen Systems. Andere wichtige Stimuli sind psychische Belastungen, Kältereize, sowie die Körperposition [Cryer 1980].

In chromaffinen Zellen des Nebennierenmarks sind Adrenalin und Noradrenalin (7:1) in Vesikeln gespeichert. Bei Freisetzung werden beide Substanzen direkt in den Blutweg abgegeben. Etwa 95 % der Plasmakonzentration [Esler et al. 2004] von Adrenalin stammen aus dem Nebennierenmark, für Noradrenalin sind es etwa 5 %. Adrenalin zeigt eine höhere Affinität zu Beta-Adrenozeptoren und vermittelt Alpha-adrenerge Wirkungen erst bei Plasmakonzentrationen über 8 nmol/l [Silverberg et al. 1978].

Noradrenalin kann damit als Maß für die Sympathikusaktivität, Adrenalin für die Aktivierung der chromaffinen Zellen des Nebennierenmarks durch präganglionäre sympathische Nervenfasern genutzt werden.

Die Wirkungen des sympathoadrenergen Systems sind vielfältig und von entscheidender Bedeutung für die Funktionsfähigkeit, aber auch die Leistungsfähigkeit des menschlichen Organismus. Unter taucherischen Aspekten von besonderer Bedeutung sind die Wirkungen des sympathoadrenergen Systems hinsichtlich physischer und psychischer Belastung und Belastbarkeit wie auch seine Rolle bei pathophysiologischen Mechanismen, vor allem des Herz-Kreislauf-Systems, aber auch bei psychischen Störungen wie Panikattacken.

### **Sympathoadrenerges System und physische Belastung und Belastbarkeit**

Die Katecholamine Adrenalin und Noradrenalin sind die Wirksubstanzen des sympathoadrenergen Systems und werden als Fight- und Flight- Hormone bezeichnet. Sie bewirken eine gesteigerte körperliche Leistungsfähigkeit und erhöhen dadurch die Chancen auf eine erfolgreiche Flucht oder auf einen erfolgreichen Kampf. Wie kommt es zur verbesserten körperlichen Leistungsfähigkeit ?

Zum einen verbessern die Katecholamine in der Summe die Sauerstoffversorgung der arbeitenden Skelettmuskulatur. Dies erfolgt durch ihre vasodilatierende Wirkung

auf die Bronchien und auch auf die Arteriolen, welche zur arbeitenden Skelettmuskulatur ziehen. Weiterhin wird durch ihre positiv chronotrope und die positiv inotrope Wirkung das Herzminutenvolumen gesteigert

Zum anderen werden die Energie liefernden Stoffwechselwege aktiviert, so dass das verbesserte Sauerstoffangebot auch genutzt werden kann und zu einer erhöhten ATP-Bildungsrate führt [Kjaer et al. 1988; Galbo et al. 1984]. Noradrenalin und vor allem Adrenalin bewirken eine Steigerung der Lipolyse- als auch der Glykogenolyse-rate. Der leistungssteigernde Effekt des sympathoadrenergen Systems wurde indirekt in zahlreichen Alpha- und Beta-Adrenozeptorblocker-Studien nachgewiesen. Eine Alpha-1-Adrenozeptoren-Blockade wirkt leistungsmindernd. Die maximale Leistung und die maximale Sauerstoffaufnahme nehmen signifikant um etwa 6 % ab. Die für einen 5000 m Lauf benötigte Zeit steigt um 3 Prozent. Systolischer und diastolischer Blutdruck nehmen um 5 respektive 13 Prozent ab im Vergleich zur Kontrollgruppe. Die Herzfrequenz bleibt unverändert [Tomten et al. 1994].

Die Blockade von Beta-Adrenozeptoren beeinflusst sowohl die hämodynamischen und metabolischen Anpassungen an körperliche Belastung als auch den Ionenhaushalt. Beta-Adrenozeptor-Blockade vermindert die maximale aerobe Leistungsfähigkeit, unabhängig ob diese als maximaler Sauerstoffverbrauch, als maximale Leistung oder als Zeit bis zur Erschöpfung ausgedrückt wird. Sie nimmt in den einzelnen Studien um 5 - 15 % ab [Van Baak 1988]. Bei submaximaler Belastung ist der leistungsmindernde Effekt durch Beta-Adrenozeptorblockade noch deutlicher. So ist bei einem submaximalen Ausdauerstest die Belastungszeit bis zum Abbruch um 16 - 50 % reduziert [Cleroux et al. 1987; Vanhees et al. 1987]. Dieser Effekt ist bei nichtselektiver Beta-Adrenozeptorblockade deutlicher als bei selektiver Beta-1- Adrenozeptorblockade. Als Ursachen für die verminderte Leistungsfähigkeit spielen eine Reihe von Faktoren eine Rolle. Während submaximaler Belastung sinkt das Herzminutenvolumen um 10 - 20 % [Van Baak 1988]. Das verminderte maximale Herzminutenvolumen vermindert den maximalen Blutfluss zur arbeitenden Skelettmuskulatur [Schrauwen et al. 1995] und damit die Leistungsfähigkeit. Auch die reduzierte maximale Glykolyserate unter erschöpfender Belastung [Kaiser et al. 1986] könnte die maximale Leistungsfähigkeit während nichtselektiver Beta-Adrenozeptorblockade herabsetzen.

Die Beziehung von sympathoadrenergem System und Leistungsfähigkeit ist wechselseitig. Das sympathoadrenerge System beeinflusst nicht nur die momentane körperliche Leistungsfähigkeit, sondern umgekehrt beeinflusst auch die allgemeine körperliche Leistungsfähigkeit, also der Trainings- oder Fitnesszustand, die Wirkung des sympathoadrenergen Systems.

Bei akuter Belastung zeigt die Beziehung zwischen Sympathikusaktivität und Belastungsintensität einen exponentiellen Verlauf. Ab Belastungsintensitäten von 50 – 60 % der  $VO_2max$  erfolgt ein zunehmender Anstieg der Plasmakonzentration von Noradrenalin mit der Belastungsintensität [Kjaer 1992; Mazzeo et al. 1997]. Die Plasmakonzentration von Noradrenalin steigt auch mit der Belastungsdauer an, jedoch ist der Effekt der Belastungsdauer gegenüber dem Effekt der Belastungsintensität weniger ausgeprägt [Kjaer 1992]. Zwei neuronale Mechanismen sind an der Abstimmung der Sympathikusaktivität auf die körperliche Belastung beteiligt. Bei dem einen Mechanismus bestimmt die neuronale Aktivität, die im cerebralen Cortex verantwortlich ist für die Rekrutierung motorischer Einheiten, gleichzeitig kardiovaskuläre Kontrollareale in der ventrolateralen Medulla und die Freisetzung von Noradrenalin in der Peripherie. Dieser Feed-Forward Mechanismus, über den z.B. schnelle Änderungen der efferenten Sympathikusaktivität zum Herz und zu Blutgefäßen festgelegt werden, wird als "Zentrale Mitinnervation" (Central Command) bezeichnet [Goodwin et al. 1972]. Bei dem anderen Mechanismus kommt es durch Aktivierung von Metaborezeptoren und/oder Mechanorezeptoren in der Skelettmuskulatur reflektorisch über Aktivierung kardiovaskulärer Kontrollareale in der ventrolateralen Medulla zur Freisetzung von Noradrenalin in der Peripherie. Dieser Feedback-Mechanismus wird als "Exercise Pressor Reflex" bezeichnet [Fritsch-Yelle et al. 1996].

Durch körperliches Training sind langanhaltende Adaptationen des sympathoadrenergen Systems wahrscheinlich [Strobel et al 1999].

Submaximale Belastungstests gleicher absoluter Belastung ( $242 \pm 14$  Watt) führten im Verlauf eines 7-wöchigen Trainings zu einem verminderten Anstieg der Plasmakonzentration von Adrenalin und Noradrenalin, während bei gleicher relativer submaximaler Belastung gleiche Anstiege von Noradrenalin und Adrenalin bei Ausdauertrainierten und Untrainierten gemessen wurden [Winder et al. 1978]. Unter Beta-Adrenozeptorblockade reagierten gut ausdauertrainierte Athleten mit einer deutlicheren Verminderung der maximalen Sauerstoffaufnahme (Leistungsseinbuße 11,2 % versus 6,5 %). Es wird diskutiert, dass die Adaptationsmöglichkeiten an die durch Beta-Adrenozeptorblockade verminderte Herzfrequenz bei Trainierten bereits für die höhere Leistungsfähigkeit ausgeschöpft wurden und deshalb die Kompensationsmöglichkeiten geringer sind als beim Untrainierten [Joyner et al. 1986]. Auch bei Übertraining, das gekennzeichnet ist durch Leistungsabfall, verminderte Belastbarkeit und schnelle Ermüdbarkeit werden in einzelnen Studien Hinweise auf eine veränderte Antwort des sympathoadrenergen Systems auf körperliche Belastung gefunden. Eine Gruppe von übertrainierten Mittelstreckenläufern zeigte bei einem anaeroben Laufbandtest gegenüber einer Kontrollgruppe von trainierten Mittelstreckenläufern

um 23 - 46 % erniedrigte Plasmakonzentrationen von Noradrenalin und Adrenalin [Kindermann 1986]. Übertrainierte Schwimmer zeigten in der Taperphase gegenüber einer Kontrollgruppe von Schwimmern gleicher Leistungsklasse erhöhte Ruhewerte an Noradrenalin [Hooper et al. 1993]. Lehmann et al. [1992] fanden einen signifikant höheren Anstieg der Plasmakonzentration von Noradrenalin nach einem submaximalen Belastungstest nach der 4. Woche des Übertrainings im Vergleich zum Beginn des Übertrainings [Lehmann et al. 1992].

### **Sympathoadrenerges System und psychische Belastungen**

Psychische Belastungen, sowohl chronisch als auch akut, aktivieren des sympathoadrenergen Systems. Die physiologischen Reaktionen auf eine Erhöhung der Sympathikusaktivität sind bekanntermaßen die Reaktionen, die sich auch bei Aktivierung des sympathoadrenergen Systems unter physischen Belastungen zeigen (siehe voriges Kapitel). Was in früheren Zeiten durchaus sinnvoll war, weil es zu einer Erhöhung der Aufmerksamkeit und auch zu einer gesteigerten Leistungsfähigkeit führte, die dann auch für Flucht oder Kampf genutzt wurde, bleibt das damals positive Potential solcher Reaktionen des sympathoadrenergen Systems auf Stress-Situationen in der heutigen Zeit überwiegend ungenutzt und verkehrt sich dadurch vor allem bei chronischem Auftreten ins Gegenteil. So werden chronische Stress-Belastungen z.B. am Arbeitsplatz in engen Zusammenhang gebracht mit gesundheitlichen Risiken und Erkrankungen. Sie bedeuten eine erhöhte Inzidenz für das Auftreten von Depressionen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen [Spieker et al. 2003]. Auch besteht eine erhöhte Neigung zur Thrombozytenaggregation [Brydon et al. 2006] und zur Blutgerinnung [von Känel 2003].

### **Sympathoadrenerges System und psychische Störungen**

Zentral spielt Noradrenalin als Neurotransmitter ebenfalls eine wichtige Rolle. Bei verschiedensten psychischen Erkrankungen wie Schizophrenie, Depression, Agoraphobie oder bei panischen Zuständen gibt es deutliche Hinweise, dass Entgleisungen zentral lokalisierter noradrenerger Zentren ursächlich beteiligt sind [Charney et al. 1986; Hsiao et al. 1993]. Von großer Relevanz für das Tauchen ist die Frage, ob die beim Tauchen in größeren Tiefen mitunter auftretenden psychischen Fehlreaktionen wie Panikattacken ebenfalls mit Änderungen in der Aktivität des sympathoadrenergen Systems in Zusammenhang stehen. Solche Panikattacken können sich in Schweißausbrüchen, Brustschmerzen, Atembeschwerden, in Anstiegen von Herzfrequenz und Blutdruck äußern, und sie können zu folgenschweren taucherischen Fehlhandlungen führen. Indirekte Hinweise auf eine Rolle des sympathoadrenergen Systems finden sich in verschiedenen Studien. Das Auftreten von Panikattacken scheint genetisch prädisponiert zu sein [Esler et al. 2004]. So liegt bei Patienten mit auftretenden Panikattacken ein fehlerhafter neuronaler Re-Uptake von Noradrenalin

in die präsynaptischen Nervenendungen vor, der die noradrenerge Wirkung postsynaptisch verstärkt [Versiani et al. 2002]. Mit den Panikattacken einher geht eine signifikant erhöhte sympathische Nervenaktivität mit einer gesteigerten Frequenz an Aktionspotentialen [Esler et al. 2004]. Auch aus diesem Grund ist das Verhalten des sympathoadrenergen Systems unter Wasser von Bedeutung.

### **Sympathoadrenerges System und Herz-Kreislaufkrankungen**

Eine gesteigerte Aktivität des sympathoadrenergen Systems unter körperlicher Belastung ist auf der einen Seite eine sinnvolle Reaktion des Organismus, da die Aktivierung des sympathoadrenergen Systems eine notwendige Voraussetzung für die maximale körperliche Leistungsfähigkeit darstellt. Zum anderen ist bekannt, dass eine Steigerung der Aktivität des sympathoadrenergen Systems eine erhöhte Belastung des Herzkreislaufsystems darstellt [Van Baak, 1988]. So korrelieren zahlreiche allgemeine Komplikationen von Herz-Kreislaufkrankungen in dem einen oder anderen Punkt mit der Sympathikusaktivität [Ganguly et al. 1989]. Goldstein [1983] zeigte, dass in allen Studien mit essentiellen Hypertonikern im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe die Plasmakonzentration von Noradrenalin bei jungen Hypertonikern erhöht waren. Auch bei jungen milden Hypertonikern zeigen zahlreiche Studien, dass die Plasmakonzentration von Noradrenalin und Adrenalin gegenüber Normotensiven erhöht ist. Auch beim Phäochromozytom, einem Nebennierenmarkstumor, der mit Bluthochdruck oder mit hypertensiven Krisen einhergeht, sind die Plasmakonzentrationen von Noradrenalin und/oder Adrenalin erhöht. Bravo et al. [1984] zeigten, dass durch Bestimmung der Plasmakonzentrationen von Noradrenalin plus Adrenalin mit 94 % Sensitivität zwischen Phäochromozytom und Essentieller Hypertonie differenziert werden kann. Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen auch andere Autoren [Cryer 1980; Geffen et al. 1973]. Patienten mit kongestiven Herzfehlern haben erhöhte Plasmakonzentrationen an Noradrenalin. Ursache ist ein erhöhter Spillover von Noradrenalin, zu dem vor allem Niere und Herz beitragen, während der Spillover der Lunge gegenüber Gesunden unverändert ist [Hasking et al. 1986]. Interessanterweise hängt die Plasmakonzentration von Noradrenalin bei diesen Patienten auch mit der Lebenserwartung zusammen. Patienten mit Konzentrationen von Noradrenalin im Plasma von über 4,7 nmol/l zeigten eine schlechtere Prognose als Patienten mit Plasmakonzentrationen zwischen 2,4 und 4,7 nmol/l und diese eine schlechtere Prognose als diejenigen mit Plasmakonzentrationen unter 2,4 nmol/l [Cohn 1989].

### 1.2.2. Die Rolle des sympathoadrenergen Systems beim Tauchen

Nur wenige wissenschaftliche Studien beschäftigen sich mit den Auswirkungen von Aufenthalt im Wasser auf die Sympathikusaktivität. Dabei ist zu unterscheiden zwischen Eintauchen und Untertauchen in Wasser. Beim Eintauchen, als Immersion bezeichnet, bleibt der Kopf der Versuchspersonen außerhalb des Wassers. Ein Untertauchen, Submersion genannt, liegt vor, wenn sich der ganze Körper unter Wasser befindet.

Schon unter normalen Druckverhältnissen, also bei einem unveränderten Umgebungsluftdruck von etwa 1 bar, nimmt eine Immersion erheblichen Einfluß auf die menschlichen Kreislauffunktionen [Böning et al. 1972, 1979 & 1988].

Eine Immersionsstudie mit sieben Marinetauchern, durchgeführt unter Normaldruck und einem Überdruck von 4 bar zeigte, dass die Katecholaminkonzentrationen bei Überdruck signifikant höher wurden [Manalaysay et al. 1983]. In früheren Versuchen von 1978 [Matsuda et al. 1978; Carlyle 1978] wurden die Katecholamine und deren Metabolite im Urin der Taucher, die sich auf 11 bar (=100 mWs, immersiv) und 31 bar (=300 mWs) befanden, untersucht. Es wurde festgestellt [Matsuda et al. 1978], dass die NoradrenalinKonzentration im Urin sich während und nach der Immersion bei 11 bar signifikant erhöht, nicht jedoch bei 1 bar. Die AdrenalinKonzentration im Urin wurde weder durch Druck noch durch Immersion verändert.

Weiterhin gab es Untersuchungen der Herzfrequenz bei Menschen, die auf 3,3 m Wassertiefe in Apnoe und mit Drucklufttauchgerät tauchten. Diese zeigen, dass es zu einer Bradykardie beim Apnoe-, nicht jedoch beim Gerätetauchen kommt [Landsberg, 1975].

In einer weiteren Studie von 1995 wird belegt, dass Immersion, Submersion und Gerätetauchen das vegetative Nervensystem stark stimulieren [Pelzer et al. 1995]. Dort wird die minimale Intervalllänge zur sicheren Erfassung der Kurzzeitherzfrequenzvariabilität mit drei Minuten angegeben. Aus dem Jahre 2000 stammt eine Studie, die mittels Power-Spektral-Analyse der Herzfrequenzvariabilität eine Erhöhung der parasympathischen Aktivität durch hyperbare Sauerstoffatmung ausweist [Lund et al. 2000]. Bei dieser Methode wird die Häufigkeitsverteilung der im Herzfrequenzspektrum gemessenen Frequenzen dargestellt, um letztere mit physiologischen Prozessen in Verbindung bringen zu können.

Diverse Änderungen der Stresshormonkonzentration unter Überdruck bei Sauerstoff- und Luftatmung wurden 1999 untersucht [Lund et al. 1999]. Die beiden letztgenannten Studien wurden trocken auf 2,5bar=15mWs durchgeführt, ebenso eine Untersuchung an hyperbar oxigenierten Patienten [Tremellen et al. 1993]. Aus ihnen lässt

sich schließen, dass bereits eine Steigerung des Sauerstoffpartialdruckes im Atemgas die Sympathikusaktivität stimuliert. Zusammenfassend liefern die bisherigen Studien Hinweise darauf, dass die Sympathikusaktivität durch Tauchen gesteigert wird. Allerdings sind Katecholaminbestimmungen aus Venenblut und Urin wenig sensitiv.

In dieser Studie wurden aus eben diesem Grunde arterielle Blutentnahmen durchgeführt, die eine Beurteilung der Aktivität des sympathoadrenergen Systems erlauben. Diese Methode wird in der Praxis als Goldstandard zur Beurteilung des sympathoadrenergen Systems angesehen [Hudson et al. 1982].

Mit zunehmender Tauchtiefe steigt das Risiko eines Tiefenrausches, welcher sich bemerkbar macht als ein Zustand eingeschränkter Wahrnehmungsfähigkeit, gestörten Urteilsvermögens und unlogischen Reaktionsverhaltens. Ein Tiefenrausch kann ab einer Tauchtiefe von 30 Metern auftreten [Kromp et al. 2002]. Seine Wirkung konnte eindeutig dem Stickstoffanteil im Atemgas Luft zugeschrieben werden. Bis heute jedoch sind die Mechanismen des Stickstoff-Effekts auf das Zentralnervensystem nicht geklärt [Pastena et al., 2005], genauso die Effekte auf das sympathoadrenerge System.

Wie bereits ausgeführt, kann aus bisherigen Studien geschlossen werden, dass eine Erhöhung des Sauerstoffpartialdruckes die Sympathikusaktivität steigert. Eine Zunahme des Stickstoffpartialdruckes zeigt eine narkotisierende Wirkung [Pastena et al. 2005]. Inwieweit das sympathoadrenerge System hierbei involviert ist, bleibt bisher unklar. Allerdings wird spekuliert, dass die bei Weddell-Seehunden ausbleibende Narkosewirkung bei großen Tauchtiefen in indirektem Zusammenhang steht mit einer erhöhten Sympathikusaktivität auf die Milz [Zapol et al 1989]

Messungen der Katecholaminkonzentration bei tatsächlichen Tauchgängen, also submersiv, wurden bisher lediglich an freiwillig oder unfreiwillig tauchenden Tieren vollzogen, beispielsweise bei der Wedell-Robbe [Hurford et al. 1996], bei Enten [Lacombe et al. 1990; Hudson et al. 1982] und Anuren [Boutilier et al. 1989].

Alle Messungen an Tieren (Säugetiere, Vögel und Frösche) zeigten deutliche Änderungen der Katecholaminkonzentration beim Tauchen. Sämtliche Tauchgänge wurden in Apnoe und ohne einen applizierten außerhalb des Körpers mitgeführten Luftvorrat (Tauchgerät) durchgeführt.

Hinweise darauf, dass die Aktivität des sympathoadrenergen Systems bei Menschen, die sich submersiv (also vollständig untergetaucht) im Wasser befinden, jemals Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen war, lassen sich in der Literatur nicht finden.



### **1.3. Festlegung der medizinischen Forschungsziele**

Das sympathoadrenerge System ist unter anderem an zahlreichen Regulationen des Herz-Kreislauf-Systems beteiligt und die Beurteilung seiner Aktivität deshalb von besonderer Bedeutung. Dies gilt auch für das Tauchen mit einem Drucklufttauchgerät. Dort ist bei Unfällen häufig das Herz-Kreislauf-System involviert und vermutlich auch das sympathoadrenerge System. Untersuchungen hierüber liegen für den Menschen bisher nur unzureichend vor, so dass es nicht möglich ist, Risiken frühzeitig abzuschätzen.

In der vorliegenden Studie soll deshalb der Effekt eines Tauchganges unter Verwendung eines Drucklufttauchgerätes auf das sympathoadrenerge System untersucht werden. Zu diesem Zweck werden Tauchgänge mit Luft als Atemgas durchgeführt. Deren Auswirkungen auf das sympathoadrenerge System sollen verglichen werden mit Tauchgängen unter anderen Atemgaszusammensetzungen. Dies sind einerseits reiner Sauerstoff und andererseits ein Gasgemisch mit dem gleichen Sauerstoffanteil wie Luft, jedoch Helium anstelle von Stickstoff als Inertgas.

Auf diese Weise soll primär eine Antwort auf die folgenden Fragen gefunden werden:

- Welchen Einfluss hat ein Tauchgang mit Drucklufttauchgerät auf 44m Wassertiefe hinsichtlich der Aktivität des sympathoadrenergen Systems ?
- Korreliert die arterielle Katecholaminkonzentration als Maß der Aktivität des sympathoadrenergen Systems (Goldstandard) mit der gemessenen Herzfrequenzvariabilität ?

Weiterhin war es Zweck dieser Studie herauszufinden, ob

- die Aktivität des sympathoadrenergen Systems eine geeignete Messgröße zur Beurteilung der momentanen Tauchfähigkeit ist und ob sich diese durch Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität mittels eines telemetrischen Systems anzeigen lässt.

Aufgrund der geplanten Versuchsgestaltung werden zwangsläufig auch Aussagen darüber getroffen werden können, welchen Einfluss die Auswahl des Atemgases auf die Aktivität des sympathoadrenergen Systems bei Tauchgängen mit Atemgerät hat.

## 2. Methodik I (Grundlagen)

### 2.1. Bestimmung der sympathoadrenergen Aktivität

Methoden und Messgrößen zur Bestimmung der Sympathikusaktivität sind Mikroneurographie, Herzfrequenzvariabilität, Herzfrequenz sowie NoradrenalinKonzentrationen in Plasma, Urin und Thrombozyten. Die Messung der Plasmakonzentration von Noradrenalin ist die am häufigsten verwendete Messgröße. Wenn praktisch durchführbar, ist die Messung der Sympathikusaktivität via Mikroneurographie die Methode der Wahl.

#### **Mikroneurographie**

Mit dieser Methode ist es möglich, die efferente sympathische Aktivität durch Aufzeichnung der Aktionspotentiale in diesen peripheren Nerven direkt zu erfassen. Diese Methode liefert wertvolle Ergebnisse in Untersuchungen, in denen die Mikroelektrode in einem Sympathikusnerv erschütterungsfrei fixiert werden kann. Sie wurde in zahlreichen Studien genutzt, um die muskuläre Sympathikusaktivität bei Hypertonikern und nach verschiedensten Blutdruckmanipulationen zu untersuchen, um die renale Sympathikusaktivität zu bestimmen und um die Aktivierung der Haut-Sympathikusaktivität während unterschiedlicher Umgebungsbedingungen zu bestimmen [Wallin et al. 1988; Mark 1990; Miki et al. 1992]. Diese Methode wurde auch eingesetzt, um den Einfluss von Training in Ruhe und von statischer Muskelarbeit auf die Muskel-Sympathikus-Aktivität zu untersuchen [Seals 1991; Ray et al. 1993].

#### **Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität**

Eine erhöhte Sympathikusaktivität steigert die Herzfrequenz, so dass sie als Maß für die Sympathikusaktivierung diskutiert wird. Allerdings wird die Herzfrequenz auch durch die Aktivität des Parasympathikus beeinflusst, die sich während Belastung ändern kann [Yamamoto et al. 1992]. Zudem kommt es zu einer exponentiellen Aktivierung der Sympathikusaktivität bei intensiver Belastung, während die (zunächst linearen) Herzfrequenzanstiege unter diesen Belastungsbedingungen abnehmen. Aussagekräftiger für die Beurteilung der Sympathikusaktivität ist die niederfrequente Komponente der R-R Intervallvariabilität mittels Power-Spektralanalyse [Pomeranz et al. 1985], wie sie für Studien der autonomen Kontrolle des Herzens unter physiologischen und pathophysiologischen Bedingungen weit verbreitet ist [zur Übersicht siehe Malliani et al. 1991]. Die Anwendung dieser Methode unter dynamischer körperlicher Belastung hat jedoch kontroverse Ergebnisse erbracht. Neuere Untersuchungen kommen zu dem Schluss, dass diese Methode wenig geeignet ist, um die Sympathikusaktivität unter Belastung zu beurteilen, da insbesondere ein hoher nicht neuronaler Anteil (etwa 40%) ursächlich an der Herzfrequenzvariabilität unter Belastung beteiligt ist [zur Übersicht siehe Casadei et al. 1995].

### **Bestimmung von Noradrenalin aus venösem und arteriellem Blut**

Die am häufigsten verwendete Methode zur Beurteilung der Sympathikusaktivität unter körperlicher Belastung ist die Bestimmung von Noradrenalin aus venösem Blutplasma. Noradrenalin ist der postganglionäre Neurotransmitter des Sympathikus. Etwa 5 % des nach Sympathikusaktivierung in den synaptischen Spalt ausgeschütteten Noradrenalins gelangt ins Blut (Spillover) und macht dort 90 - 95 % der Plasma NoradrenalinKonzentration aus. Damit spiegelt sich eine erhöhte Sympathikusaktivierung in einer Erhöhung der Plasmakonzentration wider. Aufgrund der kurzen Plasmahalbwertszeit von Noradrenalin (1.5 - 3 min) [Peronnet et al. 1988] können durch wiederholte Messungen von Noradrenalin während des Untersuchungszeitraumes auch kurzfristige Änderungen der Sympathikusaktivität erfasst werden. Nachteil dieser Methode ist, dass die Plasmakonzentration die Differenz aus Noradrenalin-Spillover und -Clearance darstellt, so dass nur bei konstanter Clearance die gemessenen Veränderungen der Plasmakonzentration auf entsprechende Veränderungen der Sympathikusaktivität schließen ließen. Dies wird für Noradrenalin, zumindest für isometrische Belastungen, durch die signifikante Korrelation zwischen der mittels Mikroneurographie gemessenen muskulären Sympathikusaktivität und der venösen Plasmaspiegel von Noradrenalin vor und nach körperlicher Belastung unterstützt [Wallin et al. 1981]. Schwierigkeiten bei der Nutzung von Noradrenalin als Parameter zur Beurteilung der Sympathikusaktivität ergeben sich aus der kurzen Plasmahalbwertszeit des Noradrenalins. Zum einen kommt es dadurch zu einem schnellen Abfall der Plasmaspiegel nach Belastungsende, so dass für eine genaue Bestimmung der Plasmakonzentration von Noradrenalin idealerweise die Blutentnahme noch unmittelbar vor Belastungsende erfolgen sollte oder zumindest in hohem Maß standardisiert nach Belastungsende. Die Bestimmung der Katecholamine aus arteriellem Blut hat gegenüber der Bestimmung aus venösem Blut den Vorteil, dass letztere Werte lediglich eine Bilanz aus Sekretion und Clearance darstellen [Kjaer 1992].

### **Noradrenalin im Urin**

Die Bestimmung der NoradrenalinKonzentration aus dem der Belastung folgenden 24 h Urin oder aus der nächtlichen Urinausscheidung wird seit langem als Maß der Sympathikusaktivität und damit des Gesamtspillovers an Noradrenalin verwendet [Ostman et al. 1972]. Allerdings gibt es auch wesentliche Einwände gegen die Verwendung dieses Parameters. So wurden nach Belastungen im Rahmen eines vierwöchigen Trainings konträre Veränderungen beim Vergleich der Plasmakonzentration von Noradrenalin und der NoradrenalinKonzentration im nächtlichen Urin gefunden. Während die NoradrenalinKonzentrationen im Plasma nach identischer submaximaler Belastung in der vierten Trainingswoche höher sind als zu Beginn des Trainings, fällt die NoradrenalinKonzentration im nächtlichen Urin signifikant ab [Leh-

mann et al. 1992]. Zudem ist bekannt, dass die im Urin gemessene Noradrenalin-konzentration nicht nur aus dem Plasma, sondern zu einem wesentlichen Teil aus renalen Nerven stammt [Lappe et al.1982]. Hinzu kommen Verdünnungseffekte, wenn für die Beurteilung der Sympathikusaktivität während eines kurzen Untersuchungszeitraumes von z.B. 2 h die über Nacht ausgeschiedene Urinmenge oder der 24 h Urin herangezogen wird. Eine Entleerung der Blase vor und nach Beendigung des Untersuchungszeitraumes zur Beurteilung der Sympathikusaktivierung wäre sinnvoll, hat aber das Problem der praktischen Umsetzbarkeit. [Henry et al. 1979]

### **2.2. Spezielle taucherische Erwägungen**

Bei der überwiegenden Anzahl von Sporttauchern durchgeführten Tauchgängen wird Druckluft als Atemgas verwendet. Daher liegt es nahe, einen solchen Tauchgang zu untersuchen.

Sporttaucher führen üblicherweise ihren Atemluftvorrat in einem Druckbehälter mit sich. Mit steigender Tauchtiefe bewirkt dann die Erhöhung des Stickstoffpartialdruckes im Atemgas (in Abhängigkeit von der Dauer der Einwirkung) eine zunehmende Stickstoffnarkose. Unter der Bezeichnung "Tiefenrausch" ist dieses Phänomen in allen modernen Lehrbüchern für Berufs- und Hobbytaucher zu finden. Die Auswirkungen einer Stickstoffnarkose auf das sympathoadrenerge System sind jedoch bis heute in keiner Weise untersucht worden. Aus diesem Grunde können Auswirkungen einer Stickstoffnarkose auf das sympathoadrenerge System nicht ausgeschlossen werden.

Bei einem Tauchgang von NormalNull auf eine Wassertiefe von 50 Metern unter Verwendung eines Atemgerätes, in welchem ein Atemgasvorrat mitgeführt wird, ver-sechsfacht sich der Druck auf das Atemgas. Damit ver-sechsfachen sich auch die jeweiligen Partialdrücke der einzelnen Gasanteile. Dies bedeutet bei der Verwendung von Luft als Atemgas, dass der Sauerstoffpartialdruck von 0,21 bar auf 1,26 bar steigt, der Stickstoffpartialdruck von 0,78 bar auf 4,68 bar. Bei der **alleinigen** Betrachtung eines Tauchganges mit Luft als Atemgas kann daher nicht sichergestellt werden, dass die ermittelten Ergebnisse allein auf dem Einflussfaktor Tauchen beruhen. Vielmehr ist anzunehmen, dass sie durch den Einfluss der Atemgasbestandteile maßgeblich mitbestimmt werden.

Dem Tauchgang, welcher die Verwendung von Luft als Atemgas vorsieht und welchen wir untersuchen, wurden daher zwei zusätzliche Tauchgänge an die Seite gestellt. Zum ersten ein Tauchgang, bei welchem reiner, also medizinischer Sauerstoff als Atemgas verwendet wird. Und zum zweiten ein Tauchgang, bei dem der Stick-

stoff und Edelgasanteil in der Atemluft durch das Edelgas Helium ersetzt wird. Das derart zusammengemischte Atemgas enthält 21% Sauerstoff und 79% Helium. Ein solches Gasgemisch wird mit dem Kunstwort "Heliox" belegt, einer Kontraktion der Ausdrücke *Helium* und *Oxygen*. Entsprechend seines Sauerstoffanteiles heißt es "Heliox21". In dieser Studie kommt ausschließlich Heliox21 zum Einsatz, so dass es sich bei der Verwendung des Wortes Heliox im Zusammenhang mit dieser Studie immer nur um ein Helium-Sauerstoff-Gemisch mit einem Sauerstoffanteil von 21% handeln kann.

Aber auch wenn insgesamt drei Tauchgänge jeweils mit Sauerstoff, Luft und Heliox21 absolviert werden, wird im Nachhinein nicht zu unterscheiden sein, ob Änderungen der Sympathikusaktivität sich bereits durch einen Aufenthalt unter Wasser ergeben, oder sich erst bei einer erheblichen Wassertiefe einstellen.

Aus diesem Grunde ist es sinnvoll, statt jeweils einen Tauchgang mit jedem der vorgesehenen Atemgase durchzuführen, zwei Tauchgänge pro Atemgas zu absolvieren. Und zwar einen auf eine möglichst geringe, und einen weiteren auf eine möglichst große Wassertiefe. Diese beiden Tauchgänge werden im folgenden stets als "Submersionen" bezeichnet und in ein "Tauchprofil" eingebunden sein. Ein solches Tauchprofil stellt einen Ablaufplan dar, welcher neben den beiden Submersionen auch sämtliche für den Studienablauf relevanten Handlungen der Probanden und Wissenschaftler angibt. Einschließlich der Zeitpunkte, zu denen Blutabnahmen vorgenommen oder die Herzfrequenzvariabilität untersucht werden.

Die erste Submersion soll in einer möglichst geringen Wassertiefe stattfinden, dennoch müssen die Probanden vollständig untergetaucht sein. Bei mitteleuropäischen Tauchern in aufrechter Haltung werden sich in diesem Fall die Fußsohlen in etwa zwei Metern Wassertiefe befinden. Die Tauchtiefe der ersten Submersionen wird daher auf zwei Meter festgelegt.

Die Tauchtiefe der zweiten Submersion sollte sich an den mit einem autonomen Leichttauchgerät unter Verwendung von Luft als Atemgas üblicherweise erreichbaren Wassertiefen orientieren. Weil für Berufstaucher die maximal zulässige Tauchtiefe in Deutschland 50 Meter beträgt, wäre diese Tiefe vom zu betreibenden Aufwand und unter ethischen Gesichtspunkten eine vernünftige Wahl für die zweite Luft- und auch Helioxsubmersion. Anders hingegen beim Sauerstoff. Hier liegt nach allgemein anerkanntem tauchmedizinischen Standard der maximal zulässige Sauerstoffpartialdruck bei 2,8 bar<sub>absolut</sub> und dieser wird bei einem Sauerstoffanteil von 100% im Atemgas bereits in einer Wassertiefe von 18 Metern erreicht. Die zweite Submersion mit Sauerstoff wird daher ebenfalls in zwei Metern Wassertiefe durchgeführt. Die während beider Submersionen an den Probanden ermittelten Messwerte sollen mit den

Messwerten verglichen werden, die bei den Submersionen mit Luft als Atemgas festgestellt wurden. Bei den Submersionen mit Sauerstoff als Atemgas befindet sich der Volumenschwerpunkt der Probanden in ungefähr einem Meter Wassertiefe. Damit sind sie einem Sauerstoffpartialdruck von 1,1 bar<sub>absolut</sub> ausgesetzt. Um hinreichend genau diesen Sauerstoffpartialdruck bei einem Tauchgang mit Luft als Atemgas auf die Lunge einwirken zu lassen, müssten sie sich in etwa 43 Metern Wassertiefe befinden. Luft enthält 21% Sauerstoff, multipliziert mit dem in dieser Tauchtiefe herrschenden Druck von 5,3 bar<sub>absolut</sub> ergibt einen Sauerstoffpartialdruck von 1,113 bar im Atemgas. Bei aufrechter Stellung des Probanden im Wasser befinden sich dann seine Fußsohlen in 44m Wassertiefe. Daher wird die Tiefe der zweiten Submersion mit Luft als Atemgas auf 44m festgesetzt. Gleiches gilt sinngemäß für die zweite Helioxsubmersion. Auch mit Heliox21 ist diese Tiefe mit vertretbarem Aufwand erreichbar, und aufgrund des gleichen Sauerstoffanteiles ist die zweite Helioxsubmersion dann sowohl mit den Luft- als auch mit den Sauerstoffsubmersionen vergleichbar.

In der folgenden Tabelle soll dieser Zusammenhang verdeutlicht werden. Dabei ist zu beachten, dass dort nicht der jeweils in einer Tauchtiefe herrschende Umgebungs- oder Partialdruck zu finden ist, sondern das Druckniveau, auf dem sich der Volumenschwerpunkt des Tauchers befindet. Dieses Druckniveau sollte in etwa dem Mittelwert desjenigen Druckes entsprechen, dem der gesamte Körper des Tauchers ausgesetzt ist.

	Atemgas Zusammensetzung	Maximale Tauchtiefe relevanter Umgebungsdruck	pO <sub>2</sub> relevanter O <sub>2</sub> Partialdruck
Tauchprofil I	Medizinischer Sauerstoff (100% O <sub>2</sub> )	2 Meter (P = 1,1 bar <sub>absolut</sub> )	1,100 bar
Tauchprofil II	Luft (21% O <sub>2</sub> & 78% N <sub>2</sub> & 1% Rest)	44 Meter (P = 5,3 bar <sub>absolut</sub> )	1,113 bar
Tauchprofil III	Heliox21 (21% O <sub>2</sub> & 79% He)	44 Meter (P = 5,3 bar <sub>absolut</sub> )	1,113 bar

**Tabelle 2.1: Atemgaspartialdrücke der Tauchprofile**

Weiterhin sollte die zeitliche Dauer aller Submersionen identisch sein, um die ermittelten Messwerte problemlos vergleichen zu können. Zur Tauchzeitberechnung wird eine Austauschabelle herangezogen, deren Verwendung im beruflichen Tauchen deutschlandweit vorgeschrieben ist [BGV C 23, 2001(a)]. Aus ihr ergibt sich eine zeitliche Begrenzung für die zweite Submersion auf 44m mit Luft. Hier schreibt die Austauschabelle vor, dass bei einem Tauchgang mit einer Maximaltiefe von 44m die

Tauchzeit vom Verlassen der Oberfläche bis zum Beginn des Austauschens 35 Minuten nicht überschreiten darf. Die Tabelle enthält alle Austauschzeiten für 44m Tauchgänge von bis zu 60 Minuten Dauer, aber diese Werte sind ausschließlich für den Notfall gedacht und dürfen im Normalfall nicht erreicht werden.

Bei den mit Druck beaufschlagten Submersionen in der Tauchturmanlage wird für die Tauchzeitberechnung bereits der Anfang der Druckbeaufschlagung als Beginn des Tauchganges gewertet und vor dem Beginn des Austauschens muss die Submersion der Probanden beendet sein, weil sonst kein ausreichender Blick- und Hörkontakt besteht. Daher wird die Dauer aller Submersionen einheitlich auf 15 Minuten festgelegt.

Das Resultat der angestellten Überlegungen sind somit drei Tauchprofile mit je zwei Submersionen von je 15 Minuten Dauer:

**Tauchprofil I mit Sauerstoff (100% O<sub>2</sub>) als Atemgas und 2 m Maximaltiefe,**

**Tauchprofil II mit Luft (21% O<sub>2</sub> & 78% N<sub>2</sub> & 1%) als Atemgas und 44m Maximaltiefe,**

**Tauchprofil III mit Heliox21 (21% O<sub>2</sub> & 79% He) als Atemgas und 44m Maximaltiefe**

Durch diese drei Tauchprofile ist eine Spezifizierung der Einflussgrößen Atemgas, Untertauchen und Tauchtiefe hinreichend sichergestellt.

### **2.3. Technische Aspekte**

Jedes einzelne der drei erarbeiteten Tauchprofile bedingt einen erheblichen technischen Aufwand. Dieser steigt beträchtlich, wenn alle Tauchprofile mit autonomen oder schlauchversorgten Leichttauchgeräten im Freiwasser von einer schwimmenden Anlage aus durchgeführt werden. Eine exakte, stetige Reproduzierbarkeit der Tauchprofile ist im Meer oder einem Binnensee nur schwer gegeben. Der Einsatz einer mobilen Tieftauchanlage mit Taucher-Dekompressionskammer und Taucher-Transferkammer (Bell) übersteigt die Kapazitäten des Institutes für Sportmedizin der Freien Universität Berlin.

Sinnvoll wäre daher die Durchführung der Studie in einem Tieftauchsimulator. Auch die Sicherheit für die tauchenden Probanden, Ärzte und Wissenschaftler ist in einer solchen Anlage besser zu gewährleisten. Daher gilt es, einen vorhandenen Tieftauchsimulator zu finden, der für die Durchführung dieser Studie geeignet ist oder mit vertretbarem Aufwand umgerüstet werden kann.

In Deutschland waren es einmal vier Forschungseinrichtungen, die für bemannte Einsätze über Tieftauchsimulatoren verfügten, welche diesen Namen auch wirklich verdienen. Sie stellten einmal die wesentlichen Standbeine der deutschen Unter-

wasserforschung dar, mit exzellenter wissenschaftlicher Reputation auf internationaler Ebene.

### **HYDRA 2000**

Den modernsten deutschen Tieftauchsimulator mit dem Namen HYDRA 2000 besitzt das Schiffahrtsmedizinische Institut der Deutschen Bundesmarine in Kiel-Kronshagen. HYDRA 2000 wurde im Jahre 1990 fertig gestellt und ersetzte eine Druckkammeranlage aus dem Jahr 1961, welche damals sowohl für Untersuchungen in Überdruck als auch in Unterdruck konstruiert war.

HYDRA 2000 besteht aus je einer Simulations- Therapie- und Diagnostikkammer. Der maximal zulässige Betriebsdruck für die beiden letztgenannten beträgt 20 bar, für die Simulationskammer liegt er bei 10 bar. Die Planungen für das Kammer-System der HYDRA 2000 lassen sich bis in das Jahr 1970 zurückverfolgen [Haux, GFK 1997]. Damals veröffentlichte Gerhard F. K. Haux, zu diesem Zeitpunkt Oberingenieur der Drägerwerke in Lübeck, in seinem Buch Tauchtechnik II das Photo des Modells einer "für die Bundesmarine bestimmten Anlage" [Haux, GFK 1970]. Bemerkenswert daran erscheinen auch die in der Bildbeschreibung genannten Betriebsdrücke von etwa 25 bar bzw. 50 bar, damals noch in  $\text{kp/cm}^2$  angegeben.

Die Therapiekammer der HYDRA 2000 ist für intensivmedizinische Behandlungen konzipiert. In der Diagnostikkammer werden Tauglichkeitsuntersuchungen für Marineangehörige durchgeführt. Diese kann auch für simulierte Tauchgänge in Wasser nach dem Buffalo-Prinzip genutzt werden. Dabei wird durch zwei Trennwände die Kammer in einen trockenen Vorraum und einen Tauchbereich unterteilt [Petersen, K 2002 (a)].

HYDRA 2000 wird von der Deutschen Bundesmarine zur Sicherstellung ihres Verteidigungsauftrages betrieben. Forschungen, die anderen Zwecken dienen, müssten sich so gestalten, dass die Hauptaufgaben nicht durch sie beeinträchtigt werden.

### **GUSI**

In der Nähe von Hamburg liegt das GKSS-Forschungszentrum. Es ist hervorgegangen aus der "Gesellschaft für Kernernergie in Schiffbau und Schiffahrt" und verfügt seit 1983 über den Geesthachter Unterwasser Simulator, kurz GUSI genannt. Diese aus acht Kammern bestehende Anlage war für bemannte Tauchgänge bis auf 600m Wassertiefe ausgelegt. Unbemannt konnten 1000 m erreicht werden. Die größte Kammer des Systems war sogar in der Lage, kleine U-Boote für Testzwecke aufzunehmen [GKSS 1981]. Die Anlage wurde betrieben von 1983 bis 1993. Dabei wurden 21 bemannte Tieftauchgänge bis in eine maximale Tiefe 600 m durchgeführt [Plate, C 1998]. Nach ihrer Außerbetriebnahme 1993 [GKSS 2006] wurde die Anlage stückweise demontiert und in Teilen veräußert. Bei einem Besuch der Anlage im



Jahre 2000 musste der Verfasser erkennen, dass Forschungstauchgänge in der Art, wie in dieser Studie geplant, dort, wo früher einmal die GUSI stand, nicht mehr möglich sind.

### **TITAN**

Diese Bezeichnung ist ein Akronym für eine stationär fest montierte Tieftauchanlage. Diese steht in Köln-Porz bei der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, kurz DLR. Dass es dort ein "Institut für Unterwassermedizin" gibt, hat historische Gründe. In einem Flugzeug ohne Druckkabine nimmt der auf die Insassen wirkende Umgebungsdruck mit steigender Flughöhe kontinuierlich ab. Die im menschlichen Körper gelösten Inertgase können dabei Probleme verursachen. Genau der gleiche physiologische Vorgang ist bei Tauchern zu beobachten, die sich nach einem längeren Aufenthalt unter Wasser in der Austauschphase befinden. Die TITAN besteht aus einer Wohnkammer, einer Transferkammer (Bell) und einem Wasserbehälter. Die Transferkammer, mit der die Taucher bei Seeinsätzen von der Wohnkammer an ihre Arbeitsstelle unter Wasser und wieder zurück gebracht werden, ist bei der TITAN fest an die Wohnkammer montiert. An der Unterseite der Transferkammer befindet sich ein vier Meter tiefer, druckfester Wasserbehälter. Er ist ebenfalls fest montiert. In diesem wird unter ähnlichen Bedingungen wie bei einem Seeinsatz getaucht [Haux, GFK 1982(a)]. Der bis heute vorerst letzte Sättigungstauchgang hat dort im Mai 1990 unter Verwendung von Heliox bis auf eine Tauchtiefe von 615 Metern stattgefunden [Weist 1998(a)].

Da schon vor langer Zeit in Deutschland die Zuwendungen des deutschen Bundesministeriums für Forschung und Technologie an die Unterwasserforschung stark reduziert worden sind, wird die TITAN in jüngerer Zeit als Unterdruckkammer für Forschungen an Sauerstoffatemmasken zum Einsatz auf zivilen Langstreckenflügen oder für Langzeit-Isolationsstudien genutzt.

Von der Aufgabenstellung her wurden in der GUSI eher die technischen Aspekte der Taucherei erforscht, in der TITAN mehr die medizinischen, auch wenn sich beide nicht streng von einander trennen lassen, da bei bemannten Tauchgängen stets Mensch und Technik zum Einsatz kommen [Petersen, K 2002(b)], [Weist 1998(b)].

Vor der Fertigstellung der beiden letztgenannten Anlagen wurden wissenschaftliche Tieftauchkampagnen von DLR und GKSS unter anderem in einem Tauchturm der Deutschen Lebens-Rettungs-Gesellschaft (DLRG) in Berlin-Spandau durchgeführt.

### **Tauchturm**

Dieser Tauchturm ist ein begehbare, teilweise mit Wasser gefülltes Druckkammersystem, welches sich über vier Geschosse des Siegfried-John-Hauses der DLRG in Berlin-Spandau erstreckt. In diesem Gebäude, welches bei der Inbetriebnahme des

Tauchturmes im Jahre 1973 noch "Bundes- Lehr- und Forschungsstätte" hieß, können simulierte Tauchgänge bis zu einer Wassertiefe von 158 Metern durchgeführt werden [Haux, GFK 1982(b)]. Auch für eine erste Notfallbehandlung von schweren Tauchunfällen durch Therapeutische Kompressionen ist die Anlage geeignet [John, Siegfried 1986]. Regelmäßig genutzt wird der Tauchturm zur Aus- und Weiterbildung von Berufs- und Sporttauchern bis zu einer Wassertiefe von 50 Metern. In wie weit diese Anlage zur Durchführung der geplanten Tauchprofile geeignet ist, wurde im Rahmen der Vorbereitung zu dieser Studie eingehend überprüft.

### **2.4. Personelle Gesichtspunkte**

Aus Gründen der statistischen Auswertbarkeit mußten mindestens 12, besser 16 Probanden an der Studie teilnehmen. Wobei maximal 4 Probanden gleichzeitig ein Tauchprofil durchlaufen konnten. Jedes Tauchprofil beinhaltete 2 Submersionen und 6 Blutentnahmen. Bei diesem Studenumfang durfte ohne Übertreibung von einer Tauchkampagne gesprochen werden, für deren Durchführung neben den Probanden an jedem Studientag etwa 10 weitere hochqualifizierte Mitarbeiter zur Verfügung stehen mußten. Die Bereitstellung dieses Personenkreises für insgesamt 9 bis 12 Tauchprofile von jeweils 70 bis 140 Minuten Dauer plus jeweils einer Stunde Vor- und Nachbereitung war durch das Institut für Sportmedizin der Freien Universität Berlin nicht finanzierbar. Eine kostenneutrale Unterstützung durch hauptamtliche Kräfte uniformierter Verbände (z. B. Polizei, Feuerwehr) war aufgrund der prekären Finanzlage des Landes Berlin nicht vertretbar. Hilfe kam durch die DLRG, deren Mitarbeiter/innen ausschließlich ehrenamtlich arbeiten und einen exzellenten Ausbildungsstand aufweisen. So verfügt die DLRG in Berlin und Potsdam über mehr als 80 für das Tauchen in Hilfeleistungsunternehmen geschulte Rettungstaucher, welche die hohen Ansprüche an die Probanden dieser Studie erfüllten und durch ständige Übungen und Einsatz darüber hinaus die notwendige Fitness und Routine mitbringen würden. Auch das Bedienpersonal der Tauchturmanlage, erfahrene und zugleich tauchtaugliche Anästhesisten für die arterielle Punktion, tauchtaugliche Sanitäter zu deren Unterstützung, wissenschaftliche Protokollführer und Boten, ja selbst der Küchenservice wurde an allen Studientagen ausschließlich durch ehrenamtliche DLRG-Kräfte sichergestellt.

Durch diese besondere Art von Kooperation zwischen dem Institut für Sportmedizin der Freien Universität Berlin und der Deutschen Lebens-Rettungs-Gesellschaft konnte die Tauchkampagne mit hohem Personal, dafür aber geringstem Kostenaufwand verwirklicht werden.

3. **Technische Arbeiten** (Durchführung des Konstruktionsprozesses)

3.1. **Stand der vorhandenen technischen Gegebenheiten**

(Beschreibung der Tauchturmanlage)

Für das begehbare, teilweise mit Wasser gefüllte Druckkammersystem der Deutschen Lebens-Rettungs-Gesellschaft (DLRG), welches sich über vier Geschosse des Siegfried-John-Hauses in Berlin-Spandau erstreckt, ist die Bezeichnung **Tauchturm** gebräuchlich.

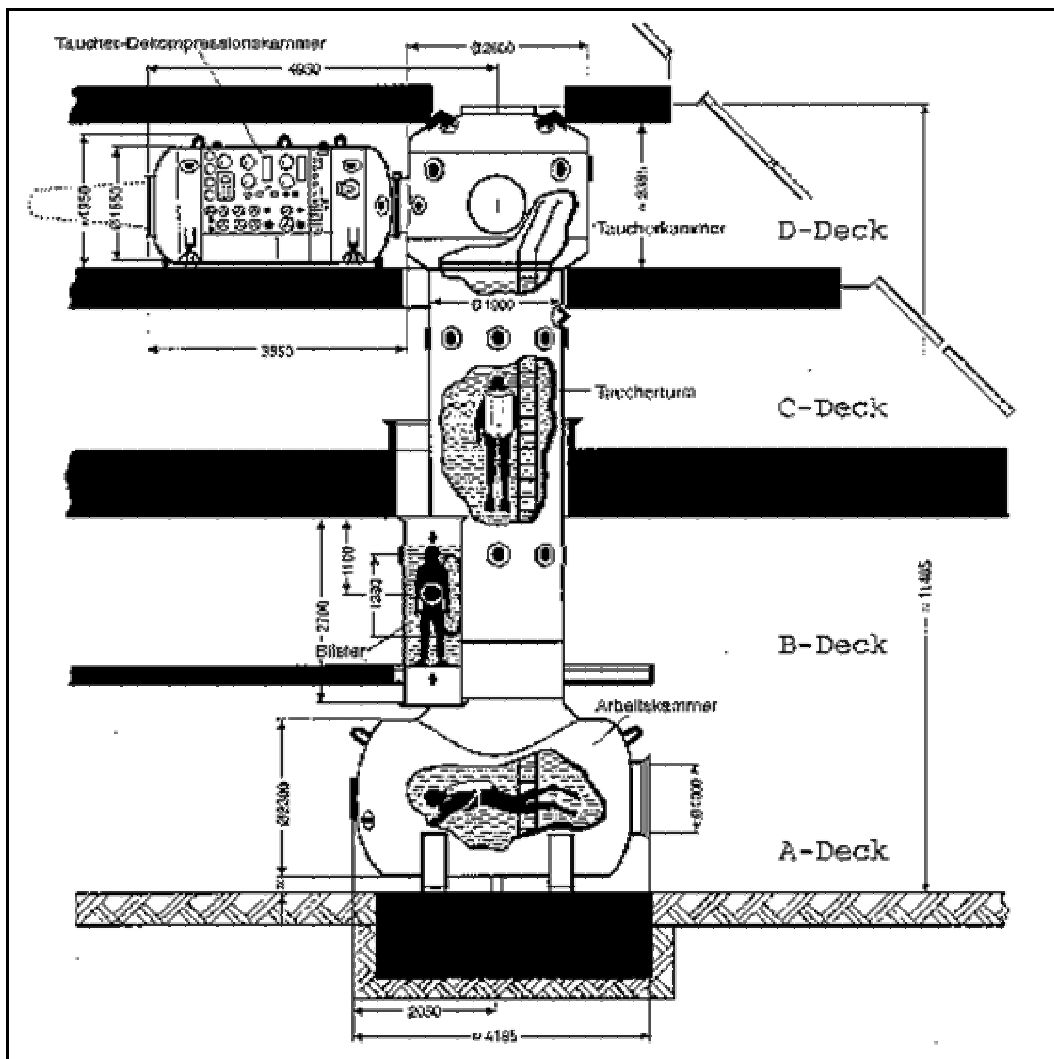


Bild 3.1: Übersichtsskizze Tauchturm

Der **Tauchturm** besteht aus

- den mit Wasser gefüllten Kammern des Nassteiles (Arbeitskammer und Taucherturm mit einer acht Meter hohen Wassersäule),

- den nur für Gasbetrieb vorgesehenen Kammern des Trockenteiles (Taucherdekompressionskammer und Taucherturmkammer),
- der Druckgaserzeugungsanlage,
- der Wasseraufbereitung
- und zwei internen Maskenatmungssystemen.

Der Gesamtrauminhalt der Tauchturmanlage teilt sich wie folgt auf:

Taucher-Dekompressionskammer mit Personenschleuse/Vorkammer:	6,70 m <sup>3</sup>
Tauchturm einschließlich Taucherturmkammer und Arbeitskammer:	44,45 m <sup>3</sup>
Gesamtrauminhalt der Tauchturmanlage:	<u>51,15 m<sup>3</sup></u>
Davon statisches Wasservolumen im Tauchturm:	31,00 m <sup>3</sup>

Die im Tauchturm und der Arbeitskammer befindliche statische Wassersäule von 8,3 m Ausdehnung in vertikaler Richtung bei 1,9 m horizontalem Mindestdurchmesser erlaubt Tauchgänge und Nassversuche im drucklosen Zustand bis in eine Tauchtiefe von 8,0 Metern.

Für bemannte Trockentauchgänge bzw. technische Überdruckexpositionen mit bis zu sechs Personen stehen die Taucherdekompressionskammer und die Taucherturmkammer bis zu einem Betriebsdruck von 15 bar, entsprechend einer Wassertiefe von 150 Metern, zur Verfügung. Bemannte Nasstauchgänge bzw. technische Geräteüberprüfungen unter Wasser sind in Tauchturm und Arbeitskammer im druckbeaufschlagten Zustand bis zu einer Wassertiefe von 158 m möglich, wenn zusätzlich die statische Wassersäule voll ausgenutzt wird.

An Taucherdekompressionskammer und Taucherturmkammer befindet sich je eine Versorgungsschleuse, um Gegenstände in den Tauchturm hinein- oder aus ihm herauszuschleusen. Der nutzbare zylindrische Versorgungsschleuseninnenraum hat einen Durchmesser von 200 mm, und eine Länge von 300 mm. Auf der Tauchturminnenseite wird die Versorgungsschleuse durch eine druckseitig anliegende flache Tür mit Vorreiber verschlossen. Die Außentür der Versorgungsschleuse ist als Bajonett-Schnellverschluss ausgelegt. Als Armaturen für die Bedienung sind tauchturminnenseitig ein Handventil für den Druckausgleich und ein selbsttätiges Überdruckventil eingebaut. Tauchturmaußenseitig ist ein Manometer zum Ablesen des in der Versorgungsschleuse herrschenden Druckes angebracht. Von außen kann der Druckausgleich über ein Auslassventil gesteuert werden.

Der Druckaufbau innerhalb der Tauchturmanlage erfolgt über eine Erhöhung der Gasatmosphäre. Hierzu wird Luft auf 200 bar komprimiert und kann aus Vorratsbehältern oder Kompressoren über einen Druckminderer in Haupt- oder Turmkammer strömen.

Die Zufuhr der komprimierten Luft erfolgt über Hochdruckleitungen aus einem Anbau des Gebäudes. In diesem "Gaslager" befinden neben dem Luftvorrat, bestehend aus 40 Stahlflaschen mit einem Volumen von 50 Litern und einem maximalen Betriebsdruck von 200 bar, auch zwei Kompressoren mit einer Luftlieferleistung von 400 Litern pro Minute bei 200 bar und ein Kompressor mit 800 Litern pro Minute bei 200 bar.

**Durch die regelmäßigen Überprüfungen des TÜV-Berlin und zwei umfangreiche Ausbaustufen wurde die Anlage zeitgemäßen Sicherheitsanforderungen angepasst.**

Weiterhin wurden bei der zweiten Ausbaustufe auch zwei voneinander unabhängige Systeme zur Atemgasversorgung der Tauchturminsassen über Atemmasken im trockenen Teil des Tauchturmes (Hauptkammer und Turmkammer) installiert. Als Sammelbegriff für diese Art von Anlagen in Druckkammern und Tieftauchanlagen ist die angloamerikanische Abkürzung BIBS (Buildt-In-Breathing-System) gebräuchlich.

Das eine der beiden Buildt-In-Breathing-Systeme besteht aus sechs Sauerstoff-Atemstellen in der Hauptkammer. Im vorliegenden Text wird es stets als Sauerstoffatemanlage bezeichnet. Die **Sauerstoffatemanlage** dient ausschließlich dem Atmen von reinem Sauerstoff. Sie wird für Notfälle, die oft eine Sauerstoffatmung als Therapiemaßnahme vorsehen, stets betriebsbereit gehalten. Darüber hinaus kann bei dekompensionspflichtigen Tauchgängen eine Sauerstoffatmung dazu dienen, Tauchunfällen durch Stickstoffembolien vorzubeugen oder die Austauschzeiten zu verkürzen. Das andere der beiden Buildt-In-Breathing-Systeme ist aufgebaut aus Entnahmestellen, die über den gesamten Trockenbereich der Tauchturmanlage verteilt sind. An diese Entnahmestellen können über Schnellkupplungen schlauchversorgte Atemregler angeschlossen werden, welche im üblichen Tauchturmbetrieb sich nicht innerhalb der Anlage befinden.

Dieses System wird, um Verwechslungen mit der Sauerstoffatemanlage auszuschließen, im vorliegenden Text stets als **Atemregleranlage** bezeichnet. Es erstreckt sich über den gesamten Trockenbereich der Tauchturmanlage und hält Entnahmestellen für schlauchversorgte Atemregler in Vorkammer, Hauptkammer und Turmkammer bereit. Mit dieser Atemregleranlage kann über schlauchversorgte Atemregler jedes beliebige Atemgas bereitgestellt werden. Der Atemgasvorrat befindet sich in auswechselbaren 50-Liter-Stahlflaschen in einem Anbau außerhalb des Hauses.

Die Atemregleranlage kann bis zu 6 Tauchturminsassen gleichzeitig über Masken mit Atemgas versorgen. So kann der für die Tauchtiefe erforderliche Tauchturminnendruck mit Luft aufgebaut werden, während die Tauchturminsassen spezielle

Gasgemische (Heliox, Trimix) atmen, ohne dass dafür jede Person ein Tauchgerät mit sich führen muss. Die ausreichende Länge der Atemgasschläuche und mehrere über den Trockenteil des Tauchturmes verteilte Atemgasentnahmestellen sorgen für eine ausreichende Bewegungsfreiheit.

### **3.2. Konstruktionsaufgabe (technische Aufgabenstellung)**

#### **3.2.1. Zielsetzung**

Ziel ist es, mit drei Atemgasen (Sauerstoff, Luft, Heliox21) drei Tauchprofile in Wassertiefen von 0m bis 44m Wassertiefe zu absolvieren und dabei zu sechs Zeitpunkten (vor, nach und während der Submersion) von den Tauchern arterielles Blut zu entnehmen und es innerhalb von maximal fünf Minuten in einer Kühlzentrifuge weiterzuverarbeiten.

Der gesamte Versuchsablauf soll möglichst mit vorhandenen Forschungsanlagen bewältigt werden. Dazu sollen die bei der FU und der DLRG vorhandenen technischen, medizinischen und laboralen Einrichtungen hinsichtlich ihrer Verwendungsfähigkeit betrachtet und dergestalt modifiziert werden, dass die gestellte Aufgabe unter Benutzung bereits bestehender, gegebenenfalls für diesen Zweck umgebauter Forschungsanlagen, bewältigt werden kann.

#### **3.2.2. Anforderungen an die konstruktive Lösung (Lastenheft)**

Hinsichtlich der haftungsrechtlichen und moralischen Verantwortung und der Wertbarkeit der medizinischen Ergebnisse lassen sich gewisse Anforderungen an die technische Ausstattung und Infrastruktur der Versuchsanlage formulieren. Diese Anforderungsliste, auch Lastenheft genannt, dient unter anderem dazu, verschiedene mögliche Lösungsvarianten hinsichtlich ihrer Verwendungsfähigkeit qualitativ zu beurteilen. Sämtliche Anforderungen werden gemäß der Notwendigkeit ihrer Erfüllung in eine von drei Anforderungskategorien eingeteilt:

##### Ausschlusskriterium

- Forderung  $\Leftrightarrow$  unabdingbare Forderung, deren Nichterfüllen ein Ausschlusskriterium für die geprüfte Lösungsvariante darstellt,
- Wunsch  $\Leftrightarrow$  Wunsch, dessen Erfüllung Kosten oder Arbeitsleistungen einspart,

- Möglichkeit ⇔ Möglichkeit oder Option, deren Vorhandensein eine erhöhte Bequemlichkeit oder Kosteneinsparungen zur Folge hat.

Die auf diese Weise klassifizierten Anforderungen werden beurteilt und mit einem der folgenden Bewertungsprädikate versehen, je nachdem ob die

Anforderung

- voll erfüllt
- überwiegend erfüllt
- ansatzweise erfüllt
- nicht erfüllt

wurde. Dabei ist zu beachten, dass die Bewertung *"nicht erfüllt"* bei einer *"Forderung"* als Ausschlusskriterium für die zu prüfende Lösungsvariante gewertet wird.

<u>Anforderung 1</u>		Gewichtung: <b>Forderung</b>
<b>Tauchersicherheit</b>		
Als zwingend einzuhaltende Forderung steht die Sicherheit, Gesundheit und körperliche Unversehrtheit der Taucher und Projektmitarbeiter an erster Stelle. Einschließlich professionellem Notfallmanagement durch erfahrenes Personal und jederzeit einsetzbarer, weil ständig vorgehaltener Diagnose- und Medizintechnik.		
Beurteilung: Durch die über 25jährige Erfahrung in wissenschaftlichen Tauchversuchen und Studien, über welche die ehrenamtlichen Mitarbeiter der DLRG-Berlin verfügen, stellt die besten aller denkbaren Voraussetzungen für eine größtmögliche Sicherheit der eingesetzten Taucher dar. Aufgrund der zeitlichen Terminierung der Studie in den Sommermonaten und die örtliche Positionierung der Einsatzleitstelle des Wasserrettungsdienstes der DLRG-Berlin im Siegfried-John-Haus, in welchem sich die Tauchturmanlage befindet, steht bestes Personal und neueste Notfallmedizintechnik im Hause bereit.		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>

<u>Anforderung 2</u>		Gewichtung: <b>Forderung</b>
<b>Submersion</b>		
Die Taucher sollen sich während des Versuchsablaufes tatsächlich im Zustand einer Submersion befinden, eine Immersion oder eine reine Druckexposition unter Immersionsbedingungen allein genügen nicht.		
Beurteilung: In der im Tauchturm vorhandenen statischen Wassersäule von 8 m mit einem Mindestdurchmesser von 1,9 m ist ein Untertauchen auch mehrerer Personen sowohl mit als auch ohne Druckbeaufschlagung stets möglich.		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>

### 3. Technische Arbeiten

Anforderung 3		Gewichtung: <b>Forderung</b>
<b>Multiple arterielle Blutentnahme</b>		
Eine Entnahme arteriellen Blutes der Taucher soll mehrfach während der Submersion auch in großer Wassertiefe (44m Wassersäulenäquivalent) möglich sein.		
Beurteilung: Sofern der Taucher über eine dauerhafte arterielle Kanüle am Handgelenk verfügt, besteht die Möglichkeit einer mehrfachen Blutentnahme über einen Drei-Wege-Hahn durch auswechselbare Einwegspritzen.		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>

Anforderung 4		Gewichtung: <b>Forderung</b>
<b>Blutprobenqualität (thermischer Aspekt)</b>		
Die Blutproben müssen das Labor in verwertbarer & auswertbarer Qualität erreichen. Dies setzt eine Kühlung derselben in Eiswasser ohne Unterbrechung der Kühlkette voraus. Weiterhin darf keine Hämolyse vorliegen und die Dekompression muss moderat, ohne ein Sprudeln des Blutes bewirkt zu haben, erfolgt sein. Eine Dekompression zusammen mit den Tauchern, welche mindestens eine Zeit von 30 Minuten in Anspruch nehmen würde, ist nicht möglich. Siehe auch Anforderung 5, Blutprobenqualität (temporaler Aspekt)		
Beurteilung: Eine Kühlung der entnommenen Blutproben kann bereits in der Taucherturmkammer durch ein Eiswasserbad erfolgen. Zusammen mit diesem Eiswasserbad können die Blutproben anschließend über die Versorgungsschleuse aus dem Taucherturm herausgebracht werden. Der Ausschleusungsvorgang lässt sich über ein handbetätigtes Ventil (Handrad) gefühlvoll steuern.		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>

Anforderung 5		Gewichtung: <b>Forderung</b>
<b>Blutprobenqualität (temporaler Aspekt)</b>		
Die Blutproben müssen eine Kühlzentrifuge und damit das Labor innerhalb von maximal fünf Minuten erreichen, wegen der kurzen Halbwertszeit der im arteriellen Blut zu findenden Katecholamine.		
Beurteilung: Ein provisorisches Labor kann in unmittelbarer Nähe, nämlich in der Etage unter dem Taucherturmausstieg errichtet werden. Der Fußweg von der Versorgungsschleuse des Tauchturms bis dorthin ist in weniger als zwei Minuten bequem zu bewältigen.		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>

Anforderung 6		Gewichtung: <b>Forderung</b>
<b>Schockfrost</b>		
Das Einfrieren der zentrifugierten Blutproben bei $-10^{\circ}$ Celsius muss innerhalb von 60 Minuten nach dem Verlassen der Zentrifuge/Pipettieren gewährleistet sein.		
Beurteilung: Da die Blutproben bereits pipettiert und somit keimfrei sind, steht einer Lagerung in Gefrierschränken der Material- und Versorgungsstelle des Wasserrettungsdienstes der DLRG-Berlin nichts im Wege. Diese befindet sich im selben Haus wie der Taucherturm.		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>



### 3. Technische Arbeiten

Anforderung 7		Gewichtung: <b>Forderung</b>
<b>Atemgasapplikation</b>		
Es muss möglich sein, dem Taucher über den gesamten Ablauf jedes einzelnen Tauchprofils, also auch unter normobaren Bedingungen, das avisierte Atemgas (Sauerstoff, Luft oder Heliox21) zu verabreichen.		
Beurteilung: Eine Zuführung jedes gewünschten Atemgases ist praktisch jeder Zeit möglich, da die lungenautomatische Steuerung der Atemregleranlage sowohl über Wasser als auch auf jeder im Tauchturm zu simulierenden Wassertiefe funktioniert. Die Einatmung ist jederzeit gewährleistet.		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>
Anforderung 8		Gewichtung: <b>Forderung</b>
<b>Abgase</b>		
Das von den Tauchern ausgeatmete Atemgas (Sauerstoff, Luft oder Heliox21) darf zu keiner Zeit in die von ihnen oder anderen Personen geatmete Atmosphäre gelangen und diese verändern.		
Beurteilung: Das Overboard-Dumping-System des Tauchturmes benötigt eine Mindesttauchtiefe bzw. eine Mindestdruckbeaufschlagung auf den Tauchturm von 3 m bzw. 0,3 bar um einen vertretbaren Ausatemwiderstand zu gewährleisten. Liegen diese Bedingungen nicht vor, führt ein Anatmen gegen diesen Ausatemwiderstand zu gefährlichen Lungenschädigungen beim Taucher. Ein Ausatmen in die Umgebung (z. B. wenn sich die Lippen nicht stark genug an das Mundstück des Atemreglers pressen) verändert die Zusammensetzung der den Taucher umgebenden Atmosphäre, und kann diese im schlimmsten Fall vergiften. <b>Ausschlusskriterium nicht bestanden !</b>		
		Wertung: <b>Nicht erfüllt</b>
Anforderung 9		Gewichtung: <b>Wunsch</b>
<b>Atemgasumrüstzeiten</b>		
Die Umrüstzeiten auf ein anderes Atemgas (Sauerstoff, Luft oder Heliox21) sollten kurz sein.		
Beurteilung: Es können ständig drei verschiedene Atemgase mit jeweils drei 50 Liter / 200 bar Stahlflaschen in Bereitschaft gehalten werden. Ein Umschalten ist durch das einfache Betätigen von maximal drei Ventilen möglich. Sofern mehr als 10 000 barLiter eines Atemgases am Profil benötigt werden, können die Stahlflaschen durch eine dafür extra eingewiesene Person von Hand ausgewechselt werden.		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>

### 3. Technische Arbeiten

Anforderung 10		Gewichtung: <b>Wunsch</b>
<b>Stressfaktorenelimination</b>		
<p>Untersucht werden soll der Einfluss von Submersion, Tauchtiefe/Umgebungsdruck und Atemgas auf die Stresshormonausschüttung der Taucher. Andere Einflüsse oder Stressfaktoren sollen so weit als möglich eliminiert werden. Dazu gehören Kälte, Dunkelheit, körperliche Belastung/Anstrengung.</p>		
<p>Beurteilung:</p>		
<p>Im Tauchturm kann die Wassertemperatur innerhalb von 24 Stunden Sommers wie Winters beliebig zwischen 10° und 34° Celsius eingeregelt werden. Eine Wohlfühltemperatur von 33° Celsius für die Taucher stellt damit kein Problem dar. Der Einfluss der Dunkelheit wird durch Einschalten starker Unterwasserscheinwerfer aufgehoben. Da der Taucher während der Versuche zwanglos ruhig unter Wasser an ihrem Platz verweilen sollen, sind körperlich Anstrengungen ausgeschlossen.</p>		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>
Anforderung 11		Gewichtung: <b>Wunsch</b>
<b>Verhinderung des Stützstrumpfeffektes</b>		
<p>Das Tragen eines Taucheranzuges aus Neopren sollte wegen des damit verbundenen Stützstrumpfeffektes, der eine Blutumverteilung im Körper bewirkt, vermieden werden.</p>		
<p>Beurteilung:</p>		
<p>Weil im Tauchturm während der Versuche eine Wassertemperatur von 33°Celsius herrscht, ist das Tragen von Kälteschutzanzügen nicht notwendig.</p>		
<p>Im Gegenteil: Bei dieser Wassertemperatur kann es zum Wärmestau im Anzug kommen, der einen Kollaps des Tauchers nach sich zieht.</p>		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>
Anforderung 12		Gewichtung: <b>Wunsch</b>
<b>Reduktion der Infektionsgefahr</b>		
<p>Die vom Wasser ausgehende Infektionsgefahr bei der arteriellen Blutabnahme sollte so gering wie möglich gehalten werden.</p>		
<p>Beurteilung:</p>		
<p>Diese Anforderung ist im Berliner Tauchturm ist auf einfache Weise erfüllbar, indem der punktierte Arm nicht mit Wasser in Berührung kommt. Durch die technische Konzeption der Berliner Tauchturmanlage kann der Taucher die gewünschte Tauchtiefe von 44m erreichen, während seine Füße sich auf einer realen Wassertiefe von zwei Metern befinden. Denn ein Druck(luft)polster von 4,2 bar sorgt für eine simulierte Tauchtiefe von 44m. Bei dieser Konstellation ist es möglich, dass sich der arteriell punktierte Arm des Tauchers über seinen Kopf gestreckt außerhalb des Wassers befindet. Der Arm kann bequem auf dem Gräting der Taucherturmkammer ruhen, auf welchem der Taucherarzt und sein Gehilfe sich bewegen. Auf diese Weise sind Blutentnahmen mit geringem Arbeitsaufwand durchführbar.</p>		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>

### 3. Technische Arbeiten

Anforderung 13		Gewichtung: <b>Wunsch</b>
<b>Peripherie I</b>		
In der unmittelbaren Umgebung der Versuchsanlage sollte die nötige Infrastruktur zur medizinischen Vorbereitung und Nachversorgung der Taucher vorhanden sein. (Medizinräume zum Setzen und Entfernen der arteriellen Punktion sowie zur Notfallversorgung kollabierter Versuchsteilnehmer).		
Beurteilung: Die multifunktionale Architektur des Siegfried-John-Hauses beinhaltet auch einen in sich abgeschlossenen Gebäudekomplex für medizinische Zwecke, Medizintrakt genannt, welcher nach vorheriger Absprache für die Durchführung dieser Studie genutzt werden kann.		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>
Anforderung 14		Gewichtung: <b>Möglichkeit</b>
<b>Peripherie II</b>		
In der unmittelbaren Umgebung der Versuchsanlage sollte sich eine Metallwerkstatt für Schnellreparaturen an den für die Versuche benötigten Tauchausrüstungsgegenständen befinden.		
Beurteilung: In der untersten Etage (Deck A) des Siegfried-John-Hauses befindet sich die Zentralwerkstatt des Wasserrettungsdienstes der DLRG-Berlin, welche nach vorheriger Absprache für die Durchführung dieser Studie genutzt werden kann.		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>
Anforderung 15		Gewichtung: <b>Möglichkeit</b>
<b>Peripherie III</b>		
In der unmittelbaren Umgebung der Versuchsanlage sollten sich Küche und Speisesaal zur Versorgung des Personals und der Taucher befinden.		
Beurteilung: Im Siegfried-John-Haus befinden sich auch eine Küche und ein Speisesaal, welche nach vorheriger Absprache für die Durchführung dieser Studie genutzt werden können.		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>
Anforderung 16		Gewichtung: <b>Möglichkeit</b>
<b>Peripherie IV</b>		
Denjenigen Tauchern, deren Anfahrtszeit zum Studienort mehr als eine Stunde beträgt, sollte die Möglichkeit zur Übernachtung in der Nähe der Versuchsanlage gegeben werden.		
Beurteilung: Das Siegfried-John-Haus bietet Schlafplätze für über 70 Personen, welche nach vorheriger Absprache für die Durchführung dieser Studie genutzt werden können.		
		Wertung: <b>Vollständig erfüllt</b>

<u>Anforderung 17</u>		Gewichtung: <b>Möglichkeit</b>
<b>Rationalisierung</b>		
Aus Sicherheitsgründen wird kein Taucher sich allein unter Wasser begeben. Hingegen wäre es von Vorteil, möglichst mehrere Taucher gemeinsam ein Tauchprofil durchlaufen zu lassen, um damit die Anzahl der Versuchsdurchläufe zu minimieren.		
Beurteilung: Im Tauchturm dürfen sich bei Druckbeaufschlagung maximal sechs Personen befinden. Zieht man von dieser Anzahl den Taucherarzt und seinen Gehilfen, welche sich im Trockenbereich der Tauchturmanlage aufhalten, ab, dürfen noch vier weitere Personen in den Tauchturm. Angesichts der Tatsache, dass die Taucher sich im Zustand der Submersion dicht unter der Wasseroberfläche befinden und damit in einem zylindrischen, wassergefüllten Raum mit 1,9 m Durchmesser, erscheint die Zahl von vier Personen / Tauchern unter diesen Platzverhältnissen als angemessen. Bei einer Probandenmenge von n=16 reduziert sich die Anzahl der Versuche auf ein Viertel des Maximalaufwandes.		
		Wertung: <b>Überwiegend erfüllt</b>

#### 3.2.3. Tabellarische Anforderungsliste mit Bewertung

Alle Anforderungen wurden bereits zu Beginn des vorangegangenen Kapitels gemäß der Dringlichkeit ihrer Erfüllung drei Anforderungskategorien zugeordnet. An selbiger Stelle wurden auch Bewertungsprädikate festgelegt.

Um eine tabellarische Auswertung in kalkulatorischer Form zu ermöglichen, werden jetzt sowohl die Anforderungskategorien als auch die Bewertungsprädikate durch einen Faktor ausgedrückt.

<b>Anforderungskategorie</b>	↔	<b>Gewichtungsfaktor</b>
Forderung ("F")	↔	Gewichtungsfaktor 5
Wunsch ("W")	↔	Gewichtungsfaktor 3
Möglichkeit ("M")	↔	Gewichtungsfaktor 1

<b>Bewertungsprädikat</b>	↔	<b>Bewertungsfaktor</b>
Anforderung voll erfüllt	↔	Bewertungsfaktor 5
Anforderung überwiegend erfüllt	↔	Bewertungsfaktor 3
Anforderung ansatzweise erfüllt	↔	Bewertungsfaktor 1
Anforderung nicht erfüllt	↔	Bewertungsfaktor 0

Die aus beiden Faktoren errechneten Produkte werden addiert und führen zu einem Ergebnis, welches die Qualität der gewählten Lösung aussagekräftig darlegt.

Tabellarische Einschätzung der Eignung des Tauchturmes					
	Anforderung		Gewichtungsfaktor	Bewertungsfaktor	Produkt
1	Tauchersicherheit	F	5	5	25
2	Submersion	F	5	5	25
3	Multiple arterielle Blutentnahme	F	5	5	25
4	Blutprobenqualität (thermischer Aspekt)	F	5	5	25
5	Blutprobenqualität (temporaler Aspekt)	F	5	5	25
6	Schockfrost	F	5	5	25
7	Atemgasapplikation	F	5	5	25
8	Abgase	F	5	0	0
9	Atemgasumrüstzeiten	W	3	5	15
10	Stressfaktorenelimination	W	3	5	15
11	Verhinderung des Stützstrumpfeffektes	W	3	5	15
12	Reduktion der Infektionsgefahr	W	3	5	15
13	Peripherie I	W	3	5	15
14	Peripherie II	M	1	5	5
15	Peripherie III	M	1	5	5
16	Peripherie IV	M	1	5	5
17	Rationalisierung	M	1	3	3
					<b>Σ=268</b>
					<b>Max=295</b>

Tabelle 3.1: Einschätzung der Eignung des Tauchturmes

**Fazit:**

Die vorhandene Tauchturmanlage erreicht eine Anzahl 268 von 295 maximal möglichen Punkten, was für eine technische Anlage angesichts der komplexen Anforderungen, Wünsche und Optionen ein sehr gutes Ergebnis darstellt.

Leider wird die rechnerisch sehr gute Einschätzung der Tauchturmanlage zu Nichte gemacht durch die Nichterfüllung der unabdingbaren Forderung "**Abgase**". Daher wurde nach realisierbaren Alternativen gesucht.

3.2.4. Darstellung und Beurteilung von Alternativmöglichkeiten

Als einfachste und kostengünstige Alternativen zur Nutzung der Tauchturmanlage samt vorhandener Atemregleranlage bieten sich hauptsächlich zwei Vorgehensweisen an.

Zum einen die Nutzung der Tauchturmanlage unter Verwendung autonomer Leichttauchgeräte durch jede einzelne Versuchsperson. In diesem Falle müssen auch die in der Taucherturmkammer befindlichen Personen über ein Tauch- oder Atemgerät verfügen, da die Atmosphäre der Taucherturmkammer durch die Ausatemluft der Taucher bei Sauerstoff- oder Helioxatmung verändert wird.

Zum anderen die Durchführung der gesamten Tauchkampagne im Freiwasser. Freiwassertauchgänge in Süß- und Salzwasser mit schlauchversorgten und autonomen Leichttauchgeräten, ausgehend von einem Forschungsschiff oder landunterstützt in einem Binnensee. Dabei stellen insbesondere die mit zunehmender Wassertiefe abnehmende Temperatur und Sichtweite ein großes Sicherheitsrisiko dar.

Beide Alternativen sollen hier nicht ausführlich mit allen Vor- und Nachteilen diskutiert werden, da die folgende tabellarische Bewertung hinreichend Auskunft gibt über die drei vorhandenen Alternativen:

- Tauchturm mit Atemregleranlage (ARA)
- Tauchturm mit Leichttauchgeräten (LTG)
- Freiwasser mit Leichttauchgeräten (LTG)

**Tabellarische Anforderungsliste mit Bewertung der drei Alternativen**

(Begriffserklärungen siehe oben)

	ANFORDERUNG	GEWICHTUNGS-FAKTOR	TAUCHTURM MIT ARA		TAUCHTURM MIT LTG		FREIWASSER MIT LTG	
			Bewertungs-faktor	Produkt	Bewertungs-faktor	Produkt	Bewertungs-faktor	Produkt
1	Tauchersicherheit	5	5	25	5	25	3	15
2	Submersion	5	5	25	5	25	5	25
3	Multiple arterielle Blutentnahme	5	5	25	5	25	5	25
4	Blutprobenqualität (thermischer Aspekt)	5	5	25	5	25	1	5
5	Blutprobenqualität (temporaler Aspekt)	5	5	25	5	25	1	5
6	Schockfrost	5	5	25	5	25	1	5
7	Atemgasapplikation	5	5	25	5	25	5	25
8	Abgase	5	0	0	0	0	5	25
9	Atemgasumrüstzeiten	3	5	15	3	9	1	3
10	Stressfaktorenelimination	3	5	15	5	15	1	3
11	Verhinderung des Stützstrumpfeffektes	3	5	15	5	15	0	0
12	Reduktion der Infektionsgefahr	3	5	15	5	15	0	0
13	Peripherie I	3	5	15	5	15	1	3
14	Peripherie II	1	5	5	5	5	1	1
15	Peripherie III	1	5	5	5	5	1	1
16	Peripherie IV	1	5	5	5	5	1	1
17	Rationalisierung	1	3	3	1	1	5	5
				268		259		142

**Tabelle 3.2: Anforderungsliste mit Bewertung der drei Alternativen**

### **Schlussfolgerung**

Methodisch identische Einschätzungen wurden durch die Wissenschaftler des Institutes für Sportmedizin und erfahrene Tauchereinsatzleiter der DLRG-Berlin durchgeführt.

Keine dieser Versuchsanordnungen stellte eine das Forscherkollegium befriedigende Lösung dar !

Die Tauchturmanlage schnitt in der rechnerischen Einschätzung sehr gut ab. Doch wurde sie durch die Nichterfüllung der unabdingbaren Forderung "**Abgase**" disqualifiziert. Daher soll im Weiteren versucht werden, geeignete Maßnahmen zu finden, welche diesen Mangel beheben. Denn selbst wenn aufwendige Um- oder Erweiterungsbauten an der vorhandenen Tauchturmanlage erforderlich sein sollten, ließe sich damit das Risiko der Studie für Probanden und Personal wesentlich geringer halten, als bei den angedachten Alternativen.

### **3.3. Konzipieren und Entwerfen**

#### **3.3.1. Darstellung der Problematik**

Beide BIBS (BIBS = Buildt-In-Breathing-System), sowohl die Sauerstoffatemanlage als auch die Atemregleranlage sind so konzipiert, dass die von den Tauchturminnsassen ausgeatmeten Gase nicht der Tauchturmatmosphäre zugeführt werden. Sämtliche Ausatemgase werden über separate Ausatemschläuche, welche an den Sauerstoffmasken bzw. Atemreglern angebracht sind, zum Overboard-Dumping-System geleitet und über dieses aus dem Tauchturm und dem Gebäude hinausgeführt. Damit dieses Overboard-Dumping-System einwandfrei arbeiten kann, muss der Tauchturminnendruck um mindestens 0,3 bar höher liegen, als das Druckniveau außerhalb des Tauchturmes, an welches das Ausatemgas abgegeben werden soll. Bei einem angenommenen Umgebungsluftdruck von etwa einem bar, je nach Wetterlage, muss im Tauchturm ein Druck von mindestens 1,3 bar herrschen, was einer Tauchtiefe von drei Metern Wassersäule entspricht. Eine geringere Druckdifferenz führt zu einer extrem starken Erhöhung des Ausatemwiderstandes. Ein "An-atmen" gegen diesen Widerstand hat zwangsläufig Lungenschäden bei den betreffenden Personen zur Folge. Aus diesem Grunde werden beide Systeme, sowohl die Sauerstoffatemanlage als auch die Atemregleranlage, nicht betrieben, wenn sich der Tauchturm in einem drucklosen, das heißt nicht mit Druck beaufschlagtem Zustand befindet.

Der Einatemvorgang des jeweiligen Atemgases ist bei beiden BIBS auf jedem Druckniveau problemlos möglich, auch bei normobaren Druckverhältnissen. Schwierigkei-

ten dagegen macht die Ausatmung, also die Ableitung des ausgeatmeten, verbrauchten Atemgases.

### 3.3.2. Analyse der Funktionsstruktur einer Atemgasversorgung

Um Konzepte zur Lösung der geschilderten Problematik erstellen zu können, ist es sinnvoll, zuerst die Funktionsstrukturen einer Atemgasver- und Entsorgung zu analysieren.

Funktionen:

- I. Atemgas in ausreichender Menge unter ausreichendem Druck aus einem Hochdruckvorratsbehälter zum Taucher leiten
- II. Atemgas auf Umgebungsdruck reduzieren
- III. Atemgas zur Einatmung bedarfsgerecht und atemgesteuert dosieren ("supply on demand")
- IV. Atemgas nach erfolgter Ausatmung ableiten (mit geringem Totraum  $\Rightarrow$  Pendelatmung)

Bedingungen:

- I. Die Sicherheit, Gesundheit und körperliche Unversehrtheit der Taucher und Projektmitarbeiter muss gewährleistet sein
- II. Funktionen anderer Subsysteme der Tauchturmanlage dürfen nicht beeinträchtigt werden

Jede mögliche Lösung muss mehrfach die Funktion "Gas leiten" beinhalten. Die Wirkungen dieser einzigen Funktion der möglichen Lösung können Beeinträchtigungen aller anderen Teilsysteme des übergeordneten Systems Tauchturm nach sich ziehen. Ein Konzept für die einzurichtende Atemgasversorgung kann daher nur unter Berücksichtigung der Betriebssicherheit des Systems Tauchturm erfolgen.

Das "System Tauchturm" oder das "System Atemgasversorgung" als ein Black-Box-Modell mit Stoff- Energie- und Signalströmen, sowie Umwelteinwirkungen und -belastungen zu betrachten, ist wenig sinnvoll, denn es liegt hier lediglich ein Stoffstrom vor, der unsere "Black-Box Tauchturm / Atemgasversorgung" fast genauso wieder verlässt, wie er hineingegangen ist. Und die geringe Veränderung hinsichtlich Temperatur, Feuchtigkeit und Zusammensetzung, der das Atemgas unterworfen wird, ist für diese Aufgabenstellung nicht von Bedeutung.

Nach Expertenbefragungen, einer Brainstorming-Sitzung, Internetrecherchen und bundesweiten Anfragen an Systemlieferanten ergaben sich genau drei Lösungsvarianten, die im Folgenden mit A bis C bezeichnet werden.



### 3.3.3. Beschreibung der Lösungsvarianten

Die gesamte Funktionsstruktur einer Atemgasversorgung ist durch die BIBS-Atemregleranlage vorhanden. Lediglich die Funktion IV (Atemgas nach erfolgter Ausatmung ableiten) steht nicht immer zur Verfügung.

Aus diesem Grund zeigen die Lösungsvarianten A bis C Möglichkeiten auf, in welcher Form auf der Niederdruckseite des Overboard-Dumping-Systems eine relative Druckdifferenz erzeugt werden kann, um diese Funktion zu ermöglichen. Diese Druckdifferenz muss mindestens 0,3 bar betragen und auch dann erhalten bleiben, wenn die vier Taucher taktgleich zusammen etwa 100 barLiter pro Minute ausatmen.

#### **Lösungsvariante A**

##### **”Ausatmen in die Tauchturmatmosphäre“**

Bei dieser ersten und einfachsten Lösungsvariante werden die Funktion I bis III über die im Tauchturm vorhandene BIBS-Atemregleranlage wahrgenommen. Das Mundstück des Tauchers wird derart umgebaut, dass das ausgeatmete Atemgas nicht über den vorhandenen Schlauch abgeleitet, sondern über ein Ausatemventil direkt ins Wasser und damit in die Tauchturmatmosphäre eingeleitet wird.

- ⊕ Diese Technik eines ”offenen“ Atemgaskreislaufes wird einwandfrei beherrscht.
- ⊕ Nur geringe Umbauarbeiten sind erforderlich.
- Unbestimmbare Atemgasatmosphäre in der Taucherturmkammer, wo sich die Helfer aufhalten, während des Heliox-Tauchprofils.  
⇒ **Ausschlusskriterium**
- Sauerstoffüberschuss in der Taucherturmkammer bei Durchführung des Sauerstoffprofils. Dies verstößt gegen die Sicherheitsbestimmungen für Taucherdrukammern (Brandschutz).  
⇒ **Ausschlusskriterium**

#### **Lösungsvariante B**

##### **”Druckdifferenz (Absaugung) durch Wasserstrahlpumpe“**

Bei dieser Lösungsvariante werden die Funktion I bis III ebenfalls über die im Tauchturm vorhandene BIBS-Atemregleranlage wahrgenommen. Eine außerhalb der Tauchturmanlage positionierte Wasserstrahlpumpe erbringt die zum Ausatmen unter normobaren Bedingungen notwendige Druckdifferenz. Gespeist wird die Wasserstrahlpumpe von einer handelsüblichen Feuerwehr-Tragkraftspritze, welche außerhalb der Tauchturmanlage positioniert wird. Als Wasserreservoir dient ein ebenfalls

außerhalb der Anlage stehendes Wasserbecken mit einem Fassungsvermögen von mindestens  $2 \text{ m}^3$ . Durch einen Umschaltmechanismus kann die Wasserstrahlpumpe bei normobarem Betrieb zugeschaltet und bei Überdruckbetrieb abgekoppelt werden.

- ⊕ Einfache, überschaubare Technik.
- ⊕ Pumpen von Sauerstoff und Sauerstoffgemischen gefahrlos möglich.
- ⊕ Problemlose Bereitstellung der benötigten Komponenten Feuerwehr-Tragkraftspritze und Wasserbecken, da diese zur Katastrophenschutzrüstung der Wasserretter gehören.
- Eine Wasserstrahlpumpe dieser Dimensionierung muss eigens angefertigt werden.
- Die Abgase der mit einem Verbrennungsmotor angetriebenen Feuerwehr-Tragkraftspritze müssen aufwendig aus dem Gebäude herausgeführt werden.
- Die Positionierung des Wasserbeckens mit einem Gewicht von mindestens 2 Tonnen im Deck D des Hauses überschreitet die zulässige Bodenbelastung.  
⇒ **Ausschlusskriterium**

#### **Lösungsvariante C**

##### **”Druckdifferenz (Absaugung) durch Seitenkanalpumpe”**

Bei dieser Lösungsvariante werden die Funktion I bis III ebenfalls über die im Tauchurm vorhandene BIBS-Atemregleranlage wahrgenommen. Eine außerhalb der Tauchturmanlage positionierte elektrische Seitenkanalpumpe erbringt die zum Ausatmen unter normobaren Bedingungen notwendige Druckdifferenz. Durch einen Umschaltmechanismus kann die Seitenkanalpumpe bei normobarem Betrieb zugeschaltet und bei Überdruckbetrieb abgekoppelt werden.

- ⊕ Bei entsprechend großzügig ausgelegter Seitenkanalpumpe erbringt diese eine hohe, gut regulierbare Saugleistung.
- ⊕ Pumpen von reinem Sauerstoff und sauerstoffhaltigen Gasgemischen ist gefahrlos möglich.
- ⊕ Der Antrieb der Seitenkanalpumpe erfolgt elektrisch. Eine entsprechende Kraftstromversorgung ist im Gebäude vorhanden.
- Die Beschaffung einer Seitenkanalpumpe mit entsprechender Leistung sprengt den wirtschaftlichen Rahmen der für diese Studie bereitgestellten Finanzmittel.

### 3.3.4. Auswahl einer Lösungsvariante

Lediglich die Lösungsvariante C verstößt nicht eklatant gegen bestehende Sicherheitsvorschriften. Daher wurde dieser eindeutig der Vorzug gegeben.

Es gelang nach umfangreichen Recherchen, eine geeignete Seitenkanalpumpe am Institut für Strömungslehre der Technischen Universität Berlin ausfindig zu machen. Der Institutsleiter, Herr Prof. Dr.-Ing. Siekmann, erklärte sich freundlicherweise bereit, sie für diese Studie kostenlos zur Verfügung zu stellen.

Damit konnte die Lösungsvariante C ausgewählt und verwirklicht werden.

Die Ausarbeitung dieser Lösungsvariante erfolgt jetzt dahingehend, dass im folgenden Kapitel aus einer Seitenkanalpumpe und genormten Standardbauteilen die Funktion "Atemgas nach erfolgter Ausatmung ableiten" erfüllt werden soll.

## 3.4. Ausarbeitung

### 3.4.1. Festlegung von Werkstoffen und Bauteilen

Sämtliche Gasleitungen und alle Ventile am Tauchturm, welche als Bestandteil des Overboard-Dumping-Systems die Ausatemgase der Taucher aus dem Tauchturm und dem Gebäude hinausführen, werden dergestalt umgebaut, dass sie der Saugleistung der zur Verfügung stehenden Seitenkanalpumpe standhalten.

Für sämtliche Umbauten kamen genormte Standardbauteile zum Einsatz. Dabei galt es zu beachten, dass keine Materialien, welche mit Sauerstoff reagieren könnten, in den Leitungen oder Ventilen Verwendung finden.

### 3.4.2. Endgültige Festlegung von Anordnung, Form und Bemessung

Aus dem Datenblatt der Seitenkanalpumpe ergibt sich die Notwendigkeit, deren Leistung für den erforderlichen Einsatzzweck regulieren zu können. Die verwendete Seitenkanalpumpe verfügt auf der Saugseite über einen in Deutschland bei den Feuerwehren üblichen C-Rohr-Bajonett-Anschluß, welcher über mehrere Reduzierstücke an die Abluftleitungen des Overboard-Dumping-Systems der Tauchturmanlage angeschlossen wird. Zwischen C-Rohr-Bajonett-Anschluß und Overboard-Dumping-System wird ein 3-Wege-Feuerwehrventil als Bypass installiert. Auf diese Weise kann die Leistung der Seitenkanalpumpe problemlos mittels eines Handrades am 3-Wege-Feuerwehrventil den Erfordernissen angepasst werden.

Der Ableitungsschlauch der Seitenkanalpumpe wird durch eine Lüftungsklappe aus dem Gebäude herausgeleitet.

### 3.4.3. Kalkulation der Kosten

Der Aufwand für die Beschaffung einer Seitenkanalpumpe beschränkt sich auf die Transportkosten, da eine solche Pumpe vom Institut für Strömungslehre der Technischen Universität Berlin freundlicherweise kostenlos zur Verfügung gestellt wird. Sämtliche anderen benötigten Bauteile sind bei der Deutschen Lebens-Rettungs-Gesellschaft vorhanden und können genutzt werden.

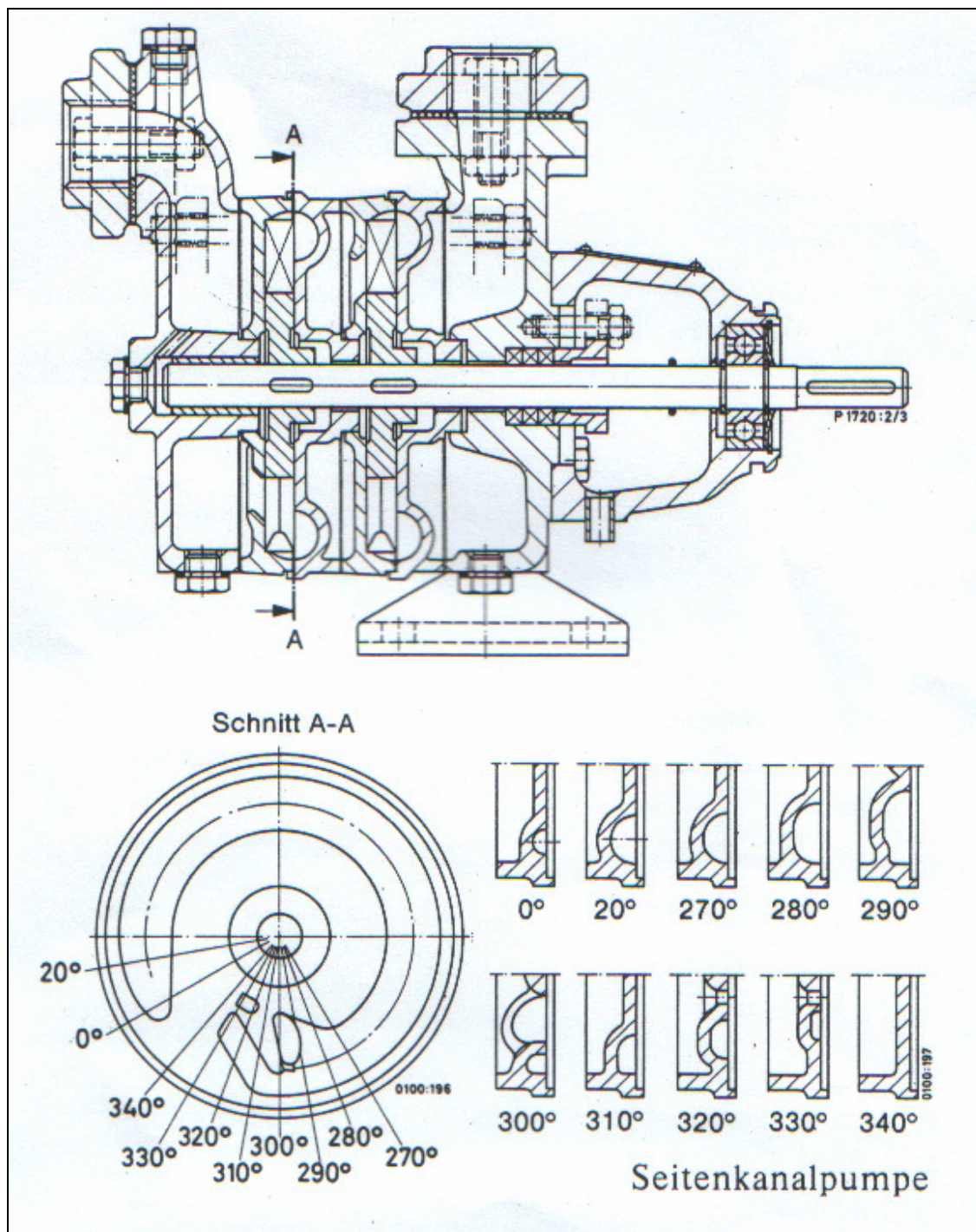
## 3.5. Technische Ergebnisse

Die in technischer Hinsicht gestellte Aufgabe wurde gelöst. Mit Beginn der Tauchkampagne war die Tauchturmanlage dergestalt umgebaut, dass die erforderlichen Tauchprofile ohne Einschränkung und bei Beachtung aller geltenden Sicherheitsregeln gefahren werden konnten. Das im Kapitel 3.2.1. "Zielsetzung" angestrebte Endergebnis wurde erreicht. Alle im Kapitel 3.2.2 "Anforderungen an die konstruktive Lösung (Lastenheft)" formulierten Forderungen, Wünsche und Optionen an die Tauchturmanlage und das System Atemgasversorgung werden erfüllt, ohne die Funktionen anderer Systeme der Tauchturmanlage oder ihre Peripherie zu beeinträchtigen.

### 3.5.1. Darstellung der modifizierten Atemregleranlage

Die Tauchturmanlage wurde für die Durchführung dieser Studie um eine Einrichtung erweitert, die es ermöglicht, auch unter normobaren Bedingungen problemlos über schlauchversorgte Atemregler auszuatmen. Zu diesem Zweck wurde außerhalb des Tauchturms in die Abgasleitung des Overboard-Dumping-Systems ein zuschaltbarer Abzweig eingefügt, welcher bei Bedarf von Hand betätigt werden konnte. Dieser Abzweig befand sich unmittelbar hinter der Leitungsdurchführung durch die Tauchturmwand und führte zur Saugseite der Seitenkanalpumpe. Durch diesen Umschaltmechanismus kann die Seitenkanalpumpe bei normobarem Betrieb zugeschaltet und bei Überdruckbetrieb abgekoppelt werden.

*"Im Gehäuse dieser Seitenkanalpumpe rotiert, konzentrisch angeordnet, ein sternförmiges Rad. Das Sternrad überträgt die Leistung auf eine Förderflüssigkeit. Diese Förderflüssigkeit befindet sich in einem neben dem Laufrad angeordneten Seitenkanal. Das Sternrad mit seinen geraden, radialen Schaufeln ist überaus einfach gebaut.*



**Bild 3.2: Seitenkanalpumpe**  
 entnommen aus: [Kreiselpumpenlexikon 1989].

*Es wird außen und an seinen beiden Seiten von den Wänden des Gehäuses mit engen Spalten umschlossen. Das Gehäuse hat ein- oder beidseitig je einen Seitenkanal. Der Seitenkanal erstreckt sich fast über den gesamten Umfang. Aber an einer Stelle, und zwar zwischen dem Eintritts- und Austrittsschlitz, ist er unterbrochen.*



### 3. Technische Arbeiten

*Während des Umlaufs bewegt sich die Förderflüssigkeit mehrfach zwischen den Zellen des Sternrades und dem Seitenkanal hin und her. Dabei findet durch Impulsaustausch eine starke Energieübertragung statt zwischen derjenigen Förderflüssigkeit, die mit der hohen Umfangsgeschwindigkeit des Sternrades rotiert und derjenigen, die langsamer im Seitenkanal strömt. Dieser sich mehrfach am Umfang wiederholende Impulsaustausch bewirkt eine sehr große Förderhöhe bei vergleichsweise geringem Förderstrom.” Zitat aus dem [Kreispumpenlexikon 1989].*

Die für den Umbau verwendete Seitenkanalpumpe erbringt eine weit höhere als für diesen Einsatzzweck notwendige Förderleistung. Zur Regulierung der Saugleistung wird ihr daher ein Bypass vorgeschaltet. Über diesen kann die Seitenkanalpumpe durch Zufuhr von mehr oder weniger Umgebungsluft im optimalen Arbeitsbereich betrieben werden. Das von der Seitenkanalpumpe geförderte Gas wird mittels eines Schlauches aus dem Gebäude hinausgeleitet.

Die Seitenkanalpumpe wurde vom Institut für Strömungslehre der Technischen Universität Berlin durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Siegmann freundlicherweise kostenlos zur Verfügung gestellt.



**Bild 3.3: Taucher in der Turmkammer** vor Beginn der ersten Submersion  
Aufnahme von Frank Villmow, DLRG

### 3.5.2. Weitere Umbauten und Ergänzungen der Tauchturmanlage

Während der Submersionen befinden sich bis zu vier Taucher nebeneinander angeordnet im oberen Ende der Wassersäule des Tauchturmes. Der Durchmesser des Tauchturmes beträgt dort 1,90 Meter. Die Taucher müssen ihre Position unter Wasser hurtig aufsuchen und verlassen, aber auch ohne Kraftanstrengung 15 Minuten lang einhalten können. Sollte ein Taucher während der Submersion bewusstlos werden, muss verhindert werden, dass er im Tauchturm auf die maximale Wassertiefe von 8 Metern absinkt.

Für jeden Taucher gibt es daher eine Sicherheitsleine von 2 Metern Länge. Das eine Ende dieser Leine ist kurz über der Wasseroberfläche befestigt. Am anderen Ende befindet sich ein Karabinerhaken. Diesen klinkt der Taucher in seine Sicherheitsbegurtung ein. Diese Sicherheitsbegurtung gehört zur persönlichen Ausrüstung jedes Rettungstauchers. An ihr wird bei Freiwassertaucheinsätzen die Signal- und Sicherungsleine befestigt, mit welcher er im Kontakt zu seinem Leinenführer über Wasser steht.

Die Positionierung der Taucher im oberen Ende der Wassersäule des Tauchturmes erfolgt durch einen einzigen großen "Gummiröhrenring". Dieser Ring mit einem Durchmesser von etwa 1,40 Meter besteht aus mehreren zusammenschraubten Ansaugleitungsstücken, wie sie üblicherweise bei einer Tragkraftspritze (=Feuerwehrlöschpumpe) Verwendung finden. Benutzt werden Ansaugleitungsstücke aus stahlverstärktem Gummi mit einem Außendurchmesser von etwa 15 Zentimetern. Ansaugleitungsstücke mit einem größeren Außendurchmesser lassen sich nicht ohne Beschädigung im gewünschten Ringdurchmesser etwa 1,40 Metern verbinden. Dieser Ring wird in einer Wassertiefe von etwa 1,20 Metern in waagerechter Lage und horizontal zentriert im Tauchturm befestigt. Um sich zu positionieren, setzen die Taucher sich rittlings auf den Gummiröhrenring und legen ihren punktierten Unterarm (arteria radialis) auf den Gräting, welcher (bedingt durch den genau bemessenen Füllstand des Tauchturmes) sich mit seiner Unterseite gerade noch im Wasser befindet. So ist ihr gesamter Körper mit Ausnahme des punktierten Unterarmes eingetaucht. Ohne großen Kraftaufwand können die Taucher in dieser Lage bequem und entspannt die Zeit der Submersionen verbringen.

In dem Bereich über der Wassersäule des Tauchturmes, Turmkammer genannt, befinden sich der Taucherarzt und sein medizinischer Helfer. Sie stehen auf dem Gräting, auf welchen die Taucher ihren punktierten Unterarm gelegt haben. Der Taucherarzt entnimmt die Blutproben, der Taucherarztgehilfe assistiert ihm dabei. Für das dazu notwendige medizinische Verbrauchsmaterial wurden Lagerungs- und Ent-

sorgungsmöglichkeiten in der Turmkammer dergestalt installiert, dass sie weder die Taucher noch medizinisches Personal in ihrer Bewegungsfreiheit behinderten.

#### 3.5.3. Beurteilung der Umbauten im Hinblick auf ihre praktische Eignung

Die an der Tauchturmanlage erfolgten Umbauten waren temporär erforderlich, um diese Studie durchführen zu können. Dadurch war es weder geplant noch möglich, die erfolgreich verwendeten Komponenten zu einer dauerhaften Einrichtung werden zu lassen. Ihre praktische Eignung haben jedoch alle Umbauten bewiesen. Während der gesamten Tauchkampagne arbeiteten sie fehlerfrei und ohne einen einzigen Ausfall. Wartungs- oder Instandhaltungsarbeiten waren innerhalb dieses Zeitraumes nicht vonnöten.

Die Vorteile der entwickelten Lösung sind im Einzelnen:

- Einfache Handhabung
- Geringe Kosten
- Schnelle Einsatzfähigkeit
- Hohe Funktionalität

Die vielfältigen Vorteile wurden vom Bedienpersonal der Tauchturmanlage erkannt. Für den Fall weiterer Studien zu diesem Themengebiet ist geplant -nach Absprache mit Herrn Prof. Dr.-Ing. Siegmann vom Institut für Strömungslehre der Technischen Universität Berlin- auch künftig auf diese Umbauvariante zurückzugreifen. Durch die beim Bedienpersonal vorhandene Erfahrung ist eine zügige Verwirklichung künftiger Studien gewährleistet.

Das im Rahmen dieses Projektes zusammengetragene Wissen an Technologie, Marktkennntnis und Kontakten zu wissenschaftlichen Instituten garantiert nachfolgenden Forschern eine günstige Ausgangsposition.



## 4. Methodik II (Physiologische Untersuchungen)

### 4.1. Formale Voraussetzungen

Die Erfüllung der formalen Voraussetzungen zur Durchführung der Studie lag vollständig im Verantwortungsbereich des Institutes für Sportmedizin der FU Berlin. Die Einhaltung interner und externer die DLRG betreffenden Vorschriften wurde durch den Technischen Leiter des Landesverbandes Berlin überwacht. Zwischen der DLRG Berlin und dem Institut für Sportmedizin der FU Berlin wurde ein Kooperationsvertrag geschlossen. Der Abschluss einer Probandenversicherung erfolgte durch das Institut für Sportmedizin der FU Berlin.

Sofort nachdem die Zustimmung seitens der Ethikkommission der FU-Berlin zur Studiengestaltung vorlag, noch vor Beginn der Probandenrekrutierung und Personalauswahl, wurde für die Studie der Name des Meeresherrn "Proteus" aus der altgriechischen Mythologie entlehnt. Unter der Bezeichnung **PROTOIS-PROJEKT™** wurde dieser Name als Handelsmarke beim Patentamt in Berlin vom Verfasser eingetragen.

Lange vor dem ersten Tauchgang wurden zusammen mit dem Bedienpersonal der Tauchturmanlage und Taucherärzten Maßnahmen bei allen erdenklich auftretenden Komplikationen besprochen. Dabei wurde ähnlich vorgegangen, wie es bei einer Gefährdungsanalyse gemäß Arbeitsschutzgesetz üblich ist.

### 4.2. Vorversuch

Mehrere Monate vor dem Beginn der Versuche, zur Zeit der Probandenrekrutierung, wurde ein Vorversuch mit dem Verfasser als Versuchsperson durchgeführt. Potenziellen Probanden war die Möglichkeit gegeben, den Vorgang der arteriellen Punktion zu beobachten. Im Anschluss daran wurde ein dekompensationspflichtiger Tieftauchgang mit Luft als Atemgas unter Verwendung eines schlauchversorgten Atemreglers (sAR) in der Tauchturmanlage durchgeführt. Eine Polar-Pulsuhr wurde vorher angelegt und die aufgezeichneten Daten später ausgelesen. In der Isopressionsphase von 44m wurde mehrfach Blut entnommen und über die Versorgungsschleuse nach außen verbracht. Die aufgezeichneten Herzfrequenzen wurden ausgewertet, die Blutproben verworfen.

### 4.3. **Personal**

#### 4.3.1. **Probanden**

An dieser Studie nahmen 15 gesunde, männliche, taucherfahrene Mitglieder der DLRG teil. Die Probanden waren  $31.6 \pm 4.5$  (Mittelwert  $\pm$ Standardabweichung) Jahre alt, wogen  $86.7 \pm 10.9$  kg und waren  $182 \pm 7.4$  cm groß. Alle Probanden erhielten eine schriftliche Ausarbeitung der Studiengestaltung. Vor Studienbeginn gaben Sie eine schriftliche Einverständniserklärung zur Teilnahme ab.

#### **Kontrollgruppe**

Die tauchenden Probanden sind ihre eigene Kontrollgruppe. Als Kontrollversuche dienen die Tauchprofile I & III, in denen mit reinem Sauerstoff (ohne Druckbeaufschlagung in der Tauchturmanlage) und mit Heliox21 (ohne Stickstoffanteil im Atemgas) getaucht wird.

#### **Stichprobengröße**

Wir erwarten für die zu untersuchenden Messgrößen einen Interassay-Variationskoeffizienten um 10% und einen Intraassay - Variationskoeffizienten um 6% aufgrund der Ergebnisse aus früheren Studien unter normobaren Bedingungen.

Bei der Wahrscheinlichkeit eines Alpha-Fehlers von 0.05 und eines Beta-Fehlers von 0.2 sind etwa 12 tauchende Probanden notwendig, um einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Tauchprofilen festzustellen. Dabei wird davon ausgegangen, dass jeder dieser 12 tauchenden Probanden jeweils alle drei Tauchprofile durchläuft.

Vor der Probandenerhebung wurden die notwendigen Auswahlkriterien festgelegt. Viele dieser Kriterien sind Bestandteil von Vorschriften der Versicherungsträger für ehrenamtliche Rettungstaucher und werden daher zwangsläufig von diesen erfüllt.

#### **Einschlusskriterien:**

- Tauchtauglich nach G 31 [Berufgenossenschaftliche Grundsätze] oder einer vergleichbaren Tauchtauglichkeitsuntersuchung durch einen Taucherarzt
- Ausgebildet und geprüft als Rettungstaucher gemäß den Ausbildungsrichtlinien für das Tauchen in Hilfeleistungsunternehmen [GUV-R 2101] oder adäquate Ausbildung als Sporttaucher
- Taucherfahrung (mindestens 30 Tauchstunden, mindestens 30 Tauchgänge, davon mindestens drei in einem Tieftauchsimulator)
- männlich
- Alter zwischen 18 und 40 Jahren
- Einwilligung nach Aufklärung und schriftlichem Einverständnis
- Verständnis der schriftlichen deutschen Sprache

### **Ausschlusskriterien:**

- Nichterfüllung der Einschlusskriterien
- Herz- Kreislauferkrankungen
- Stoffwechselerkrankungen
- akute Erkrankungen innerhalb der letzten 14 Tage vor dem Tauchgang

### 4.3.2. Mitarbeiter

Sämtliche Arbeiten an der Tauchturmanlage, in ihr und um sie herum wurden von ehrenamtlichen Kräften der DLRG übernommen. Medizinisch-technische Labortätigkeiten wurden von Angestellten des Institutes für Sportmedizin durchgeführt.

Da stets mehrere Taucher gleichzeitig die Tauchprofile durchliefen, war der Verfasser für einen reibungslosen Ablauf verantwortlich. Nur wenn er selbst an einem Tauchprofil teilnahm, wurde diese Aufgabe von Herrn Priv. Doz. Dr. Strobel vom Institut für Sportmedizin der Freien Universität Berlin übernommen.

### 4.3.3. Ärzte

Zur Durchführung der Versuche war die Mitarbeit mindestens eines Arztes pro Versuchstag erforderlich. Sofern zwei Tauchprofile mit Druck nacheinander durchgeführt wurden, war die Anwesenheit von zwei Ärzten erforderlich, weil eine Person nicht so kurz hintereinander an zwei dekompensationspflichtigen Tauchgängen teilnehmen kann, ohne die Tauchprofile zu verlängern, was eine grobe Änderung des Versuches ablaufes nach sich gezogen hätte.

Alle beteiligten Ärzte mussten nicht nur geübt sein in der Durchführung einer arteriellen Punktion am Handgelenk, sondern darüber hinaus eine Tauchtauglichkeit vorweisen, um in der Turmkammer während der Tauchprofile Blutentnahmen unter Druck durchführen zu können. Auch sie arbeiteten ehrenamtlich und rekrutierten sich aus den Reihen der DLRG. Zusätzlich befand sich ein Berliner Taucherarzt in telefonischer Rufbereitschaft für einen eventuellen Notfall in der Tauchturmanlage, von dem auch der Arzt im Tauchturm betroffen ist. Für schwere Dekompensationsunfälle und die Abstimmung langwieriger therapeutischer Kompressionen befand sich eine international anerkannte Kapazität dieses Fachgebietes im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Köln-Porz ebenfalls in Rufbereitschaft.

#### 4.4. **Material (Anlagen, Verbrauchsgüter)**

Labor- und Analysegeräte zur Bestimmung von Katecholaminen, ACTH und Cortisol sowie die Pulsuhren zur Messung und Aufzeichnung der Herzfrequenz werden weiter unten zusammen mit den Bestimmungsmethoden beschrieben.

##### 4.4.1. Tauchturm

Die Einsatzbereitschaft der Tauchturmanlage wurde in Absprache und enger Zusammenarbeit durch die DLRG Berlin hergestellt. Notwendige technische Umbaumaßnahmen sind im Kapitel "3 Technische Arbeiten" beschrieben.

##### 4.4.2. Atemgase

Der für das Tauchprofil I benötigte reine Sauerstoff wurde in 50-Liter-Stahlflaschen angeliefert und bereitgestellt. Das Atemgas Luft für das Tauchprofil II wurde als komprimierte Umgebungsluft über die Kompressoren in fest installierte Pufferflaschen gefüllt und in großer Menge vorgehalten.

Tauchprofil III wurde mit Heliox21, einem Gemisch aus 21% Sauerstoff und 79% Helium, gefahren.

Die gesamte für diese Studie benötigte Menge an Sauerstoff und Heliox21 wurde dankenswerter Weise von der Firma "LINDE – Technische Gase" kostenfrei zur Verfügung gestellt.

##### 4.4.3. Medizinische Verbrauchsgüter

Das folgende medizinische Verbrauchsmaterial wurde aus dem Zentrallager der Universität entnommen:

Arterielle Verweilkanülen, z. B. Insyte-W, 20 G, 1.1\*30 mm von B&D

Discofix-3 (Dreiwegehahn mit Verlängerungsschlauch), z. B. von Braun REF 4098102

Tegaderm i.v. (Pflaster zum Abdichten der Punktionsstelle)

z. B. von 3M Health Care, 7 \* 8,5 cm, REF 1633

Sterile Mullkompressen (10\*10 cm oder 7,5\*7,5 cm)

Desinfektionsspray, z. B. Freka-DERM

NaCl 0,9% in 10 oder 20 ml Plasco-Ampullen, z. B. von Braun

Verschlussstöpsel, z. B. Combi-Stopper rot von Braun

Injektionsnadeln 27 G (Subcutannadeln für Lokalanästhesie)

2ml Spritzen (für Lokalanästhesie)

5ml Spritzen (zur Blutabnahme)

Lokalanästhetikum Lidocain 1%, 5 ml Ampullen (Rezept!)

Blutabnahmesystem der FU bzw. des beteiligten Labors

Pflaster, Spritzen, Stöpsel, NaCl sollten möglichst als 100er Kartons vorhanden sein.

Spezielles medizinisches Verbrauchsmaterial wurde beschafft wie folgt:

Firma Amersham, Braunschweig, Deutschland: Vacutainerröhrchen

Firma Eppendorf, Hamburg, Deutschland: ESAT Systemlösung

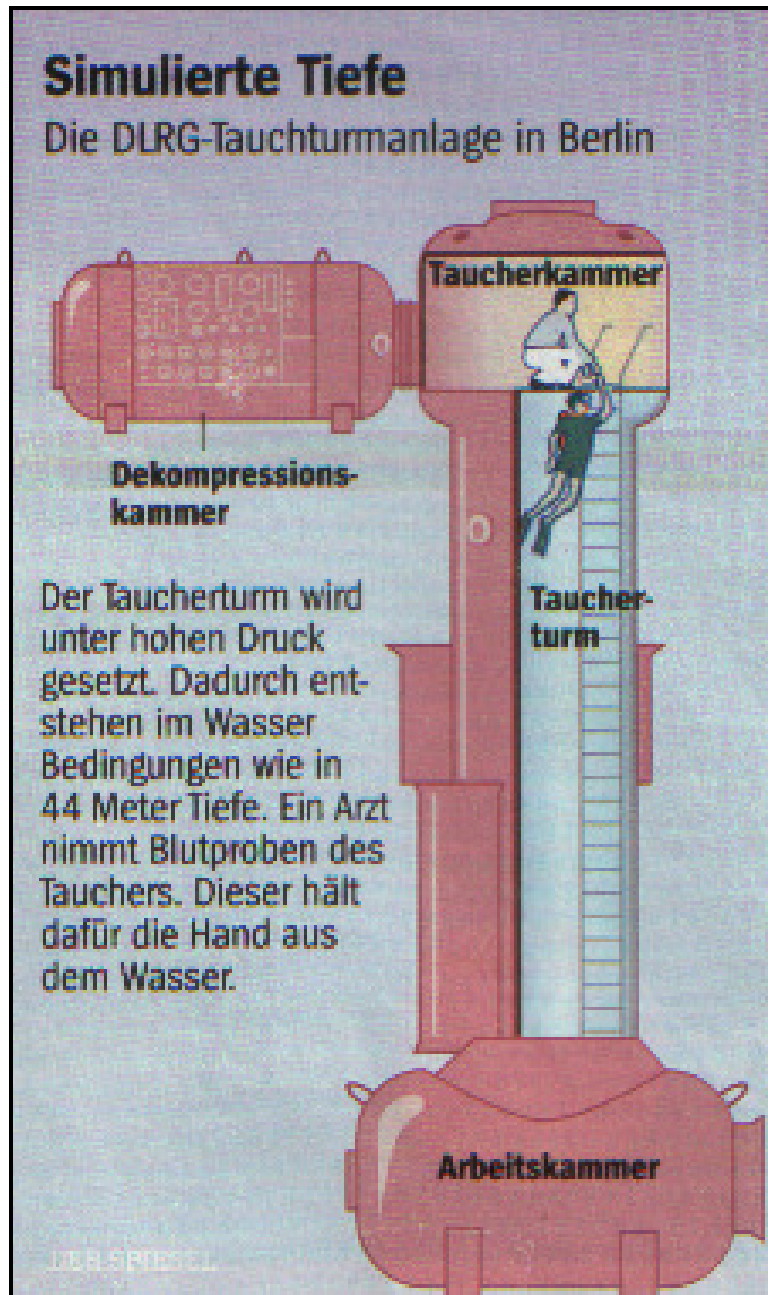
Firma Merck, Darmstadt, Deutschland: Zitronensäure, Natriumdihydrogenphosphat, Natrium-EDTA, Natriumacetat, Kaliumdihydrogenphosphat, Glukose, o-Phosphorsäure 85 %, Salzsäure 25 %, Natriumhydroxid, Kaliumhydroxid, Oktansulfonsäure

Firma Recipe, München, Deutschland: Katecholamin-Standard-Lösung, Katecholamin Eluting Reagenz, aktiviertes Aluminiumoxid

Firma Sigma, Deisenhofen, Deutschland: Alle weiteren Biochemikalien, organische Substanzen und Diagnostika.

## 4.5. Studienablauf

### 4.5.1. Allgemeine Beschreibung und Sicherheitsaspekte



**Bild 4.1: Blutentnahme im Taucherturm** während der Submersion

Entnommen aus "Der Spiegel" 41/2001, S. 212

Bericht über diese Studie unter dem Titel: "Aderlass in der Druckkammer"

### **Konzeption:**

Jeder Proband sollte einmal jedes der drei Tauchprofile I, II & III absolvieren. Jedes der drei Tauchprofile enthielt die folgenden Bestandteile

- **Ruheentnahme**, Beginn des Tauchprofils mit einer Blutentnahme nach Ruhezeit vom zwölf Minuten, Untersuchungszeitpunkt 1 genannt.
- **Erste Submersion** von 15 Minuten Dauer, mit je zwei Blutentnahmen und zwei Herzfrequenzuntersuchungen, davon eine gegen Anfang und eine weitere gegen Ende dieser Submersion. Sie erhielten die Bezeichnungen Untersuchungszeitpunkt 2 und Untersuchungszeitpunkt 3.
- **Pause**, Aufenthalt von 11 Minuten in der Turmkammer außerhalb des Wassers.
- **Zweite Submersion** von 15 Minuten Dauer, mit je zwei Blutentnahmen und zwei Herzfrequenzuntersuchungen, davon eine gegen Anfang und eine weitere gegen Ende dieser Submersion. Sie erhielten die Bezeichnungen Untersuchungszeitpunkt 4 und Untersuchungszeitpunkt 5.
- **Ruheentnahme**, Blutentnahme nach dem Verlassen der Tauchturmanlage und einer Ruhezeit, Untersuchungszeitpunkt 6 genannt.

Der soeben beschriebene Ablauf war bei allen drei Tauchprofilen identisch. Doch unterschieden sie sich durch:

- ❖ Die (simulierte) Tauchtiefe der zweiten Submersion
- ❖ Den variabel durchgeführten Untersuchungszeitpunkt 6, welcher sich nach den Austauschzeiten für die zweite Submersion richten musste

Parallel zu den Untersuchungszeitpunkten 2 bis 5 wurden die Herzfrequenzen der Taucher aufgezeichnet. Aufzeichnungsbeginn der Herzfrequenzen war exakt der Zeitpunkt, als die Taucher in die Turmkammer einstiegen. Das Aufzeichnungsende wurde durch die Speicherkapazität der Pulsuhr bestimmt. Meist betrug die aufgezeichnete Zeitspanne etwas mehr als 40 Minuten. So war es möglich, einen Zeitabschnitt, welcher die Untersuchungszeitpunkte 2 bis 5 (alle unter Wasser) beinhaltete, zu erfassen. Bei der Auswertung wurde dann ein Abschnitt von vier Minuten untersucht. Dieser schloss den entsprechenden Blutentnahmezeitpunkt (gleichbedeutend mit Untersuchungszeitpunkt) mit ein.

Eine Ruheuntersuchung (= 4-Minuten-Sequenz am Ende einer Ruhezeit von 15 Minuten) wurde mit einer anderen Pulsuhr zu einem früheren Zeitpunkt erstellt und als Untersuchungszeitpunkt 1 ausgewertet.

Die Überlegung, eine weitere Blutentnahme unter Druck außerhalb des Wassers durchzuführen, wurde verworfen, da diese keine weiterführenden Informationen im Rahmen der Fragestellung erbracht hätte.

### **Durchführung:**

Da es möglich war, bis zu vier Probanden zusammen in der Tauchturmanlage ihr Tauchprofil absolvieren zu lassen, wurden alle Tauchprofile zeitlich dergestalt terminiert, dass die gesamte Tauchkampagne an sieben Tagen eines Kalendermonats durchgeführt werden konnte. Jedes der drei Tauchprofile wurde viermal an vier verschiedenen Tagen gefahren.

Weil alle Probanden sich außerhalb ihrer Berufstätigkeit ehrenamtlich zur Verfügung stellten, mussten sämtliche Versuchstage auf die Wochenenden gelegt werden. Die Probanden erschienen morgens nüchtern eine Stunde vor Start des Tauchprofils zur Besprechung des geplanten Versuchsablaufes und einer abschließenden, nochmaligen Aufklärung durch den Arzt, nach welcher sie ihr schriftliches Einverständnis mit der Studienteilnahme erklärten. Erst dann erfolgte die arterielle Punktion durch den Arzt unter örtlicher Betäubung mit 1%tigem Lidocain. Diese Punktion der Arteria radialis erfolgte mittels einer flexiblen Verweilkanüle. Diese verblieb über den gesamten Verlauf des Tauchprofils in der Arterie, so dass alle Blutentnahmen lediglich eine einzige arterielle Punktion notwendig machten. Die Punktionsstelle wurde wasserdicht verbunden. Ab diesem Zeitpunkt war den Probanden kein unbeaufsichtigtes Entfernen aus dem Versuchskomplex mehr gestattet.

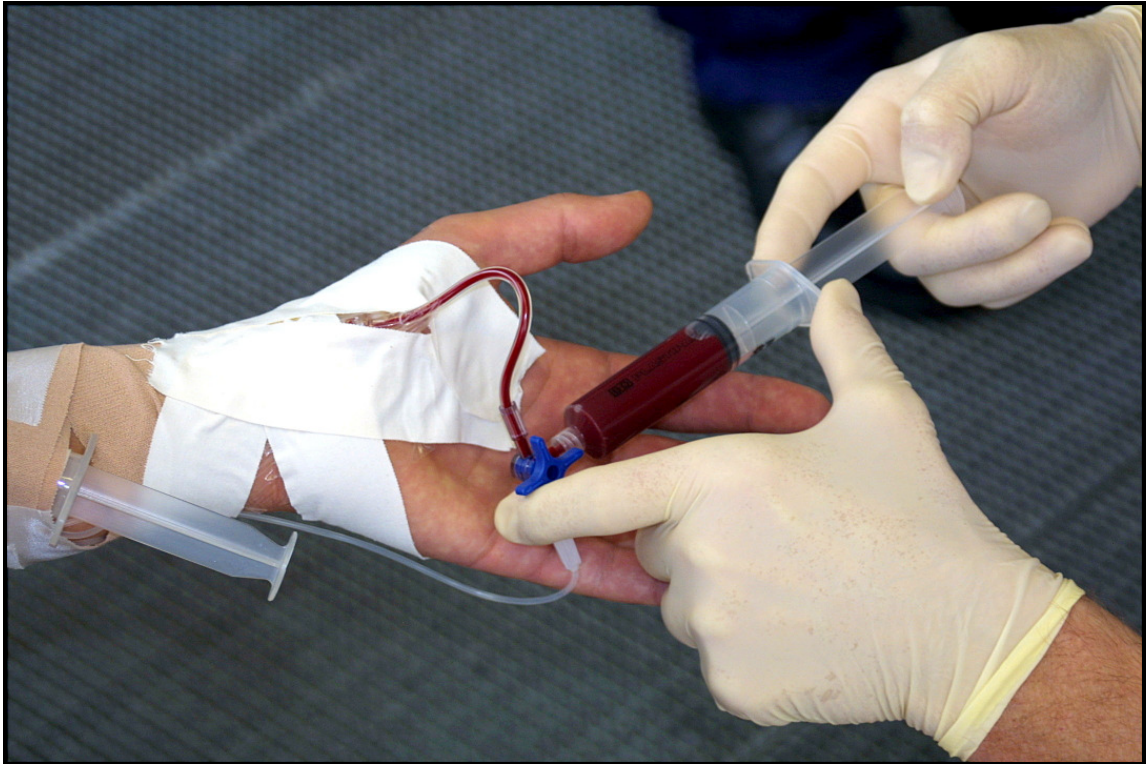
Das jeweilige Atemgas der drei Tauchprofile wurde den Tauchern schlauchversorgt über die Atemregleranlage des Tauchturmes zugeführt. Sie atmeten es vom Beginn der ersten bis zum Ende der zweiten Submersion. Die Ruheuntersuchungen bei Profilbeginn und –ende erfolgten unter Atmung der Umgebungsluft. Dies wurde für hinreichend erachtet um eine Vergleichbarkeit der erfassten Werte zu gewährleisten und hielt den technisch-organisatorischen Aufwand sowie die körperliche Belastung für die Taucher in einem verträglichen Rahmen.





**Bild 4.2: Anlegen der Pulsuhr** vor Beginn des Tauchprofils  
Aufnahme von Frank Villmow, DLRG

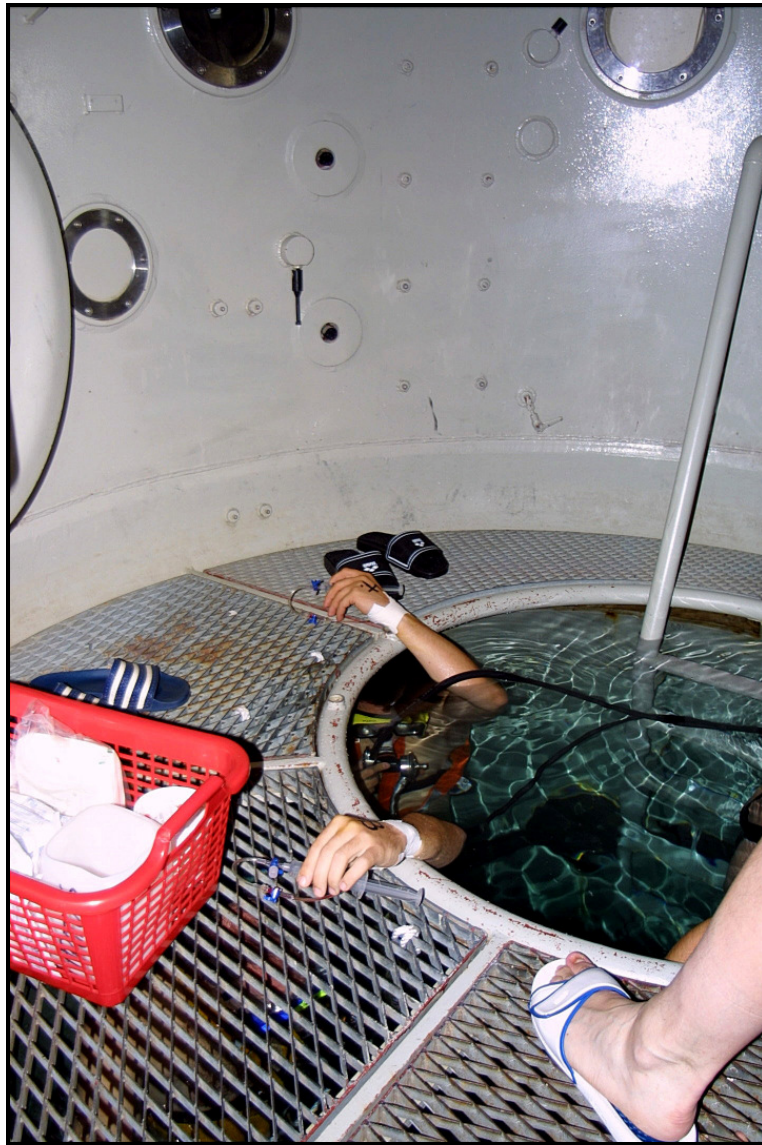
Sobald die Pulsuhren angelegt waren, nahmen die Probanden wenige Meter entfernt vom Tauchturmeinstieg auf Stühlen Platz. Dort kontrollierte der Arzt nochmals die arterielle Punktion am Handgelenk, und es erfolgte eine letzte, verbale Einweisung in das bevorstehende Tauchprofil durch den Koordinator, auf welche eine mindestens 12 minütige Ruhephase folgte. Daran schloss sich die erste Blutentnahme an. Diese wurde als formaler Beginn eines Tauchprofils festgelegt, weil ab dort bis zur fünften Blutentnahme alle Tauchprofile zeitlich kongruent sein mussten, um eine Vergleichbarkeit der Messwerte zu gewährleisten.



**Bild 4.3: Blutentnahme** zu Beginn des Tauchprofils  
Aufnahme von Frank Villmow, DLRG

Danach stiegen die Probanden in den Tauchturm, wobei zum Zeitpunkt des Einstieges in die Tauchturmanlage die Aufzeichnungsfunktion der Herzfrequenzmessgeräte gestartet wurde. Im Tauchturm erhielten die Probanden ihr Atemgas aus schlauchversorgten Atemreglern der Atemregleranlage und begaben sich, nachdem sich jeder am Ende seiner zwei Meter langen Sicherungsleine eingeklinkt hatte, sofort unter Wasser. Dort positionierten sie sich, vollständig untergetaucht, unmittelbar unter der Wasseroberfläche so, dass es ihnen möglich war, den Arm mit der punktierten Arterie (arteria radialis) auf den Gräting der Turmkammer zu legen, auf welchem sich der Arzt und sein Helfer befanden. Der Untersuchungszeitpunkt 2 folgte eine Minute nach Beginn der ersten Submersion. Der Untersuchungszeitpunkt 3 lag 11 Minuten nach dem Untersuchungszeitpunkt 2 und damit am Ende der ersten Submersion.





**Bild 4.4:** Submersion, die Unterarme der Taucher mit der punktierten Arterie befinden sich auf der Grätting der Turmkammer; Aufnahme von Frank Villmow, DLRG

Die Wassertemperatur des Tauchturmes wurde bei mindestens 28° Celsius gehalten. Bei dieser Temperatur fühlten sich die Taucher im Wasser auch ohne Kälteschutzanzüge während der gesamten Zeit der Submersionen wohl [Haux, GFK 1969].

Während der Submersion kontrollierten der Arzt und sein Helfer zwischen den Blutentnahmen manuell den Puls der Probanden am Handgelenk. Nach einer Dauer von 15 Minuten war die erste Submersion beendet.

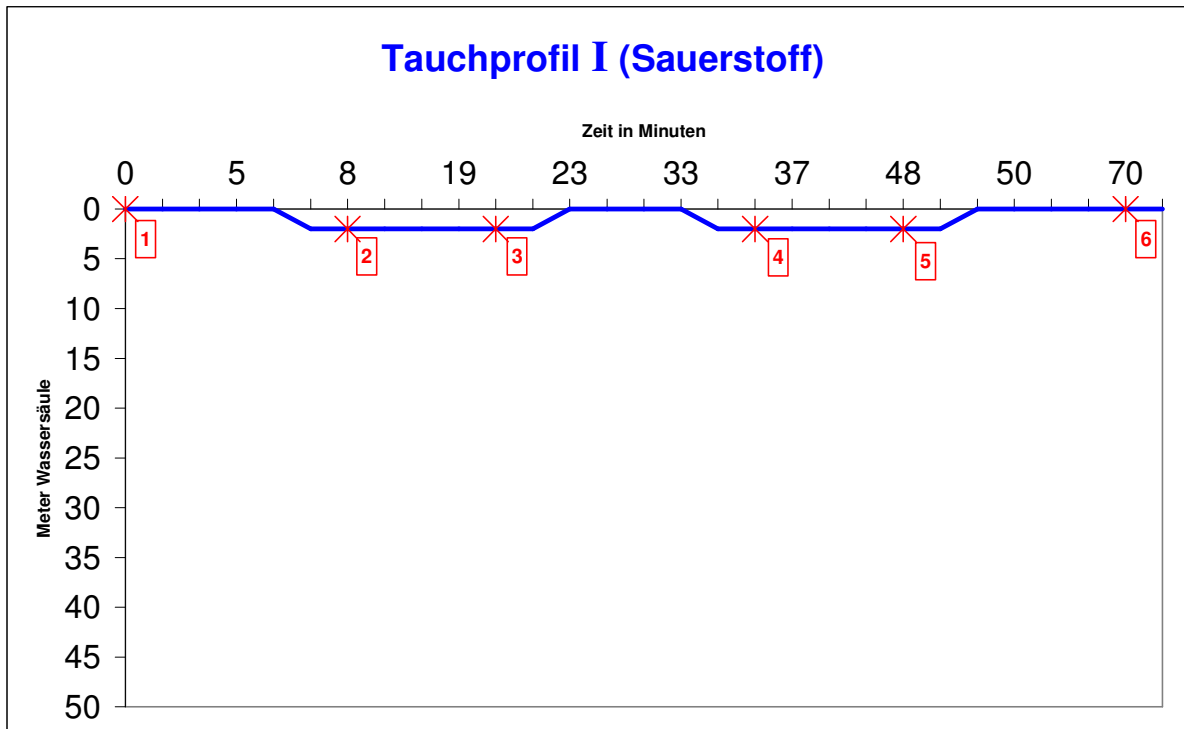
Auf die erste Submersion folgte eine Pause von 11 Minuten. Diese verbrachten die Taucher in der Turmkammer außerhalb des Wassers. Das Tauchprofil I (Atemgas Sauerstoff) lief unter normobaren Bedingungen ab. Bei den Tauchprofilen II und III (Atemgase Luft und Heliox21) wurde während der 11 Minuten zwischen den beiden

Submersionen die Tauchturmanlage geschlossen und die Wassersäule im Tauchurm mit einer Druckdifferenz von 4,2 bar über Umgebungsdruck beaufschlagt. Auf diese Weise konnte in zwei Metern realer Wassertiefe ein Druck von 5,2 bar<sub>absolut</sub> erzeugt und damit eine Tauchtiefe von 44m "simuliert" werden.

Einem Aufenthalt von 11 Minuten über Wasser in der Turmkammer schloss sich eine zweite 15minütige Submersion an. Die Untersuchungszeitpunkte 4 und 5 lagen wiederum eine Minute nach Submersionsbeginn und 11 Minuten später.

Der sechste und letzte Untersuchungszeitpunkt war eine Ruheentnahme außerhalb der Tauchturmanlage und fand stets auf eine 12 -minütige Ruhepause folgend nach dem Verlassen der Tauchturmanlage statt. Der Untersuchungszeitpunkt 6 lag bei Tauchprofil I, in welchem Sauerstoff als Atemgas verwendet wird, genau 17 Minuten nach dem fünften Untersuchungszeitpunkt. Die Tauchprofile II und III erfordern, bedingt durch die Tauchtiefe ihrer zweiten Submersion, jedoch erhebliche Austauschzeiten. Als Folge dieser Austauschzeiten beträgt bei Tauchprofil II die Zeitspanne zwischen fünftem und sechstem Untersuchungszeitpunkt 48 Minuten und 62 Minuten beim Tauchprofil III.

Mit dem Entfernen der arteriellen Punktion durch den Arzt im Anschluss an den Untersuchungszeitpunkt 6 endete das Tauchprofil. Nach einer weiteren Stunde unter ärztlicher Aufsicht durften die Probanden das Gebäude verlassen. Innerhalb der folgenden 24 Stunden waren sie angewiesen, sich im Großraum Berlin aufzuhalten und eine Notfallkarte mit den Telefonnummern des Taucherarztes und eines Ansprechpartners des Institutes für Sportmedizin der Freien Universität Berlin mit sich zu führen.

4.5.2. Tauchprofil I (100% O<sub>2</sub>)

**Diagramm 4.1: Tauchprofil I** (Die Untersuchungszeitpunkte sind durch Sternchen gekennzeichnet)

Das Tauchprofil I wurde mit reinem Sauerstoff als Atemgas gefahren. Es war das einzige der drei Tauchprofile unter ausschließlich normobaren Bedingungen. Dies hatte den Vorteil, dass zum Ein- oder Ausbringen von Gegenständen (z. B. Vacutainer mit Probandenblut) in die Tauchturmanlage oder aus ihr heraus kein Schleusungsvorgang zum Überwinden einer Druckdifferenz notwendig war. Die Stahltür des Tauchturmes, aus einem kreisförmig gewölbten Tellerboden hergestellt, konnte geöffnet bleiben.

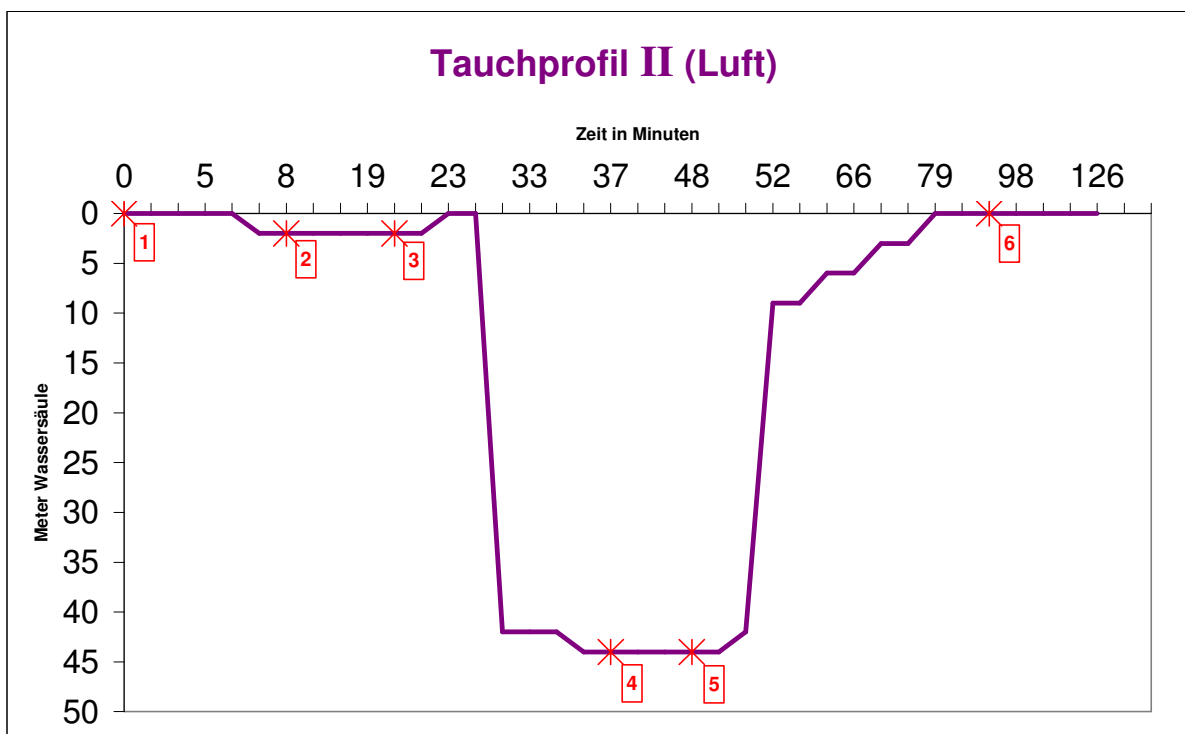
Bei jeglichem Umgang mit reinem Sauerstoff steigt die Brandgefährdung. In geschlossenen Räumen darf die zulässige Sauerstoffkonzentration 21% nicht übersteigen. In begehbaren Druckbehältern und Taucherdruckkammern, wie der Tauchturmanlage, ist es aufgrund mehrerer in der Vergangenheit geschehener tödlicher Brandunfälle, dringend angezeigt, den verordneten Grenzwert nicht zu überschreiten.

Die schlauchversorgten Atemregler der Atemregleranlage des Tauchturms leiteten das Ausatemgas der Taucher über ein Overboard-Dumping-System und eine sich daran anschließende Seitenkanalpumpe aus dem Gebäude heraus. Aus Sicherheitsgründen wurde die Atemtätigkeit der tauchenden Probanden vom Arzt und seinem Helfer in der Turmkammer ständig visuell kontrolliert. Im gesamten Trockenbereich der Tauchturmanlage waren Sauerstoffrezeptoren mit Alarmgebern installiert,

deren Funktionstüchtigkeit vor jedem Tauchprofil überprüft werden musste. Der verordnete Sauerstoffgrenzwert wurde während der Studie zu keiner Zeit überschritten.

In der Vorbereitungsphase der Studie war geplant, im Laufe des Tauchprofils I die tauchenden Probanden länger als eine ½ Stunde reinen Sauerstoff unter erhöhtem Umgebungsdruck atmen zu lassen. Dieser Gedanke wurde aufgrund tauchmedizinischer Sicherheitserwägungen verworfen. Stattdessen wurde während der ersten fünf der insgesamt elf Minuten zwischen den beiden Submersionen die Sauerstoffatmung zugunsten einer Luftatmung ausgesetzt. Damit wurde erreicht, dass die Probanden zwar während der gesamten Submersion reinen Sauerstoff atmen können, aber nicht länger als 20 Minuten am Stück der Atmung von reinem Sauerstoff ausgesetzt werden.

#### 4.5.3. Tauchprofil II (Luft)



**Diagramm 4.2: Tauchprofil II** (Die Untersuchungszeitpunkte sind durch Sternchen gekennzeichnet)

Das Tauchprofil II wurde mit Luft als Atemgas gefahren. Die erste Submersion fand unter normobaren Bedingungen statt. Wie beim Tauchprofil I konnte dabei die Tür zur Turmkammer geöffnet bleiben. Auf die erste Submersion folgte ein Aufenthalt von 11 Minuten in der Turmkammer außerhalb des Wassers. In dieser Zeit wurden alle für die Untersuchungszeitpunkte 3 und 4 erforderlichen Materialien in die Turmkammer verbracht und deren Tür geschlossen. Bis zu vier Probanden, ein Arzt und ein Helfer standen in der Turmkammer, während innerhalb von zwei Minuten die Wassersäule im Tauchturm mit einer Druckdifferenz von 4,2 bar über Umgebungsdruck beaufschlagt wurde. Nach vollendeter Kompression begann die zweite Submersion in einer realen Wassertiefe von zwei Metern bei einem Druck von 5,2 bar<sub>absolut</sub> und damit einer "simulierten" Tauchtiefe von 44m für die tauchenden Probanden. Die zu den Untersuchungszeitpunkten 4 und 5 gewonnenen Blutproben wurden über die Versorgungsschleuse der Turmkammer herausgebracht. Die zweite Submersion endete vor Beginn des Austauchens, bei dem Dekompressionstops auf 9, 6, und 3 Metern eingehalten werden mussten. Die Einhaltung der Dekompressionsstufen wurde hinsichtlich Zeit und Tauchtieferdruck vom Leitstand der Tauchturmanlage gesteuert. Nach dem Verlassen der Tauchturmanlage folgte der Untersuchungszeitpunkt 6 nach einer 12minütigen Ruhezeit.

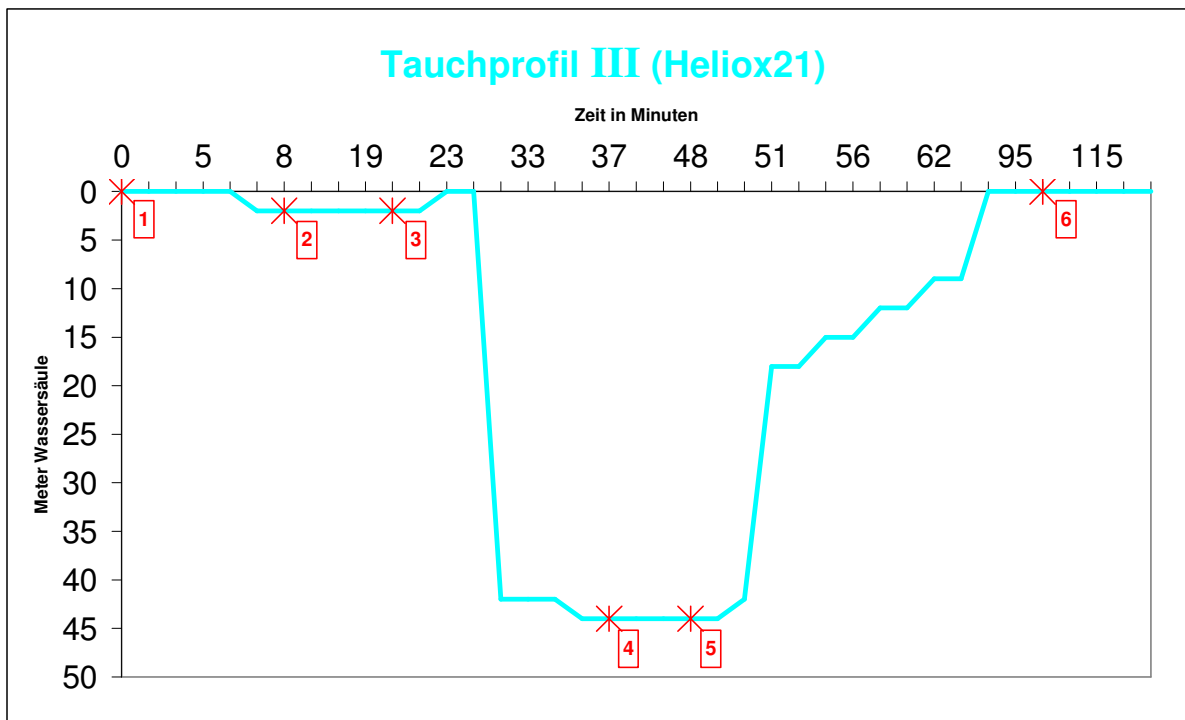


**Bild 4.5: Ausschleusungsvorgang der Blutproben** in Vacutainern, welche sich in einem Reagenzienständer befinden, den eine mit Eiswasser gefüllte, strapazierfähige Gummibadekappe umschleißt.  
Aufnahme von Frank Villmow, DLRG



Um erste Symptome einer beginnenden Dekompressionserkrankung bereits im Ansatz erkennen zu können, mussten sich die Probanden nach dem Tieftauchgang zwei neurologischen Tests unterziehen. Der erste erfolgte sofort nach dem Untersuchungszeitpunkt 6, der zweite 20 Minuten später, nachdem auch die arterielle Punktion entfernt worden war. Mit dem zweiten Neurotest endete das Tauchprofil II.

#### 4.5.4. Tauchprofil III (Heliox21)



**Diagramm 4.3: Tauchprofil III** (Die Untersuchungszeitpunkte sind durch Sternchen gekennzeichnet)

Das Tauchprofil III wurde unter der Verwendung von Heliox21 gefahren. Es ist, mit Ausnahme des verwendeten Atemgases, vom Start bis zum Beginn der Dekompression nach dem Untersuchungszeitpunkt 5 vollkommen identisch mit Tauchprofil II. Dies gilt auch für den Verlauf des Druckes über der Zeit, dem Probanden, Arzt und Helfer innerhalb der Tauchturmanlage ausgesetzt sind. Die tauchenden Probanden atmeten Heliox21 über die schlauchversorgten Atemregler der Atemregleranlage des Tauchturmes, Arzt und Helfer die Luft der Kammeratmosphäre. Der Arzt und sein Helfer atmen kein Helium, welches die menschliche Stimme schon bei einem Umgebungsdruck von 1 bar<sub>absolut</sub> stark verzerrt. Eine verbale Kommunikation der Kammerinsassen wird durch das Atemgas Helium mit zunehmender Tauchtiefe erschwert. Auf einem Druckniveau von über 11 bar<sub>absolut</sub> ist sie praktisch unmöglich [Lettnin, HKJ 1998(a)] [Weist, F 1998(a)]. Das Sättigungsverhalten menschlicher Körperge-



webearten mit dem Inertgas Helium ist ein anderes als bei Verwendung des Inertgases Stickstoff. Im vorliegenden Fall schreiben Austauschtabellen und Berechnungsverfahren, bei gleichem Druckverlauf in Kompressions- und Isopressionsphase, für das Atemgas Heliox21 eine längere Dekompression vor, als für das Atemgas Luft [Lettnin, HKJ 1998(b)].

Mit Beginn der ersten Dekompressionsstufe auf 18m wechselten die Taucher von Helioxatmung aus den schlauchversorgten Atemreglern der Atemregleranlage des Tauchturmes über zur Luftatmung in Kammeratmosphäre. Die Dekompressionsstufe auf 15m dauerte lang genug, um Taucher, Arzt und Helfer von der Turmkammer in die Hauptkammer der Tauchturmanlage übersteigen zu lassen. Die Hauptkammer bietet in der Dekompressionsphase eines Tauchganges erhebliche Vorteile gegenüber der Turmkammer. Sie kann beheizt werden, weist Sitzplätze für alle Insassen auf und ermöglicht sechs Personen die Sauerstoffatmung über separate Atemstellen der Sauerstoffatmanlage zur Verkürzung der Dekompressionszeiten. Von der Atmung reinen Sauerstoffes wurde Gebrauch gemacht, um die Inertgase im Körper der Taucher effektiver reduzieren zu können. Taucher, Arzt und Helfer atmeten auf der 9-Meter-Dekostufe für 27 Minuten reinen Sauerstoff. Nach einer Austauschzeit von 41 Minuten bei 18minütiger Bodenzeit konnten Probanden, Arzt und Helfer die Tauchturmanlage verlassen. Es folgten, wie bereits aus Tauchprofil II bekannt, der Untersuchungszeitpunkt 6 und das Entfernen der Punktion zwischen den neurologischen Tests, von denen der zweite das Tauchprofil III beendete.

#### 4.5.5. Tauchprofil I & II & III

Im folgenden Diagramm sind alle drei Tauchprofile zusammen dargestellt. Die Übereinstimmung der beiden Submersionen und der Untersuchungszeitpunkte 1 bis 5 im zeitlichen Ablauf lässt sich dabei gut erkennen.

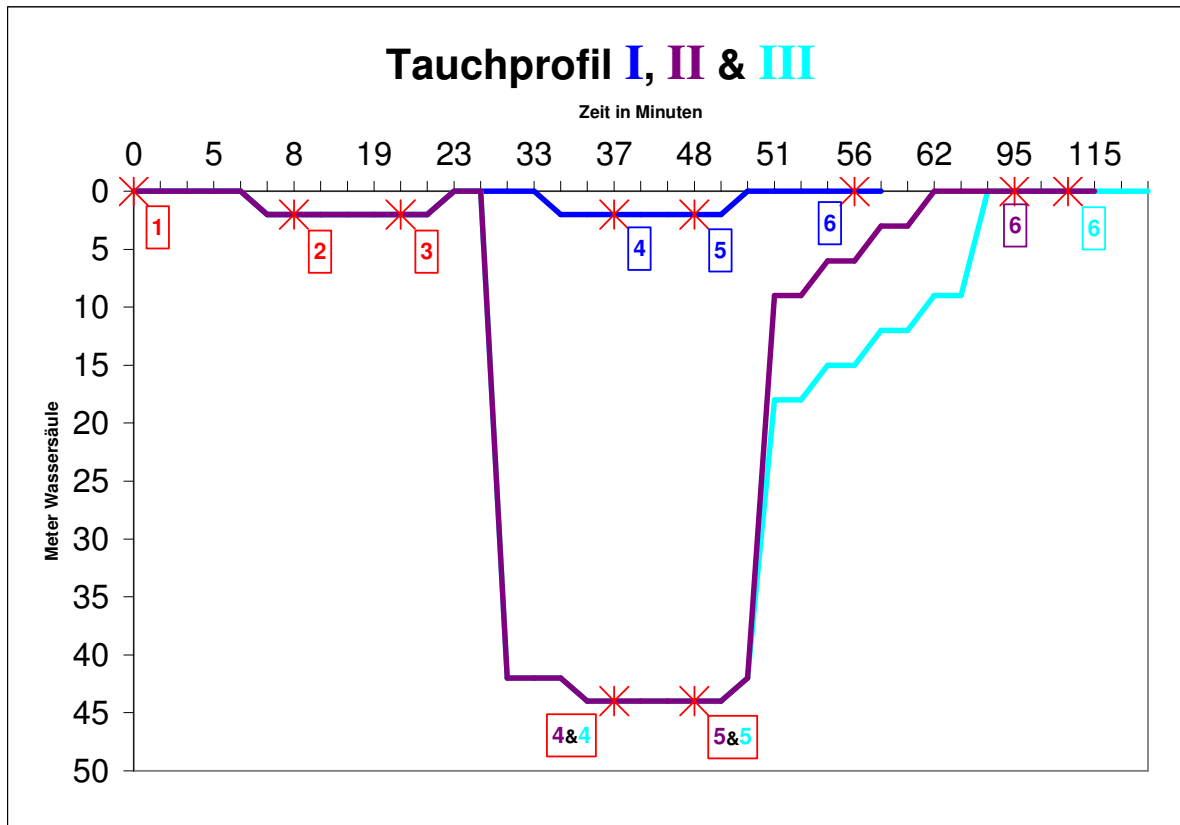


Diagramm 4.4: Tauchprofil I & II & III (Die Untersuchungszeitpunkte sind durch Sternchen gekennzeichnet)

#### 4.6. Bestimmung der Hormone

Die Hormone Adrenalin, Noradrenalin, ACTH und Cortisol wurden aus arteriellem Blutplasma bestimmt.

##### 4.6.1. Blutentnahme und Blutprobenaufbereitung

Zu den jeweiligen Blutuntersuchungszeitpunkten wurden 15 ml arterielles Blut entnommen.

Genau 5 ml Vollblut für die Bestimmung der Katecholamine wurde in vorgekühlten Vacutainerröhrchen (5 mg Glutathion, 9 mg EDTA) gesammelt, kurz auf Eis gestellt und innerhalb von 3 min bei 4 -6 °C zentrifugiert (10 min, 1700 rpm). Das Plasma wird in zwei Aliquots à 1,1 ml umpipettiert und sofort in Flüssigstickstoff tiefgefroren,

24 h bei  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  eingefroren und danach bei  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis zur weiteren Aufarbeitung gelagert.

Die Probenaufarbeitung für ACTH und Cortisol ist mit der für die Katecholamine bis auf wenige Unterschiede vergleichbar. Je 4 ml Vollblut für die Bestimmung von ACTH und Cortisol wurde in vorgekühlten EDTA-Röhrchen gesammelt und innerhalb von 3 min bei  $4 - 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zentrifugiert (10 min, 1700 rpm). Das Plasma wurde in 2 Aliquots à 0,5 ml umpipettiert, sofort in Flüssigstickstoff tiefgefroren, 24 h bei  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  eingefroren und danach bei  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis zur weiteren Aufarbeitung gelagert.

Die Blutproben der Untersuchungszeitpunkte 2, 3, 4 und 5 wurden über eine Versorgungsschleuse aus dem Tauchurm ausgeschleust, so dass die schnelle Probenaufarbeitung mit Kühlkette auch für diese Blutproben gewährleistet war. Um die fachgerechte Auswertung aller Blutproben sicherzustellen, wurde das folgende Organigramm zur Probenbehandlung erstellt.

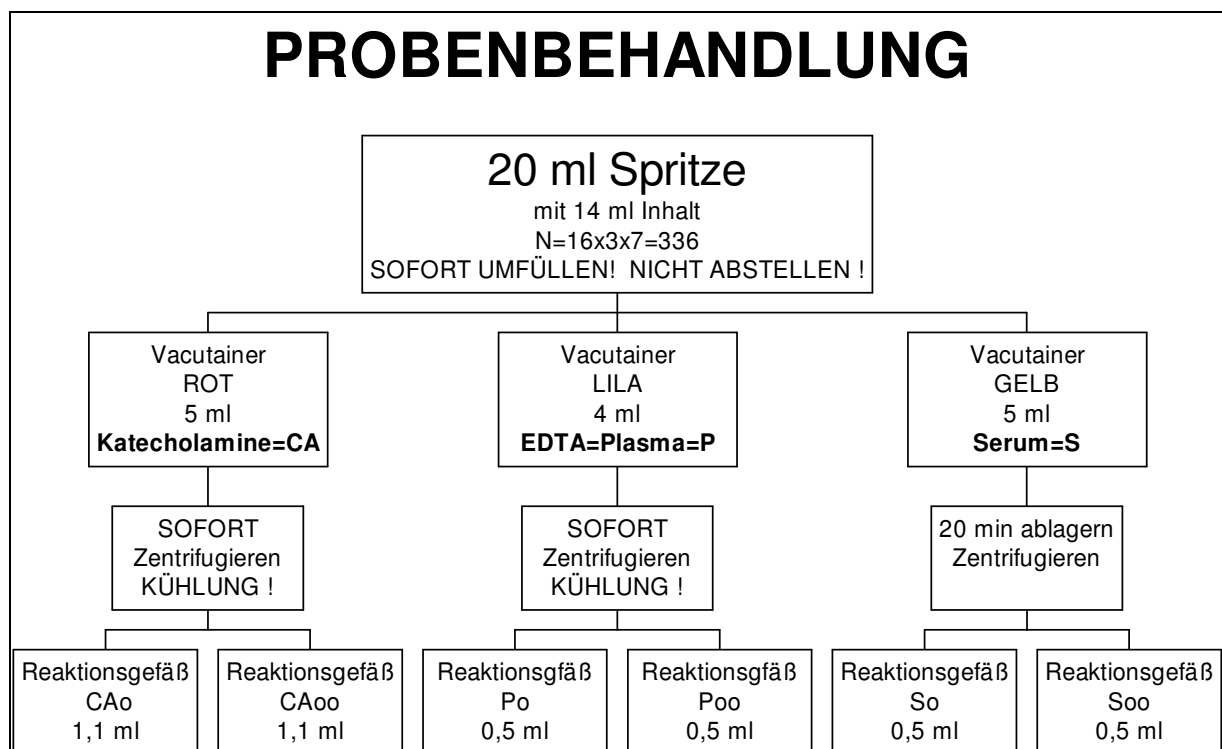


Diagramm 4.5: Merkblatt zur Probenbehandlung

#### 4.6.2. Bestimmung der Katecholamine

Nach Auftauen der eingefrorenen Plasmaproben und Zentrifugation (1700 g, 10 min, 4 °C) wird 1 ml umpipettiert und 500 µl Tris-Puffer (2mol/l, pH 8.7) sowie 10 mg aktiviertes Aluminiumoxid zugegeben. Die Proben werden 15 min (über Kopf) geschüttelt. Nach Zentrifugation wird 1 ml des Überstandes abpipettiert, kühl gelagert und später für die Bestimmung der Katecholaminsulfate verwendet. Der verbleibende Überstand wird verworfen, das Aluminiumoxid-Pellet wird dreimal mit Tris-Puffer (0.2 %; pH 8.7) gewaschen. Nach dem dritten Waschschrift wird der Überstand abgesaugt und dem Pellet zur Desorption der adsorbierten Katecholamine 120 µl Elutingreagenz zugegeben. Nach 15 min Horizontalschütteln und Zentrifugation (1700 g, 10 min, 4 °C) wird der Überstand durch Zentrifugation über einen Teflonmembranfilter (0.4 µm Porengröße) filtriert. 50 µl werden in die HPLC injiziert und nach Auftrennung über eine Reversed-Phase Säule elektrochemisch über Oxidation zu den entsprechenden Chinonen quantifiziert.

#### **Labor- und Analysegeräte zur Bestimmung der Katecholamine**

Für die Aufarbeitung der Katecholaminproben wurde ein Überkopfschüttler der Fa. Heidolph, Kehlheim, Deutschland, und ein Horizontalschüttler IKA Vibrax VXR der Fa. Janke & Kunkel, Staufen, Deutschland, verwendet. Das HPLC-System mit elektrochemischer Detektion bestand aus einem automatischen Probengeber Modell 231 der Fa. Gilson Abimed, Langenfeld, Deutschland, mit Probenkühlung über ein Kühlaggregat der Fa. Colora GmbH, Lorch, Deutschland, einer Pumpe Modell 6000A und einem coulometrischen Detektor (ESA Coulochem II; ESA Inc. Chelmsford, USA). Die Datenauswertung erfolgte computergestützt. Als analytische chromatografische Säule wurde eine Reversed-phase Säule Resolve 5µm, C18 (150 x 3.9 mm i.D.), der Fa. Millipore Waters Chromatographie, Eschborn, Deutschland, eingesetzt. Die Spannung zur Oxidation der Analyte betrug 700 mV und war gegen eine Ag/AgCl Referenzelektrode kalibriert. Die Auftrennung der Katecholamine auf der Säule erfolgte über ein Laufmittel mit nachfolgender Zusammensetzung: 50 mM Natriumacetat, 20 mM Zitronensäure, 3 mM Oktansulfonsäure, 20 µM EDTA in Aqua bidest / Methanol (94 : 4, v/v). Der pH Wert des Laufmittels wurde mit 85-prozentiger ortho-Phosphorsäure auf pH 3.5 eingestellt.

#### 4.6.3. Bestimmung von ACTH und Cortisol.

Die Plasmakonzentration von ACTH wurde mittels eines kommerziell erhältlichen Chemilumineszenz-immunometrischen Assays für Humanplasma der Firma Nichols Institute Diagnostika GmbH, Bad Nauheim, Deutschland) bestimmt. Die Plasmakon-

zentrationen von Cortisol wurden photometrisch mit Hilfe eines Enzymimmunoassays EIAgen Cortisol Kit der Fa. BioChem Immunosystems (Bologna, Italien) bestimmt.

### **Labor- und Analysegeräte zur Bestimmung von ACTH und Cortisol**

Die Plasmakonzentrationen von ACTH wurden nach Aufarbeitung der Plasmaproben luminometrisch mit Hilfe eines "Lumat LB 9501/16" der Berthold GmbH & Co KG (Deutschland) bestimmt. Die Plasmakonzentrationen von Cortisol wurden nach Aufarbeitung mit einem ELISA Reader EMAX (Fa. Molecular Devices, München, Deutschland) bestimmt.

### **4.7. Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität**

Zur Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität wurden Pulsfrequenzanzeige und -aufzeichnungsgeräte der Marke Polar, Typ Vantage NV™ verwendet. Sie werden in dieser Arbeit als Pulsuhr bezeichnet und wenige Zeilen weiter unten beschrieben.

In der Stunde vor dem Start der Tauchprofile wurden die Pulsuhren den Tauchern angelegt. Dies erfolgte in einem Abstand von mindestens 5 Metern zu anderen Pulsuhren, damit sich Sende- und Empfangseinheit auf eine eigene Arbeitsfrequenz für die Übertragung der Messwerte einstellen können.

Um den direkten Kontakt des Pulsfrequenzsensors im Brustgurt zur Hautoberfläche des Tauchers sicherzustellen, wurde zwischen Sensor und Haut ein bei Ultraschalluntersuchungen übliches Kontakt-Gel verwendet. In Einzelfällen musste die Brust der Taucher rasiert werden. Die Speichereinheit der Pulsuhr kann lediglich 4000 Herzschläge aufzeichnen. Daher wurde mit der Speicherung der Herzschläge genau in dem Moment begonnen, in dem die Taucher in den Tauchurm stiegen. Auf diese Weise sollte sichergestellt werden, dass die Untersuchungszeitpunkte 2 bis 5, welche innerhalb der Submersionsphasen lagen, im Speicher erfasst werden. Die in den Tauchprofilen mit 1 und 6 bezeichneten Entnahme- bzw. Untersuchungszeitpunkte waren Ruheuntersuchungen. Daher wurde bei jedem Probanden eine gesonderte Aufzeichnung der Herzfrequenz in Ruhe mit einer anderen Pulsuhr, deren Speicher noch leer war, durchgeführt. Eine Ruheuntersuchung pro Taucher unter Atmung von Luft wurde für ausreichend erachtet und hielt den Aufwand und die Belastung der Taucher in einem verträglichen Rahmen.

Am Abend eines jeden Tages der Tauchkampagne wurden die Speicherinhalte aller Pulsuhren auf einen PC übertragen. Anschließend wurden die Speicher der Pulsuhren gelöscht, um sie für den nächsten Versuchstag einsetzen zu können.

Dabei zeigte sich schnell, dass die verwendeten Pulsuhren immer wieder fehlerhafte Werte aufzeichneten. Bei vielen Aufzeichnungen war es unmöglich, einen auswertbaren Zeitraum von mindestens 4 Minuten zu finden, der den Zeitpunkt der Blutentnahme mit einschließt. Entgegen den vor Projektbeginn eingeholten Versicherungen der Herstellerfirma Polar arbeiteten die Geräte oft fehlerhaft. Ein bestimmungsgemäßer Gebrauch wurde durch wiederholte telefonische Anfragen bei der Herstellerfirma noch während des Verlaufs der Studie sichergestellt.

Während der Durchführung des Projektes wurde davon ausgegangen, dass jeder der Taucher das Tauchprofil II (Luft) und mindestens ein weiteres Tauchprofil durchlaufen muss, damit seine Daten bei der statistischen Auswertung berücksichtigt werden können. Durch das tägliche Auslesen der Pulsuhren stellte sich schnell ein eklatanter Mangel an verwendbaren "4 - Minuten - Sequenzen" heraus.

Deswegen wurden innerhalb der nächsten sechs Wochen nach Abschluss der Tauchkampagne mit einem Teil der Taucher weitere Ruheuntersuchungen und sogar Tauchgänge auf eine simulierte Bodentiefe von 44 Meter durchgeführt. Als Atemgas wurde Luft verwendet. Mit Ausnahme der arteriellen Punktion gab es keinen Unterschied zur zweiten Submersion im Tauchprofil II (Luft). Die Bodenzeit betrug mindestens 15 Minuten, um wenigstens für den Lufttauchgang eine zweistellige Anzahl von verwertbaren "4 - Minuten - Sequenzen" für die Untersuchungszeitpunkte 1, 4 und 5 zu erhalten.

### **Algorithmen zur Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität**

Aufgezeichnet wurde die Variabilität der Herzschlagfolge. Dazu wurden die zeitbezogenen Messgrößen r-MSSD, pNN50 sowie die frequenzbezogenen Messgrößen LF, HF und von diesen der Quotient LF/HF ermittelt. Diese Messgrößen werden folgendermaßen definiert.

**r-MSSD** [root mean square successive difference]: Ausgehend vom Abstand zweier Herzschläge (=Normal to Normal) wird die Quadratwurzel des quadratischen Mittelwertes der Summe aller Differenzen zwischen benachbarten NN-Intervallen errechnet und in Millisekunden [ms] angegeben. Höhere r-MSSD Werte weisen auf eine vermehrte parasympathische Aktivität hin.

**pNN50**: Prozentsatz der NN-Intervalle mit mindestens 50ms Abweichung vom vorausgehenden NN-Intervall. Auch hier weisen höhere pNN50 Werte auf vermehrte parasympathische Aktivität hin.

**LF, HF und der Quotient LF/HF**: LF ("Low Frequency") bildet den niedrigen Frequenzbereich ab, der die Frequenzen zwischen 0,04 und 0,15 Hz umfasst. HF ("High Frequency") bildet den Frequenzbereich zwischen 0,15 und 0,4 Hz ab. Frequenzen werden in der Dimension Hertz erfasst.

$$\frac{0,04}{s} \leq LF \frac{1,5}{s} \leq HF \leq \frac{0,4}{s}$$

Der zeitliche Abstand von einem Herzschlag zum nächsten bildet die Basis, um "Leistung" für jeden Frequenzbereich zu berechnen. Dazu wird dieser Zeitabstand zum Quadrat erhoben und alle so errechneten Zahlen eines Frequenzbereiches aufsummiert. Die Angabe der LF-Leistung und der HF-Leistung erfolgt in Millisekunden zum Quadrat, der Quotient LF/HF ist dimensionslos. Unter der Bezeichnung LF, HF und dem Quotienten LF/HF werden in dieser Studie stets die "Leistungen" des jeweiligen Frequenzbereiches angegeben.

### **Geräte zur Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität**

Als Pulsuhren wurden Pulsfrequenzanzeige und –aufzeichnungsgeräte der Marke Polar, Typ Vantage NV™ verwendet. Eine Pulsuhr besteht aus zwei am Körper zu befestigenden Geräteteilen. Einer dieser beiden Teile, ist ein Brustgurt aus Kunststoff. In diesem befinden sich der Pulsfrequenzsensor und ein Sender. Dieser Pulsfrequenzsensor im Brustgurt muss direkt und elektrisch leitend auf dem Brustkorb des Probanden aufliegen. Der Sender des Brustgurtes überträgt die Herzfrequenz an den zweiten Geräteteil. Dieser zweite Teil ähnelt einer digitalen Armbanduhr und wird am Handgelenk getragen. Beide Geräteteile sind laut Herstellerangaben wasserdicht bis in eine Tiefe von 20 Metern und sollen auch unter Wasser ohne Einschränkungen bestimmungsgemäß funktionieren. Eine Anfrage beim Hersteller ergab, dass die Gerätefunktion unabhängig von der Wassertiefe besteht, solange kein Wasser in die Pulsuhr eintritt. In einem Vorversuch wurde daher die Dichtigkeit der Pulsuhren besonders getestet. Dazu wurden alle Pulsuhren in Luft auf einen Druck von 6 bar<sub>absolut</sub> verbracht. Dort wurden sie unter Wasser getaucht und anschließend langsam auf Normaldruck von 1 bar<sub>absolut</sub> dekomprimiert. Alle Pulsuhren, aus denen Gasbläschen perlen, wurden an den Hersteller zur Wartung geschickt und erneut derartig geprüft.

Die Sende- und Empfangsbereiche mehrerer Pulsuhren können sich problemlos überschneiden, da beim Einschalten der Pulsuhr nach dem Zufallsprinzip Sender und Empfänger sich selbstständig auf eine von mehr als 900 verschiedenen Arbeitsfrequenzen einstellen und diese während der gesamten Einschaltdauer beibehalten. Das am Handgelenk zu tragende Geräteteil der Pulsuhr zeigt nach dem Einschalten die gemessenen Werte auf einem Display an. Zusätzlich verfügt es über eine Speichereinheit, welche bis zu 4000 Herzschläge aufzeichnen kann. Beginn und Ende der Speicherung können per Tastendruck gesteuert werden. Die Speichereinheit der Pulsuhr kann nach Beendigung der Messung über ein Auslesegerät auf einen PersonalComputer (PC) übertragen werden und dort mit einem Auswertungsprogramm des Herstellers weiter analysiert werden.

## 4.8. Auswertung

### 4.8.1. Datenerhebung

Die folgende Übersicht gibt Aufschluss darüber, wie viele Tauchprofile von welchen Tauchern absolviert wurden (Legende: X = teilgenommen, O = nicht teilgenommen). Der Taucher mit der Nummer 11 ist vor Beginn des ersten Tauchprofils ausgeschieden. Die Taucher 17 und 18 waren Reserveprobanden, die nicht zum Einsatz kamen, jedoch als Personal an der Tauchturmanlage mitarbeiteten.

Taucher	Tauchprofil I	Tauchprofil II	Tauchprofil III
1	X	X	X
2	X	X	X
3	X	X	X
4	X	X	O
5	X	X	X
6	X	X	X
7	X	X	O
8	X	X	X
9	X	O	X
10	X	X	X
11	O	O	O
12	X	X	X
13	X	X	X
14	X	X	X
15	X	X	X
16	X	X	X
17	O	O	O
18	O	O	O
	<b>N=15</b>	<b>N=14</b>	<b>N=13</b>

**Tabelle 4.6: Absolvierte Tauchprofile**

Diese Tabelle zeigt, dass jedes der drei Tauchprofile von mindestens 13 Probanden absolviert wurde. Nach Abschluss aller Tauchgänge existierte bei den Blutuntersuchungen für fast jeden Untersuchungsgegenstand (z.B. Noradrenalin) an jeden Untersuchungszeitpunkt (1 bis 6) eine zweistellige Anzahl von Messwerten. Nur in drei von 120 Fällen konnten lediglich acht oder neun Werte ermittelt werden. Bei den Untersuchungen der Herzfrequenz (z. B. LF) lag diese Anzahl in zwei Drittel aller Fälle bei zehn Werten oder darüber. Bei einem Drittel standen nur acht Messwerte für die Auswertung zur Verfügung, und dies, obwohl mit 11 Probanden ein simulierter Lufttauchgang auf 44m nachgeholt wurde, welcher identisch war mit der zweiten Submersion im Tauchprofil II.

Genaue Angaben über alle erfassten und in die Statistik einbezogenen Messwerte (Blut- und Herzfrequenzuntersuchungen) enthalten die Datenblätter im Anhang.



#### 4.8.2. Datenanalyse

Die statistische Analyse der erhobenen Daten wurde mit dem Softwarepaket SPSS 11.0 (SPSS Inc. Illinois, USA) durchgeführt. Die Ergebnisse wurden deskriptiv als arithmetischer Mittelwert mit ihren jeweiligen Standardfehlern ( $MW \pm SF$ ) dargestellt. Vor Durchführung der varianzanalytischen Verfahren wurden alle entsprechenden Variablen auf Normalverteilung geprüft. Die Prüfung erfolgte mittels Kolmogorov-Smirnov-Test. Als Signifikanz Test wurde der Student t-Test mit Bonferroni-Korrektur verwendet. Für die Korrelationsanalysen wurde der Pearson Korrelationskoeffizient angewendet. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5.0 % ( $p < 0.05$ ) wurde das Ergebnis als statistisch signifikant bewertet.

## 5. Ergebnisse

Die statistische Auswertung der arteriellen Konzentration von Noradrenalin, Adrenalin, Dopamin, ACTH und Cortisol zeigte bei den Untersuchungszeitpunkten 1 bis 5 keine signifikanten Änderungen bezogen auf die drei verwendeten Atemgase Sauerstoff, Luft und Heliox.

Die Konzentrationen von Noradrenalin und Adrenalin fielen am Ende der beiden Submersionen signifikant gegenüber dem zu Beginn des Tauchprofils gemessenen Ruhewert ab, lagen jedoch noch immer im Bereich der Normalwerte gesunder Probanden in Ruhe. Die arterielle Konzentration von Dopamin, ACTH und Cortisol zeigte über alle Untersuchungszeitpunkte keine signifikanten Änderungen, sie lag ebenfalls stets im Bereich der Normalwerte gesunder Probanden in Ruhe.

Bei zwei Messgrößen zur Beurteilung der Herzfrequenzvariabilität, r-MSSD und pNN50, beide aus dem Zeitbereich, zeigten sich bei einem Vergleich des Untersuchungszeitpunktes 1 (Ruheuntersuchung bei Profilbeginn) mit den anderen Untersuchungszeitpunkten überwiegend signifikante Änderungen (=Anstieg) bei den Untersuchungszeitpunkten 3 und 5, welche am Ende der beiden Submersionen lagen.

Bei einer weiteren Messgröße zur Beurteilung der Herzfrequenzvariabilität, dem LF/HF – Verhältnis aus dem Frequenzbereich, folgten die Änderungen scheinbar keiner erkennbaren Gesetzmäßigkeit.

Eine signifikante Korrelation der Absenkung des Noradrenalin- und Adrenalinwertes mit den Messgrößen zur Beurteilung der Herzfrequenzvariabilität (r-MSSD, pNN50, LF/HF – Verhältnis) konnte festgestellt werden bei Betrachtung der Untersuchungszeitpunkte 3 und 5 (am Ende der Submersionen) relativ zum Untersuchungszeitpunkt 1 (Ruheuntersuchung bei Profilbeginn). Diesen Zusammenhang nennt der Autor nach der Arbeitsbezeichnung dieser Studie **PROTOIS**-Korrelation.

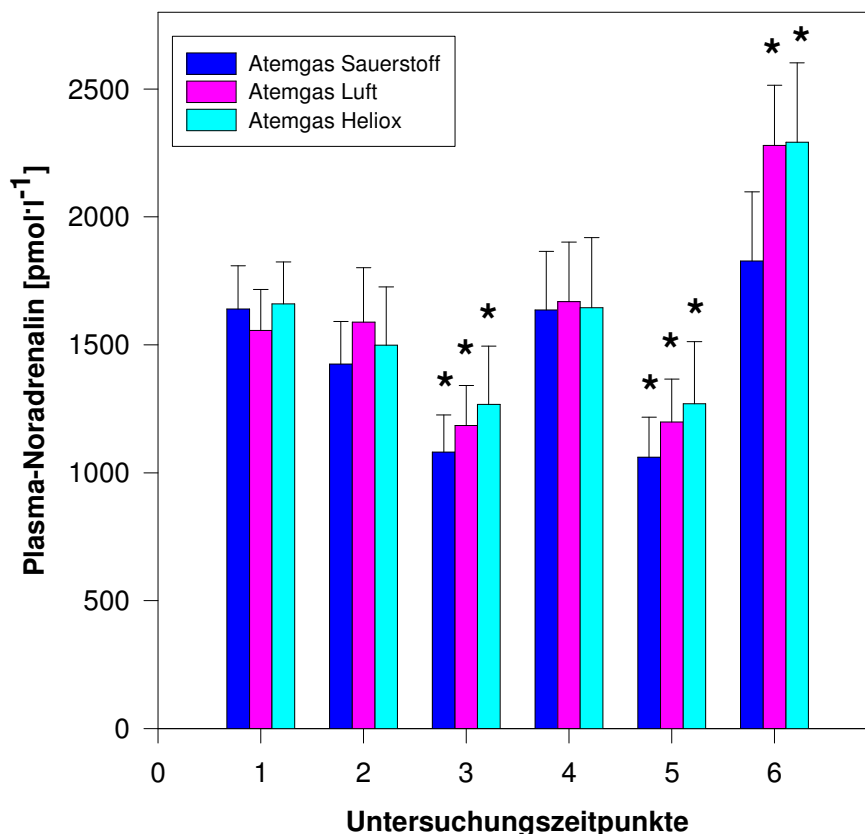
### 5.1. Hormone im arterialisierten Blutplasma

#### 5.1.1. Noradrenalin

Die Konzentrationen von Noradrenalin im arteriellen Blutplasma für die verschiedenen Untersuchungszeitpunkte und Atemgase sind aus Diagramm 5.1 ersichtlich.

Die Noradrenalinkonzentrationen des Untersuchungszeitpunktes 1 (Ruheuntersuchung bei Profilbeginn) lagen im Bereich der Normalwerte gesunder Probanden in Ruhe. [Strobel et al. 1991].

Auch hatte die Sorte des Atemgases unabhängig von der Tauchtiefe keinen Einfluss auf die NoradrenalinKonzentration im arteriellen Blutplasma. Allerdings erniedrigte sich die NoradrenalinKonzentration zu den Untersuchungszeitpunkten 3 und 5, also am Ende der beiden Submersionen, jeweils signifikant gegenüber den Ruhewerten außerhalb der Tauchturmanlage. Dies zeigte sich für alle verwendeten Atemgase. Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Untersuchungszeitpunkten 3 und 5 ist nicht vorhanden, das Absinken der NoradrenalinKonzentration erfolgt bei Submersion und die Tauchtiefe bleibt dabei ohne signifikanten Einfluss.



**Diagramm 5.1: Veränderung der NoradrenalinKonzentration im arteriellen Blutplasma.**

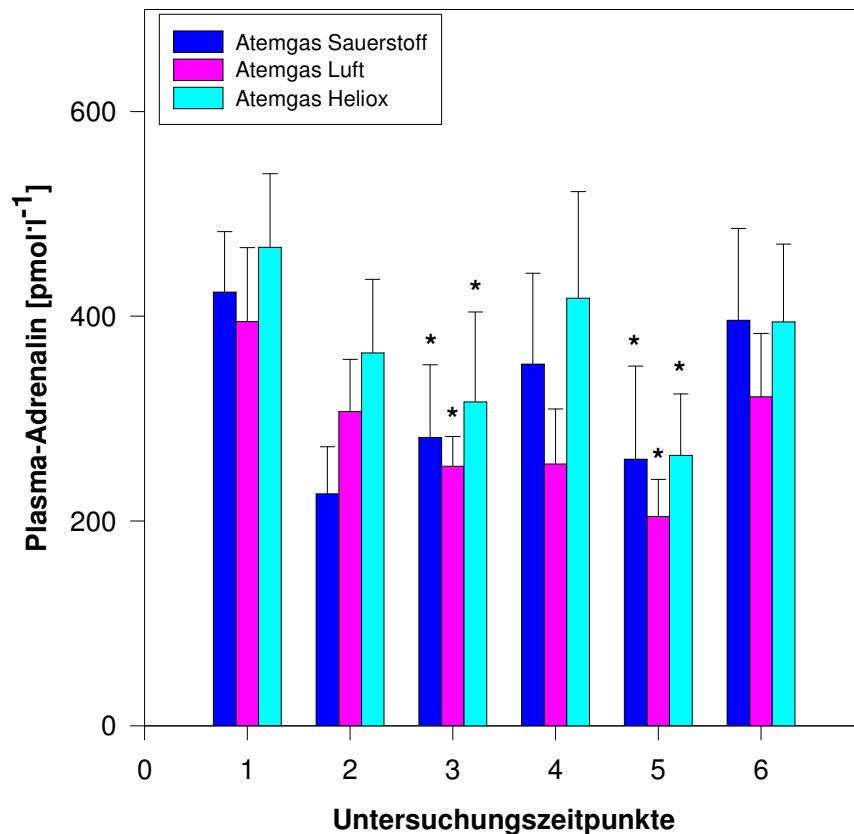
Untersuchungszeitpunkte: 1 = Ruheentnahme zu Profilbeginn, 2 = Beginn der ersten Submersion, 3 = Ende der ersten Submersion, 4 = Beginn der zweiten Submersion, 5 = Ende der zweiten Submersion, 6 = Ruheentnahme am Profilende

Alle Balken sind Mittelwerte (MW)  $\pm$  Standardfehler (SF). Der Stern\* kennzeichnet einen signifikanten Unterschied zum Untersuchungszeitpunkt 1 = Ruheentnahme zu Profilbeginn ( $p < 0,05$ ).

### 5.1.2. Adrenalin

Die Konzentrationen von Adrenalin im arteriellen Blutplasma für die verschiedenen Untersuchungszeitpunkte und Atemgase sind aus Diagramm 5.2 ersichtlich. Die AdrenalinKonzentrationen lagen für die Untersuchungszeitpunkte 1 und 6 (Ruheuntersuchung zu Beginn und am Ende der Tauchprofile) im Bereich der Normalwerte ge-

sunder Probanden in Ruhe [Strobel et al. 1991]. Die Submersion, unabhängig von Atemgas und Tauchtiefe, führte zu signifikant niedrigeren Konzentrationen gegenüber den Werten des Untersuchungszeitpunktes 1 ( $p < 0.05$ ). Sie blieben im Bereich der Normalwerte gesunder Probanden in Ruhe.



**Diagramm 5.2:** Veränderung der AdrenalinKonzentration im arteriellen Blutplasma.  
Legende siehe unter Diagramm 5.1

### 5.1.3. Dopamin

Die Konzentrationen von Dopamin im arteriellen Blutplasma für die verschiedenen Untersuchungszeitpunkte und Atemgase sind aus Diagramm 5.3 ersichtlich. Die Dopaminkonzentrationen lagen für die Untersuchungszeitpunkte 1 und 6 (Ruheuntersuchung zu Beginn und am Ende der Tauchprofile) im Bereich der Normalwerte gesunder Probanden in Ruhe [Strobel et al. 1991]. Weder die Sorte des Atemgases noch die Tauchtiefe bis 44m beeinflusste die Dopaminkonzentration im arteriellen Blutplasma signifikant. Sie lag für alle Atemgase und alle Tauchtiefen an allen Untersuchungszeitpunkten im Bereich der Normalwerte gesunder Probanden in Ruhe.

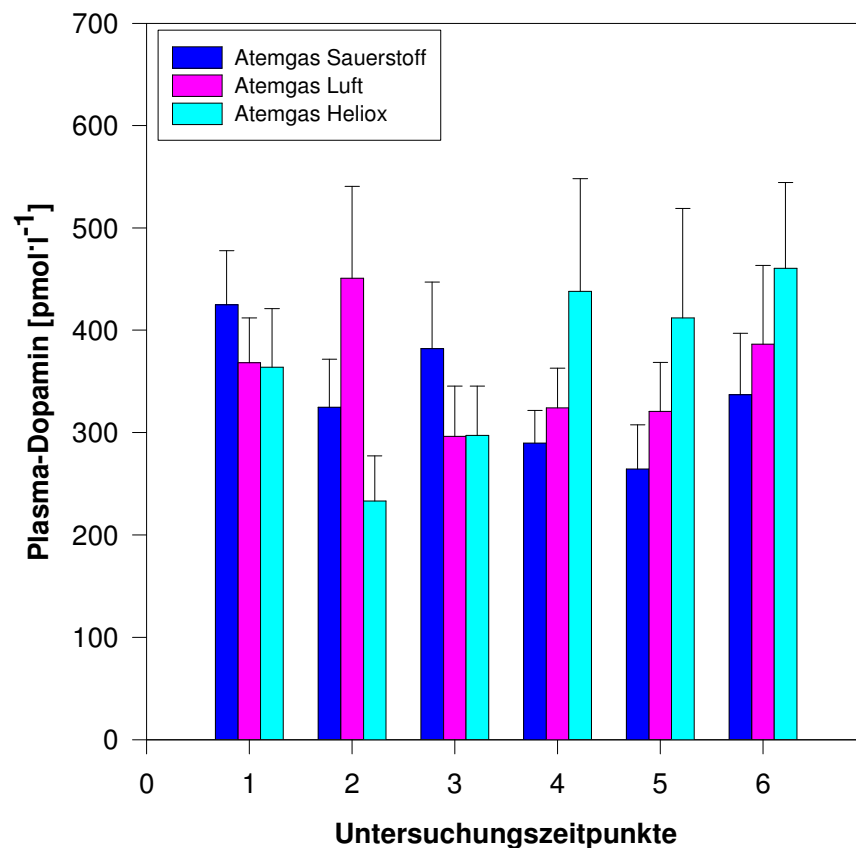


Diagramm 5.3: Veränderung der Dopaminkonzentration im arteriellen Blutplasma.  
Legende siehe unter Diagramm 5.1

#### 5.1.4. ACTH

Die Konzentrationen von ACTH im arteriellen Blutplasma für die verschiedenen Untersuchungszeitpunkte und Atemgase sind aus Diagramm 5.4 ersichtlich. Die ACTH-Konzentrationen lagen für die Untersuchungszeitpunkte 1 und 6 (Ruheuntersuchung zu Beginn und am Ende der Tauchprofile) innerhalb der Normalwerte gesunder Probanden [Strobel et al. 1991]. Weder die Sorte des Atemgases noch die Tauchtiefe bis 44m beeinflusste die ACTH-Konzentration im arteriellen Blutplasma signifikant. Sie lag für alle Atemgase und alle Tauchtiefen an allen Untersuchungszeitpunkten im Bereich der Normalwerte gesunder Probanden in Ruhe.

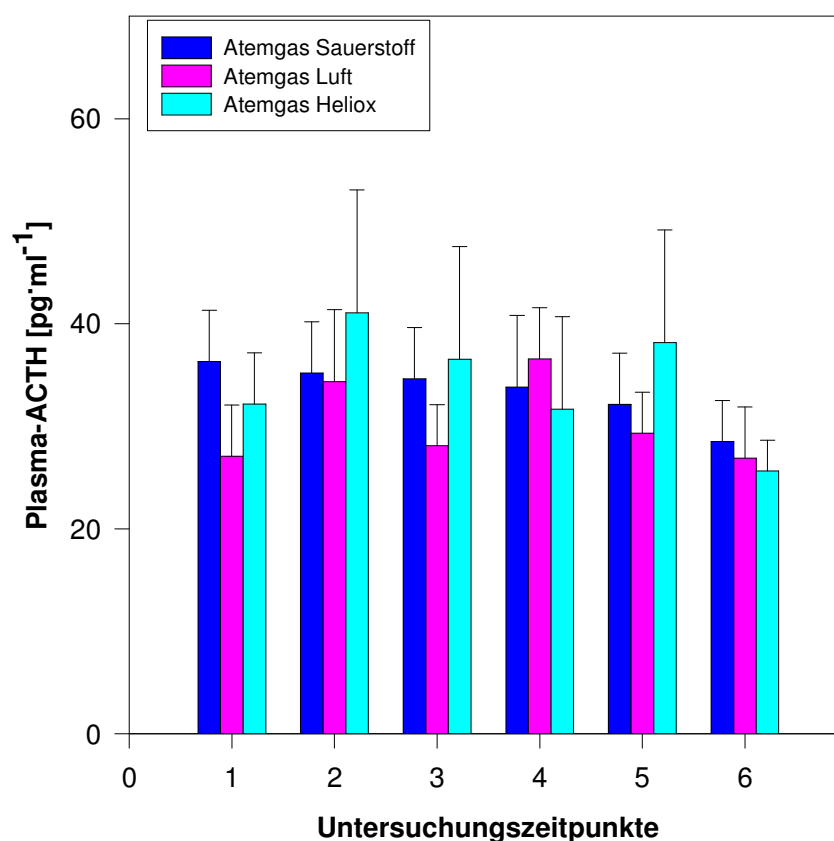
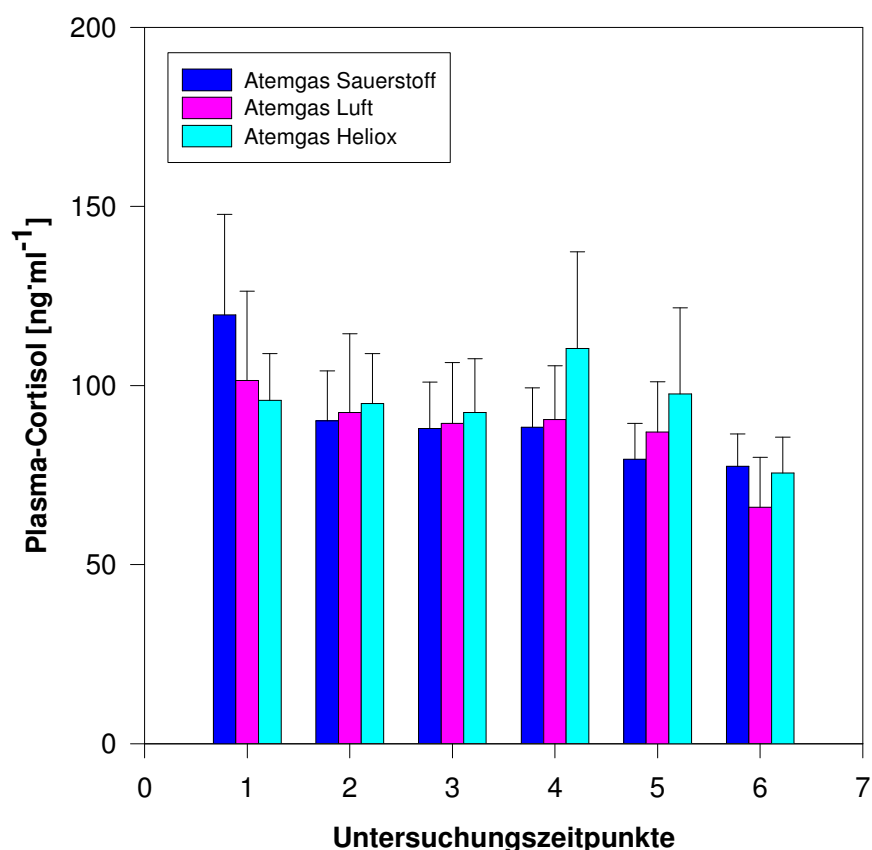


Diagramm 5.4: Veränderung der ACTH-Konzentration im arteriellen Blutplasma.  
Legende siehe unter Diagramm 5.1

### 5.1.5. Cortisol

Die Konzentrationen von Cortisol im arteriellen Blutplasma für die verschiedenen Untersuchungszeitpunkte und Atemgase sind aus Diagramm 5.5 ersichtlich. Die Cortisolkonzentrationen von lagen für die Untersuchungszeitpunkte 1 und 6 (Ruheuntersuchung zu Beginn und am Ende der Tauchprofile) innerhalb der Normalwerte gesunder Probanden [Strobel et al. 1991]. Weder die Sorte des Atemgases noch die Tauchtiefe bis 44m beeinflusste die Cortisolkonzentration im arteriellen Blutplasma signifikant. Sie lag für alle Atemgase und alle Tauchtiefen an allen Untersuchungszeitpunkten im Bereich der Normalwerte gesunder Probanden in Ruhe.



**Diagramm 5.5:** Veränderung der Cortisolkonzentration im arteriellen Blutplasma.  
Legende siehe unter Diagramm 5.1

## 5.2. Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität

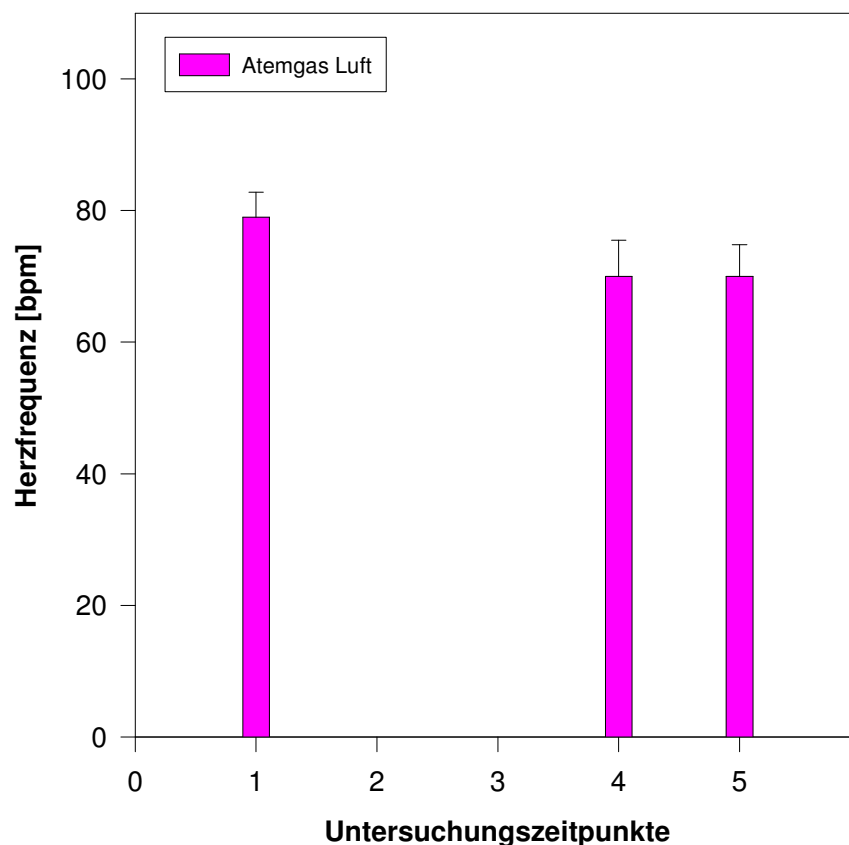
Bei der Messung von Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität ergaben sich methodische Probleme. Deswegen enthalten alle Balkendiagramme zur Herzfrequenzvariabilität lediglich einen Balken am Untersuchungszeitpunkt 1 bei Luftatmung. Weiterhin fehlen bei allen Balkendiagrammen zur Herzfrequenzvariabilität Messwerte am Untersuchungszeitpunkt 6. Ursache hierfür war die begrenzte Speicherkapazität der Pulsuhren, welche eine Verfahrensweise wie im Kapitel 4.7. beschrieben erforderte.

Wie dort bereits ausgeführt, wurden die Speicherinhalte der Pulsuhren am Abend eines jeden Tages der Tauchkampagne auf einen PC übertragen. Dabei stellte sich schnell heraus, dass die Pulsuhren zu einem erheblichen Teil fehlerhafte Werte aufgezeichnet hatten.

Obwohl mit insgesamt 11 Probanden nach Abschluss der regulären Tauchgänge nochmals Lufttauchgänge durchgeführt worden sind, gelang es mit Hilfe der Polar-Pulsuhren nicht, für alle Untersuchungszeitpunkte eine zweistellige Anzahl von verwertbaren "4 - Minuten - Sequenzen" zu erfassen.

In nahezu allen Tauchgängen der Probanden fanden sich in den mittels Polar-Pulsuhren aufgezeichneten Echokardiogrammen erratische Abschnitte. Die Auswertungs-Software gibt die Möglichkeit, diese Fehler zu glätten. Allerdings kann nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dass diese Glättung nicht auch Auswirkungen auf das Ergebnis selbst hat. Selbst nach der Glättung war die Auswertung einer geeigneten "4 - Minuten - Sequenz" bei vielen Dateien noch immer nicht möglich. Diese wurden dann nicht ausgewertet.

Wie bereits erwähnt, wurden nach Abschluss der Tauchkampagne weitere Tauchgänge mit Luft als Atemgas auf eine simulierte Bodentiefe von 44m durchgeführt. Diese lieferten eine zweistellige Anzahl verwertbarer Sequenzen. Um einen ersten Eindruck von der Änderung der Pulsfrequenzen über den Verlauf eines Tauchprofils zu vermitteln, werden diese im Diagramm 5.6 dargestellt. Aus diesem lässt sich eine leichte, jedoch nicht signifikante Absenkung der Herzfrequenz während der Submersion auf 44m im Vergleich zu den kurz zuvor erfassten Ruhewerten ablesen.



**Diagramm 5.6: Veränderung der Messgröße Pulsfrequenz, Atemgas Luft**  
Legende siehe unter Diagramm 5.1

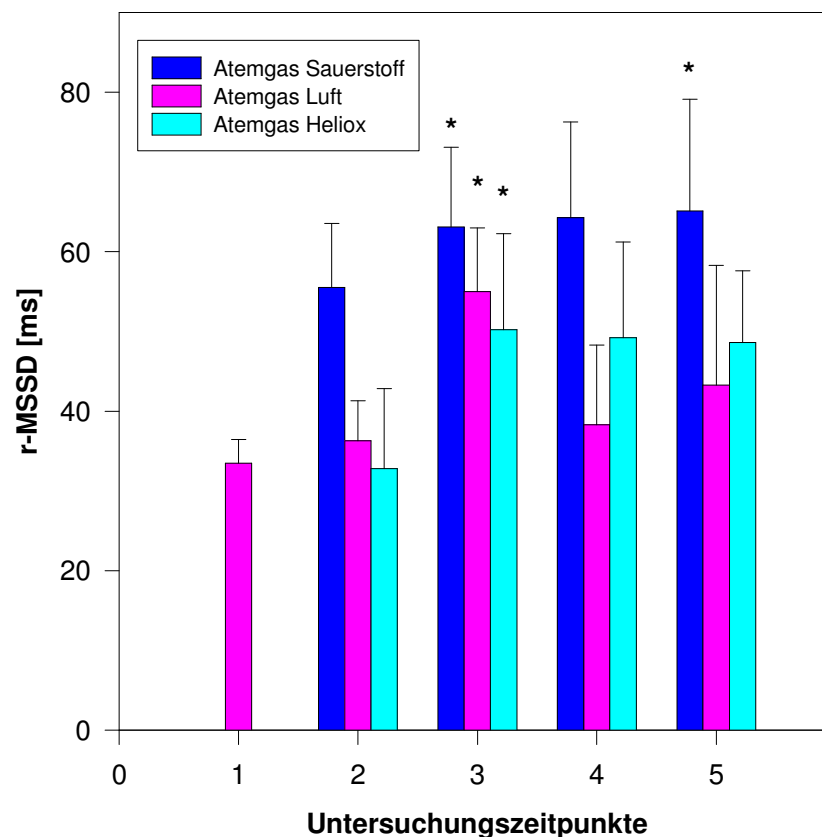


Aus der Vielzahl an Messgrößen zur Beurteilung der Herzfrequenzvariabilität wurden in der vorliegenden Studie aus dem Zeit-Bereich zwei (r-MSSD, pNN50) und aus dem Frequenz-Bereich drei Messgrößen (LF, HF, LF/HF) eingesetzt.

### 5.2.1. Messgröße r-MSSD aus dem Zeit-Bereich

Die Veränderung der Messgröße r-MSSD über den Untersuchungszeitpunkten und Atemgasen ist aus Diagramm 5.7 ersichtlich.

Der Ruhewert für r-MSSD an Luft liegt bei  $33 \pm 3$  ms (siehe Untersuchungszeitpunkt 1 im Diagramm 5.7). Am Ende der ersten und der zweiten Submersion mit Sauerstoff als Atemgas waren die Werte signifikant gegenüber dem Ruhewert an Luft angestiegen ( $p < 0.05$ ). Auch mit Luft und Heliox als Atemgas war r-MSSD am Ende der ersten Submersion signifikant erhöht ( $p < 0.05$ ). Am Ende der zweiten Submersion war dieser Anstieg nur noch in der Tendenz vorhanden (siehe Untersuchungszeitpunkt 5 im Diagramm 5.7).

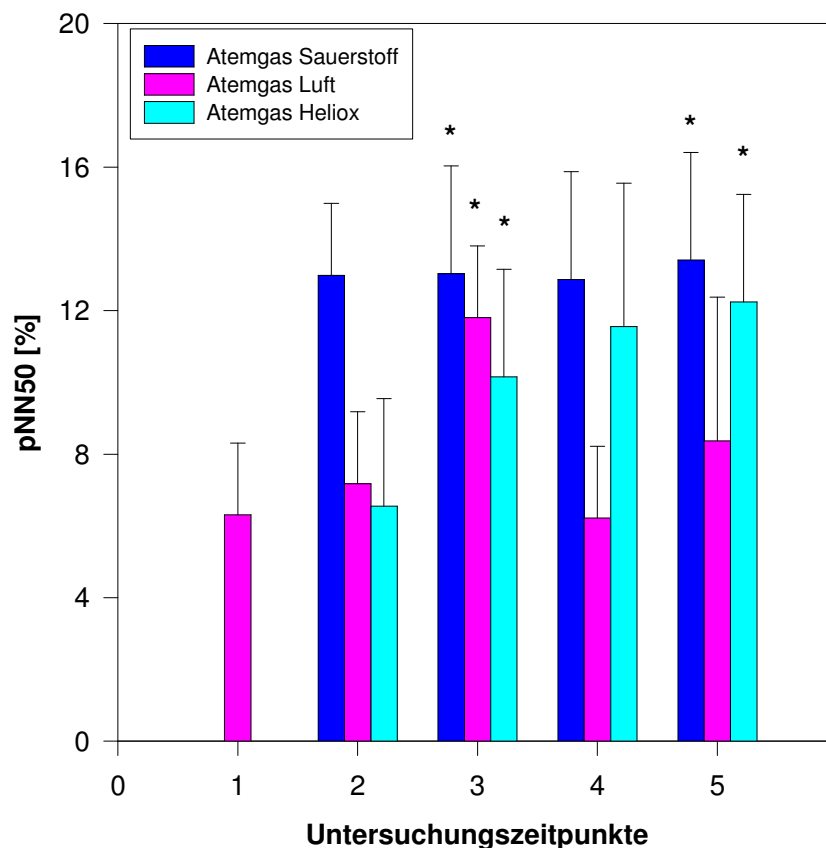


**Diagramm 5.7:** Veränderung der Messgröße r-MSSD aus dem Zeitbereich.  
Legende siehe unter Diagramm 5.1

### 5.2.2. Messgröße **pNN50** aus dem Zeit-Bereich

Die Veränderungen der Messgröße pNN50 über den Untersuchungszeitpunkten und Atemgasen sind aus Diagramm 5.8 ersichtlich.

Der Ruhewert an Luft für pNN50 liegt bei  $6 \pm 2\%$ . Am Ende der ersten und der zweiten Submersion mit Sauerstoff als Atemgas waren die Werte signifikant gegenüber dem Ruhewert an Luft angestiegen ( $p < 0.05$ ). Auch mit Luft und Heliox als Atemgas war pNN50 am Ende der ersten Submersion signifikant gegenüber dem Ruhewert erhöht ( $p < 0.05$ ). Mit Heliox als Atemgas blieb dies auch am Ende der zweiten Submersion so, während mit Luft als Atemgas der Unterschied zum Ruhewert nicht mehr signifikant war. Für die Untersuchungszeitpunkte 3 am Ende der ersten und 5 am Ende der zweiten Submersion ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Atemgasen.



**Diagramm 5.8:** Veränderung der Messgröße pNN50 aus dem Zeitbereich.  
Legende siehe unter Diagramm 5.1

### 5.2.3. Messgrößen niedrige (LF) und hohe Frequenzen (HF) aus dem Frequenz-Bereich

Die Veränderung der Messgrößen LF und HF über den Untersuchungszeitpunkten und Atemgasen sind als Zahlenwerte in tabellarischer Form im Anhang zu finden. Der Quotient aus beiden Werten wird als LF/HF – Verhältnis im folgenden Kapitel betrachtet.

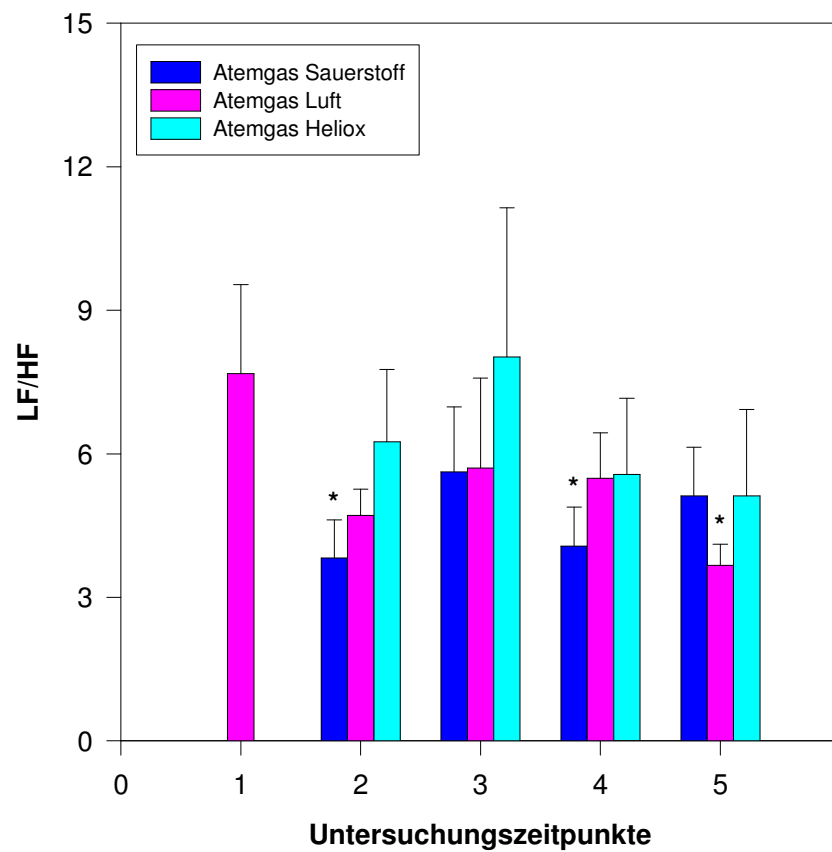
Sowohl für den niedrigen als auch den hohen Frequenzbereich zeigten weder die Tauchtiefe noch das Atemgas bei einem Signifikanzniveau von  $p < 0,05$  einen signifikanten Einfluss. Auf eine Darstellung der Ergebnisse im Balkendiagramm wird aus diesem Grund verzichtet.

Mit Sauerstoff als Atemgas zeigte sich während der Submersionen (Untersuchungszeitpunkte 2 bis 5) allerdings eine tendenzielle Zunahme im Vergleich zum Ruhewert. Dies gilt sowohl für den niederfrequenten als auch den hochfrequenten Anteil. Jedoch wurden bei allen Tauchprofilen die Ruhewerte zu Beginn und am Ende (Untersuchungszeitpunkte 1 und 6) immer unter Luftatmung gemessen, so dass der Wechsel von Sauerstoff zu Luft als Atemgas hierfür die Ursache sein kann.

### 5.2.4. Messgröße LF/HF – Verhältnis aus dem Frequenz-Bereich

Die Veränderung der Messgröße LF/HF über den Untersuchungszeitpunkten und Atemgasen sind aus Diagramm 5.9 ersichtlich.

Der Ruhewert an Luft für LF/HF liegt bei  $7.68 \pm 1.86$  %. Tendenziell zeigte sich eine Abnahme des LF/HF Quotienten. Am deutlichsten wird dies für Sauerstoff als Atemgas bei den Untersuchungszeitpunkten 2 und 4 (beide am Anfang der Submersionen) mit einem Rückgang des Quotienten um über 50 % (siehe Diagramm 5.9). Dieser Rückgang ist signifikant im Vergleich zum Ruhewert, welcher jedoch bei Luftatmung gemessen wurde. Ein Vergleich des Untersuchungszeitpunktes 5 im Tauchprofil II (Ende der zweiten Submersion unter Luftatmung) mit dem Ruhewert zeigt ebenfalls eine signifikante Absenkung.



**Diagramm 5.9:** Veränderung des Quotienten LF/HF aus dem Frequenz-Bereich  
Legende siehe unter Diagramm 5.1

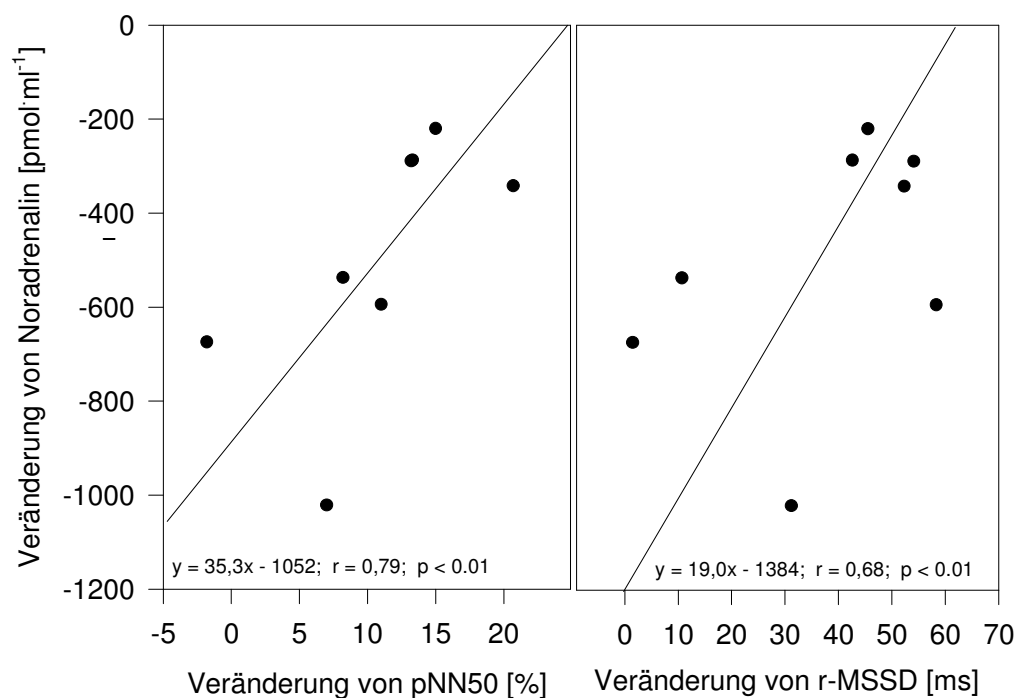
### 5.3. Korrelation von Hormonkonzentration und Herzfrequenzvariabilität

Für Noradrenalin und Adrenalin wie auch pNN50, r-MSSD und LF/HF hatten sich signifikante Veränderungen zwischen den Untersuchungszeitpunkten 1 (Ruhe vor Tauchprofil) und 3 (Ende der ersten Submersion) gezeigt. Es zeigte sich, dass Veränderungen der arteriellen Konzentrationen der Katecholamine Noradrenalin und Adrenalin mit den Veränderungen der drei genannten Messgrößen der Herzfrequenzvariabilität signifikant korrelierten (Vgl. Diagramm 5.10 bis 5.13). Dieser Zusammenhang wird vom Autor, gemäß der Arbeitsbezeichnung dieser Studie, als **PROTOIS**-Korrelation bezeichnet. Mittels der gefundenen **PROTOIS**-Korrelation und weiterer Forschungen könnte künftig das nicht invasive, wenig aufwendige und schnell auszuwertende Verfahren der Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität die arterielle Blutentnahme zur Bestimmung der Katecholamine ersetzen. Allerdings zeigen die Ergebnisse auch, dass für die Diagramme 5.10 bis 5.13 nur die Herzfrequenzvariabilitäts-Daten von etwas mehr als 50 % der Probanden ausgewertet werden konnten. Für die Veränderungen zwischen den Untersuchungszeitpunkten 1 (Ruhe vor Tauchprofil) und 5 (am Ende der zweiten Submersion) waren es nur die Daten von einem Drittel der Probanden.

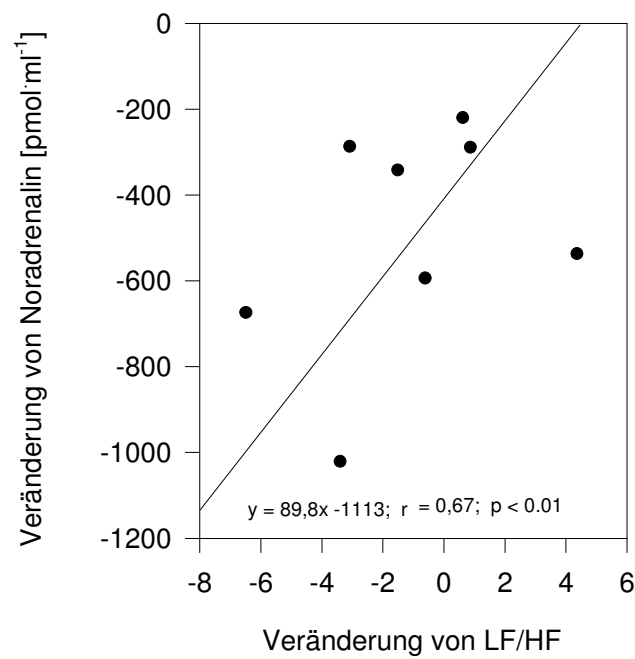
Die Anzahl der in den Diagrammen dargestellten Messwerte variiert zwischen 7 und 8. Ursache dafür ist, dass nicht jeder Taucher alle drei Profile absolviert hat. Manche nahmen an dem Luftprofil sowie einem weiteren teil. Auch beim nachgeholtten Lufttauchgang waren nicht alle anwesend. Daher stellen die acht Messpunkte nicht immer dieselben acht Taucher dar und für ein Diagramm gab es nur sieben Messwerte, die verglichen werden konnten.

### 5.3.1. Korrelation von Noradrenalin und Messgrößen der Herzfrequenzvariabilität

Die Diagramme 5.10 und 5.11 zeigen die Korrelation der Änderungen von Noradrenalin gegenüber pNN50 und r-MSSD aus dem Zeitbereich und gegenüber LF/HF aus dem Frequenzbereich. Dargestellt sind die Veränderungen zwischen den Untersuchungszeitpunkten 1 (in Ruhe zu Beginn des Tauchprofils) und 3 (Ende der ersten Submersion) für das Tauchprofil III (Atemgas Luft) bei n = 8 Probanden.



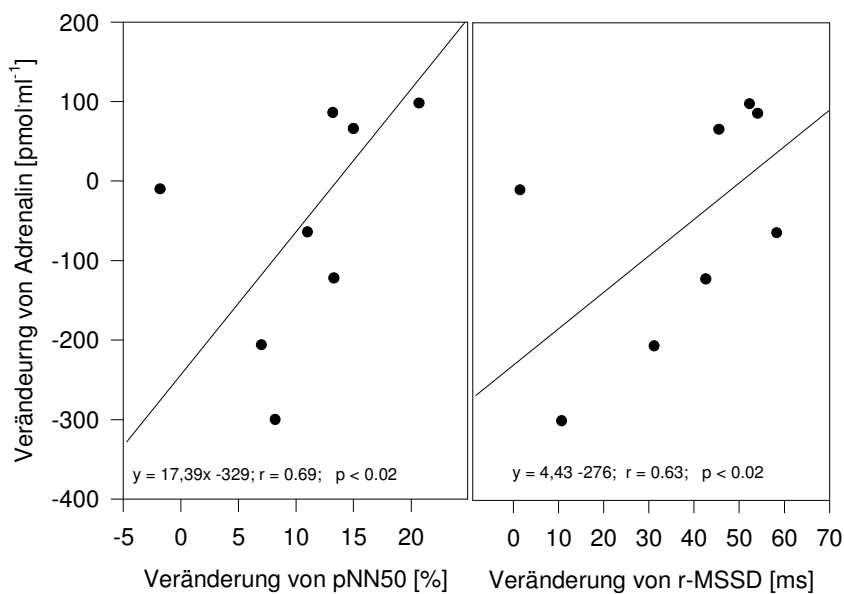
**Diagramm 5.10:** **Korrelation der Veränderung von Noradrenalin gegenüber pNN50 und r-MSSD**  
Dargestellt sind die Veränderungen zwischen den Untersuchungszeitpunkten 1 (in Ruhe vor dem Tauchprofil) und 3 (Ende der ersten Submersion) bei n = 7 bzw. 8 Probanden.



**Diagramm 5.11: Korrelation der Veränderung von Noradrenalin gegenüber LF/HF**  
Dargestellt sind die Veränderungen zwischen den Untersuchungszeitpunkten 1 (in Ruhe vor dem Tauchprofil) und 3 (Ende der ersten Submersion) bei n = 8 Probanden.

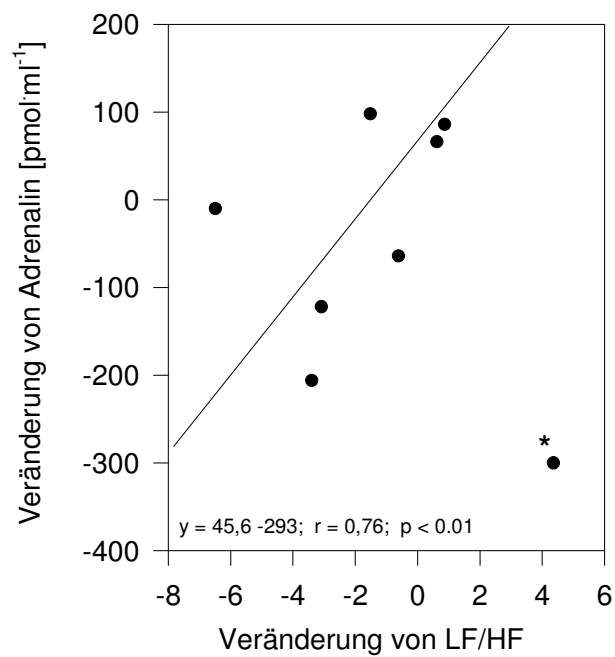
### 5.3.2. Korrelation von Adrenalin und Messgrößen der Herzfrequenzvariabilität

Die Diagramme 5.12 und 5.13 zeigen die Korrelation der Änderungen von Adrenalin gegenüber pNN50 und r-MSSD aus dem Zeitbereich und gegenüber LF/HF aus dem Frequenzbereich. Dargestellt sind die Veränderungen zwischen den Untersuchungszeitpunkten 1 (in Ruhe zu Beginn des Tauchprofils) und 3 (Ende der ersten Submersion) für das Tauchprofil II (Atemgas Luft) bei n = 7 bzw. 8 Probanden.



**Diagramm 5.12: Korrelation der Veränderung von Adrenalin gegenüber pNN50 und r-MSSD**  
Dargestellt sind die Veränderungen zwischen den Untersuchungszeitpunkten 1 (in Ruhe vor dem Tauchprofil) und 3 (Ende der ersten Submersion) bei n = 8 Probanden.





**Diagramm 5.13: Korrelation der Veränderung von Adrenalin gegenüber LF/HF**

Dargestellt sind die Veränderungen zwischen den Untersuchungszeitpunkten 1 (in Ruhe vor dem Tauchprofil) und 3 (Ende der ersten Submersion) bei  $n = 7$  Probanden. Der Stern\* bedeutet: Daten dieses Probanden wurden als Ausreißer behandelt und nicht in die Statistik miteinbezogen.

## 6. Diskussion

Die wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Studie belegen, dass Submersion an sich keine Belastung des sympathoadrenergen Systems darstellt.

Vielmehr weisen die aus arteriellem Blut bestimmten Noradrenalin- und Adrenalin-konzentrationen während der Submersion darauf hin, dass die Aktivität des sympathoadrenergen Systems unter diesen Bedingungen abnimmt. Sowohl am Ende der ersten als auch der zweiten Submersion lag die Noradrenalin-konzentration etwa 20% unter der zu Beginn der Submersion. Dabei zeigten sich keine Unterschiede zwischen den verwendeten Atemgasen (Sauerstoff, Luft, Heliox) und den untersuchten Tauchtiefen (2m versus 44m). Diese Ergebnisse spiegeln sich – trotz aller kritischen Einschränkungen der Messmethodik via Pulstester – auch in den Daten verschiedener Messgrößen der Herzfrequenzvariabilität (pNN50 und r-MSSD) wider. Die signifikant erhöhten Werte von Noradrenalin am Profilende nach Submersion stellen möglicherweise ein Rebound-Phänomen dar. Interessanterweise spiegelt sich dieses nicht signifikant in den Daten zur Herzfrequenzvariabilität wider. Insgesamt weisen die Daten der Studie darauf hin, dass während der Tauchgänge unabhängig von Atemgas und Tauchtiefe eine Entlastung und keine zusätzliche Belastung des sympathoadrenergen Systems vorliegt. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie schließen nicht aus, dass durch eine erhöhte körperliche Aktivität bei Freiwassertauchgängen und möglicherweise auch durch Kältereize wegen plötzlich fallender Wassertemperatur (Sprungschichten) oder sogar in extremen psychischen Belastungssituationen aufgrund von Tauchzwischenfällen die sympathoadrenerge Aktivität deutlich erhöht werden kann. Doch diese Einflüsse wurden in den durchgeführten Tauchprofilen absichtlich ausgeschlossen. So kamen ausschließlich Rettungstaucher mit Tauchturmerfahrung zum Einsatz. Unerwartete Ereignisse wurden aufgrund der vorliegenden "Laborbedingungen" ausgeschlossen.

Dennoch scheint nach Beendigung eines Tauchganges eine erhöhte Beanspruchung des sympathoadrenergen Systems vorzuliegen, so dass, wenn überhaupt, insbesondere in dieser Phase mit einer erhöhten Belastung des Herz-Kreislauf-Systems zu rechnen ist. Die Ergebnisse der Studie weisen zudem darauf hin, dass die Aktivität des Sympathikus auch durch Erfassung der Herzfrequenzvariabilität möglich ist und damit die aufwendige Entnahme von arteriellem Blut und Bestimmung der Katecholamine umgangen werden kann (**PROTOIS**-Korrelation).

### 6.1. Versuchsablauf

Die technische und organisatorische Zielsetzung dieser Studie bestand darin, mit drei Atemgasen (Sauerstoff, Luft, Heliox21) genau drei Tauchprofile mit je zwei Submersionen in Wassertiefen von 2m bis 44m Wassertiefe zu absolvieren. Dabei musste an sechs Zeitpunkten vor, nach und während der Submersionen den Tauchern arterielles Blut entnommen und innerhalb von maximal fünf Minuten in einer Kühlzentrifuge weiterverarbeitet werden.

Um diese Herausforderungen zu meistern, war eine ingenieurwissenschaftliche Verfahrensweise zwingend geboten. Die Anforderungen an das zu benutzende Material und die zu ergreifenden Methoden wurden im Vorfeld analysiert, eine passende technische Lösung wie in einem Konstruktionsprozess erarbeitet. Dieses Vorgehen erwies sich als richtig, denn es führte zu optimalen Ergebnissen. Technische Einrichtungen und arbeitsorganisatorische Abläufe wurden so gestaltet, dass bestmögliche Arbeitsbedingungen für die medizinische Probenentnahme gewährleistet und potenzielle Fehlerquellen bereits in der Planungsphase eliminiert werden konnten.

**Während der gesamten Tauchkampagne musste kein einziger Versuch wiederholt werden, und zu keinem Zeitpunkt war die Sicherheit der Taucher oder ihrer Umgebung gefährdet.** Es gab keine technischen Ausfälle. Die vorhandene Redundanz technischer Anlagen wurde nicht in Anspruch genommen. Keine der 1206 entnommenen Blutproben wurde durch fehlerhafte Handhabung unauswertbar. Die Sauerstoffkonzentration in der Tauchturmatmosphäre überstieg niemals den vorgegebenen Grenzwert. Keine einzige der eingerichteten Sicherheitsvorkehrungen gelangte zum Einsatz.

Eine allen Beteiligten zugängliche, detaillierte schriftliche Ablaufplanung der Tauchprofile und ihre Anordnung im Tagesablauf mit Vor- und Nachbereitung sowie sämtlichen flankierenden Tätigkeiten, welche alle jeweils einer speziell dafür qualifizierten Person fest zugeordnet waren, sorgten für ein reibungsloses Zusammenspiel aller beteiligten Kräfte.

Während seines Einsatzes bewies der im Jahre 1973 in Betrieb genommene Tauchturm, dass er auch heute noch den hohen Anforderungen, welche wissenschaftliche Forschungen an ihn stellen, voll und ganz genügt. Durch die in den letzten drei Jahrzehnten regelmäßig erfolgten Ausbaumaßnahmen befinden sich alle Sicherheitseinrichtungen der Anlage (wie z. B. Schleusen und Sauerstoffatemanlage) auf neuestem technischen Stand.

Hinsichtlich der in dieser Arbeit angewandten physiologischen Untersuchungsmethoden ergibt sich unter dem folgenden Gesichtspunkt ein erhebliches Verbesse-

rungspotenzial: Erklärtes Ziel war es, die Auswirkungen eines Tauchganges mit Drucklufttauchgerät auf das sympathoadrenerge System zu erforschen. Um die physikalischen Einflussgrößen, welche auf den menschlichen Körper wirken, spezifizieren zu können, wurde aus dem zu untersuchenden Luft-Tauchgang zuerst das Tauchprofil II, bestehend aus zwei Submersionen entwickelt. Diesem wurde je ein kongruent gestaltetes Tauchprofil mit Sauerstoff und ein weiteres mit Heliox als Atemgas an die Seite gestellt. So entstanden die Tauchprofile I und III. Alle Tauchprofile haben gemeinsam, dass ihr Betrachtungszeitraum mit einem Untersuchungszeitpunkt, der einen Ruhewert darstellt, beginnt und auch endet. Während der Submersionen wurde den Tauchern das Atemgas verabreicht, welches dem entsprechenden Tauchprofil seinen Namen gab. In den Ruhephasen am Anfang und am Ende aller Profile wurde von den Probanden jedoch stets Luft geatmet. Dieses Verfahren hielten in der Planungsphase alle beteiligten Wissenschaftler für sinnvoll. Denn schließlich war der Tauchgang mit dem Atemgas Luft derjenige, den es zu untersuchen galt. Und die Ruheuntersuchungen bei Luftatmung sollten als Basis dienen für alle späteren Vergleiche. Bei der statistischen Auswertung aller erfassten Messwerte (Blut- und Herzfrequenzmesswerte) zeigte sich, dass alle erfassten Werte eines Untersuchungszeitpunktes ohne Rücksicht auf das verwendete Atemgas zusammengekommen betrachtet werden könnten. Dies gilt für alle Untersuchungszeitpunkte mit Ausnahme des Untersuchungszeitpunktes 6 (Ruheentnahme am Ende des Tauchprofils). Diese Erkenntnis schien die eingangs getroffenen Annahmen zu bestätigen. Jedoch wurde ebenfalls klar, dass es sinnvoller gewesen wäre, auch die Ruheuntersuchungen unter Atmung des jeweils zum Tauchen verwendeten Atemgases durchzuführen. Denn dann wäre eine Aussage darüber möglich, ob sich manche Herzfrequenzmessgrößen schon signifikant ändern, wenn Sauerstoff anstelle von Luft während der Ruhephase außerhalb des Wassers veratmet wird, oder ob diese Änderung erst durch die Submersion zu stande kommt. Dieser Gesichtspunkt sollte bei künftigen Untersuchungen berücksichtigt werden.

Für die Auswertung der Herzfrequenzvariabilität wurde mit Pulsuhren der Marke Polar Vantage NV™ gearbeitet. **Erwähnenswert an eben jenen Polar-Pulsuhren ist die Tatsache, dass sie weit über die vom Hersteller angegebene maximale Einsatztauchtiefe wasserdicht waren und dabei stets die korrekte Uhrzeit anzeigten. Ansonsten erbrachten sie die vom Hersteller versprochenen Leistungen keineswegs in stetiger Reproduzierbarkeit.**

Eine für die Auswertung der Sympathikusaktivität verwendbare Aufzeichnung lieferten sie nicht einmal in 70 Prozent aller Fälle. Dies änderte sich auch nicht, nachdem in Rücksprache mit der Herstellerfirma Polar alle erdenklichen Fehlerquellen gesucht und, falls überhaupt vorhanden, ausgeschaltet wurden. So wurde peinlich genau dar-

auf geachtet, dass die Pulsuhren beim Einschalten einen Mindestabstand von fünf Metern zur nächsten Pulsuhr hatten. Sämtliche elektromechanischen Aggregate in der Tauchturmanlage wurden während der Herzfrequenzaufzeichnungen abgeschaltet. Störungen von außen werden durch den Stahlbehälter der Tauchturmanlage abgeschirmt. Da sich im selben Gebäude die Einsatzleitstelle der DLRG für den Großraum Berlin mit einer Funkzentrale befindet, wurden die Funktagebücher mit den Störungen in den Herzfrequenzaufzeichnungen verglichen. Auch dies blieb ohne Ergebnis. Im Nachhinein ist wohl davon auszugehen, dass sich die Pulsuhren gegenseitig gestört haben, obwohl dies von der Herstellerfirma Polar stets bestritten wurde. Doch haben auch andere Wissenschaftler die extreme Empfindlichkeit dieser Pulsuhren erfahren müssen. So werden diese sogar schon durch in Deutschland gebräuchliche Ampelanlagen in ihrer Funktionstüchtigkeit bis hin zur Unbrauchbarkeit gestört [Rose, Bernd; fernmündliche Mitteilung im April 2004; Technische Universität Berlin, Institut für Fahrzeugtechnik]. Obwohl versucht wurde, alle erdenklichen Fehlerquellen zu eliminieren, befanden sich in den ausgelesenen Speichern der Polar-Pulsuhren immer wieder Sequenzen, in denen überwiegend Herzfrequenzen von mehr als  $500 \text{ min}^{-1}$  gemessen wurden ! Da bei dem Vorversuch alle benutzten Polar-Pulsuhren zufrieden stellende Werte aufzeichneten, war es unmöglich, diese Schwachstelle vor Projektbeginn zu erkennen und auszumerzen. Bei der Auswertung der Herzfrequenzen mussten daher viele der unter erheblichem Aufwand aufgezeichneten Sequenzen verworfen werden.

Das gesamte im Vorversuch erprobte und in der Studie eingesetzte "medizinische Verbrauchsmaterial" erwies sich als geeignet und brauchbar.

Die ausgewählten Vacutainer zur Blutprobengewinnung erwiesen sich sowohl im Vorversuch als auch während der Durchführung des Projektes durchweg als geeignet. Aufgrund der stark veränderlichen Umgebungsdrücke mussten lediglich vor Druckänderungen die Kappen der Behälter gelockert werden, um einen Druckausgleich zu ermöglichen.

Die Lagerung der Vacutainer in Eiswasser während des gesamten Transportes erwies sich ebenfalls als zweckmäßig. Dazu wurden Reagenzglasständer von unten mit einer dehnbaren Gummibadekappe überzogen, wie sie Wettkampfschwimmer tragen. Anschließend wurden von oben Eiswürfel eingefüllt und eiskaltes Wasser. Eine weitere Absenkung der Wassertemperatur durch Frostschutzmittel erwies sich als nicht empfehlenswert, weil sich dadurch die auf den Vacutainern festgeklebten Etiketten lösen.

Die für die arterielle Punktion verwendeten arteriellen Verweilkanülen (Insyte-W, 20 G, 1.1\*30 mm von B & D) erwiesen sich als brauchbar. Zusammen mit einer (luft-

blasenfreien !) Bandage aus Pflaster und Klebeband funktionierten sie auch auf Dauer unter Wasser, erhöhtem Druck und Temperaturschwankungen.

Jedoch erforderten sie bauartbedingt die ausgeprägte Handfertigkeit eines erfahrenen Anästhesisten, der regelmäßig diese Art von Eingriffen an seinen Patienten vornimmt.

Als ein Glücksgriff erwies sich die Kooperation zwischen Freier Universität und der Deutschen Lebens-Rettungs-Gesellschaft im Rahmen dieser Studie. Nur durch ehrenamtliche DLRG-Mitarbeiter konnte die Durchführung dieser Studie in der beschriebenen Form sichergestellt werden. Das Zahlenverhältnis zwischen Mitarbeitern der FU und der DLRG betrug während der Durchführung der Tauchprofile durchschnittlich eins zu drei, unter Einbeziehung der Probanden sogar eins zu vier. Alle ehrenamtlichen Mitarbeiter und Probanden der DLRG zeichneten sich durch die gleiche überdurchschnittliche Zuverlässigkeit aus wie die hauptamtlichen Angestellten der Freien Universität Berlin. Eine Durchführung der Tauchprofile mit bezahltem Personal gleicher Qualifikation und Motivation hätte den finanziellen Rahmen dieser Studie bei weitem gesprengt und so ihr Zustandekommen verhindert.

Bereits in der Planungsphase dieser Studie, mehrere Monate vor dem Beginn der Tauchprofile, wurde ein treffender Name entwickelt und unter der Bezeichnung **PROTOIS-PROJEKT** als Handelsmarke beim Patentamt in Berlin eingetragen. Dieses Pseudonym entstammt dem Vierten Gesang der Odyssee von Homer. Ab der 365sten Zeile ist dort zu lesen, dass Proteus ein Meeresherr der altgriechischen Mythologie war, Untertan des Poseidon [Homer 1979]. Dieser Proteus sorgte bei Menelaos, dem Gemahl der Helena, als jener nach dem Trojanischen Krieg auf der Heimfahrt auf der ägyptischen Insel Pharos gestrandet war, gewaltig für Aufregung und somit sicherlich auch für eine erhöhte Ausschüttung von Katecholaminen [Homer 1983].

Nachdem die Schreibweise des Eigennamens neuzeitlicher Aussprache angepasst worden war, erwies sich der einprägsame Projektname bei der späteren Präsentation der Studie in Presse, Funk und Fernsehen von großem Vorteil. Als ein geschütztes Warenzeichen ist seine Verwendung durch andere Institutionen oder Firmen ausgeschlossen. Auch war durch die kleine Änderung in der Schreibweise ein neues, bisher nicht vorhandenes Wort entstanden, und bei der Eingabe des Begriffes **”PROTOIS-PROJEKT”** in gebräuchliche Internetsuchmaschinen wurden mit höchstmöglicher Trefferdichte alle relevanten Internetseiten ausgeworfen.

## 6.2. Hormone im arterialisierten Blutplasma

### 6.2.1. Noradrenalin

Die Bestimmung von Noradrenalin aus arteriellem Blut ist ein genauerer Indikator für die Beurteilung der Sympathikusaktivität als die Bestimmung aus venösem Blut, da Veränderungen in der Konzentration nahezu ausschließlich aus dem veränderten Noradrenalinspillover herrühren, während Veränderungen der Blutkonzentration von Noradrenalin im Venenblut eine Bilanz aus Spillover und Clearance darstellt. Eine genaue Beurteilung der Sympathikusaktivität durch Bestimmung von Noradrenalin aus Venenblut ist folglich nur dann möglich, wenn die Clearance als konstant angenommen wird. Dies aber ist unter vielen Untersuchungsbedingungen nicht der Fall. Die Bestimmung der arteriellen Blutkonzentration von Noradrenalin lässt also eine genauere Aussage über die Veränderungen der Sympathikusaktivität unter den verschiedensten Tauchbedingungen zu.

Beim Apnoetauchen führt der Tauchreflex beim Menschen zu einer Absenkung der Ruheherzfrequenz um bis zu ca. 20 Schläge/min. [Stegemann et al. 1969]. Die Ursachen hierfür sind im Wesentlichen das vergrößerte intrathorakale Blutvolumen, die veränderten Druckverhältnisse im kleinen Blutkreislauf und die verbesserten venösen Rückflussbedingungen. Die Ausführungen von Stegemann et al. zum Tauchreflex beziehen sich ausschließlich auf's Apnoetauchen. Beim Tauchen mit Atemgerät tritt dieser jedoch nicht auf [Jung, Stolle, 1981]. Eine neuere Forschungsarbeit [Pelzer, Schipke et al, 2001] belegt einen moderaten Rückgang der Pulsfrequenz beim Tauchen mit Gerät, wobei die Taucher zwanglos ruhig in geringer Wassertiefe verweilten. Dies entspricht auch unseren Beobachtungen.

Die Tauchbradykardie aber scheint nicht Sympathikus-vermittelt zu sein, da es unter Tauchbedingungen nicht zu einer Abnahme des systolischen Blutdruckes kommt, den man erwarten müsste, wenn eine Hemmung der Sympathikusaktivität Ursache der Bradykardie sein sollte. Vielmehr kann sie als eine Vaguswirkung angesehen werden, da sie durch Atropin zu unterdrücken ist. In der vorliegenden Studie jedoch wurden erstmals unter diesen Untersuchungsbedingungen erniedrigte Konzentrationen arterieller Noradrenalinspiegel gemessen. Diese weisen auf eine verminderte Aktivität des sympathoadrenergen Systems hin. Allerdings ist bekannt, dass die Änderungen in der Sympathikusaktivität lokal auftreten und in der Regel nicht überall. Zudem gibt es zahlreiche Einflüsse auf die Sympathikusaktivität, die auch unter Tauchbedingungen auftreten können. Obwohl sich in einer Studie von Anegg et al. (2002) bei einem Tauchgang unter psychischem Stress im Vergleich zu einem entspannten Tauchgang keine Unterschiede in der Konzentration von Noradrenalin zeigten, können psychische Einflussfaktoren nicht ausgeschlossen werden. Eine

Vielzahl an Überwasser-Studien belegt dies. Unter psychischem Stress im Alltag können die Konzentrationen von Noradrenalin deutlich bis um das Drei- bis Zehnfache ansteigen. So fanden sich sowohl bei einem Stroop- Farben-Wort-Konflikt-Test als auch bei mathematischen Tests unter Zeitdruck Anstiege der NoradrenalinKonzentrationen im venösen Blut um das Zwei bis Vierfache und unter massivem psychischem Stress wie der Übermittlung einer Nachricht mit hohem emotionalem Inhalt Plasmakonzentrationen von Noradrenalin, die mehr als das dreifache gegenüber dem Ruhewert erhöht waren [Martimportugues-Goyenechea et al. 2005; Hoshikawa et al. 1997; Lechin et al. 2004]. In der vorliegenden Studie wurden erfahrene Taucher der DLRG als Probanden rekrutiert, um tauchbedingte psychische Stressreaktionen zu minimieren.

Auch physischer Stress hat wesentlichen Einfluss auf die Katecholaminkonzentrationen. Je nach Belastungsintensität steigen die Konzentrationen um das 2 bis 40-fache [Kjaer et al. 1992; Strobel et al. 1999]. Da bei moderaten Tauchgängen etwa eine Verdoppelung bis Vervierfachung der Sauerstoffaufnahme (als Maß der Belastungsintensität) in Ruhe gefunden wurde [Pendergast et al. 1996], was etwa einem Anstieg der Belastungsintensität auf 30-60% der  $VO_2max$  entspricht, sind unter diesen Tauchbedingungen nur geringe Anstiege der Katecholaminkonzentrationen zu erwarten. Kjaer et al. (1992) finden signifikante Anstiege der Katecholaminkonzentrationen im Blutplasma erst ab etwa 40 - 50% der  $VO_2max$ . Die Studie von Anegg et al. (2002) bestätigt dies. Die Konzentration von Adrenalin stieg im Venenblut bei einem entspannten Tauchgang um lediglich 90% an, von Noradrenalin um 150%. In der vorliegenden Studie wurden physische Einflüsse auf die Sympathikusaktivität dadurch ausgeschlossen, dass die gesamte Untersuchung unter Ruhebedingungen durchgeführt wurde.

Unter diesen standardisierten Tauchbedingungen zeigte sich in unserer Studie ein signifikanter Abfall der arteriellen NoradrenalinKonzentration am Ende der jeweiligen Submersionen. Dieser Abfall der Katecholaminkonzentration wird nicht durch die Tauchtiefe (2m versus 44m) beeinflusst. Die NoradrenalinKonzentration im Arterienblut am Ende der Submersion lag für Luft als Atemgas signifikant um etwa 20% unter den Ruhewerten bei Beginn der Tauchprofile. Man hätte annehmen können, dass Sauerstoff als Atemgas infolge der Hyperoxie eine Senkung der Sympathikusaktivität auslöst. Allerdings spielt nach unseren Ergebnissen die Zusammensetzung der Atemgase (Sauerstoff, Luft, Heliox) keine Rolle hinsichtlich der Sympathikusaktivität. Für alle drei Atemgase zeigen sich vergleichbare Abfälle der Sympathikusaktivität. Verschiedene, ähnliche Studien, in denen das Verhalten der Katecholaminkonzentration unter Submersionsbedingungen untersucht wurde, wenn auch aus Venenblut bestimmt, zeigen ebenfalls eine Abnahme der NoradrenalinKonzentration



während der Submersion. So wird in einer Studie von Larsen et al. (1994) ein Abfall der Noradrenalin-Konzentration um etwa 30% bei Immersion beschrieben. Als Erklärung wird die Zunahme des Zentralen Blutvolumens [Norsk et al. 1990] genannt. Selbst durch eine Kopf-im-Wasser-Maßnahme wird die Noradrenalin-Konzentration um etwa 15% gesenkt.

Doch wie kann dieser Abfall beim Noradrenalin erklärt werden, wenn laut Stegemann eine unveränderte Sympathikusaktivität beim Tauchen vorliegt und die Ursache der Bradykardie durch den Parasympathikus verursacht wird? Zur Beantwortung dieser Frage sind weitergehende Forschungen erforderlich, welche in ihren Untersuchungen klar trennen zwischen Immersion und Submersion, sowie zwischen einer Submersion mit und ohne Atemluftversorgung (Apnoetauchen versus Gerätetauchen).

Forschungen zur Änderung der arteriellen Katecholamin-Konzentration bei Hochleistungs-Apnoetauchern wurden 2004 von Ehrmann et al. veröffentlicht. Auf einem simulierten Nasstauchgang begaben sich zwei Probanden in 20 Meter Wassertiefe und bewältigten Apnoezeiten von 3:55 min und 5:05 min. Dabei zeigten bei den beiden Hochleistungs-Apnoetauchern bereits vor den Tauchversuchen hohe arterielle Katecholamin-Konzentrationen, welche allerdings in den darauf folgenden Messungen unmittelbar nach dem Tauchgang sowie 10 und 30 Minuten später unverändert blieben. Die Autoren folgern daraus, dass eine tauchbegleitende Veränderung der Katecholamin-Konzentrationen -wie sie bei tauchenden Wedell-Robben zu beobachten ist- für die Hochleistungs-Apnoetaucher nicht nachgewiesen werden kann. Die erhöhten Katecholamin-Konzentrationen führen die Forscher auf eine für die Taucher ungewohnte Situation und deren extrem hohe persönliche Motivation zurück.

Besonders auffällig sind in unserer Studie die Werte des Untersuchungszeitpunktes 6 (Ruheuntersuchung am Profilende), die signifikant über den Werten des Untersuchungszeitpunktes 1 (Ruheuntersuchung bei Profilbeginn) lagen. Auf Schwankungen im Tagesrhythmus lassen sich diese Änderungen nicht zurückführen. Derartige tageszeitabhängige Schwankungen treten vorwiegend bei Cortisol und ACTH auf und dann vorwiegend in den frühen Morgenstunden zwischen 5<sup>00</sup> und 8<sup>00</sup> Uhr. Daher kann dieser Effekt zwar nicht völlig ausgeschlossen, jedoch bei diesen Untersuchungen vernachlässigt werden.

Vergleicht man den Untersuchungszeitpunkt 1 (Ruheuntersuchung zu Profilbeginn) mit dem Untersuchungszeitpunkt 6 (Ruheuntersuchung am Profilende) so zeigt sich eine signifikante Erhöhung der Plasmakonzentrationen von Noradrenalin am Untersuchungszeitpunkt 6.

Als Ursache kann eine Veränderung der Druckverhältnisse als Folge des fehlenden Wasserdruckes an Land angenommen werden. Sobald der Taucher das Wasser

verlässt, entfallen augenblicklich die dort wirkenden Auftriebskräfte. Durch die Schwerkraft sackt Blut, welches sich beim Tauchen im Brustraum befand, in die Beinvenen. Vergleichbare Änderungen finden sich auch bei Lagewechseln von sitzend nach stehend oder ausgeprägter von liegend nach stehend [Cryer et al. 1980; Weicker et al. 1986]. In diesen Studien erhöhte sich die Noradrenalin-Konzentration im Venenblut um 50 – 150%.

Unter gesundheitlichen Aspekten weisen die Änderungen der Noradrenalin-Konzentration sowohl in 2m als auch in 44m simulierter Tauchtiefe in Bezug auf die Sympathikusaktivität auf kein erhöhtes Risiko beim Tauchen hin. Vielmehr scheinen Tauchbedingungen zu einer herabgesetzten Sympathikusaktivität führen. Erst nach Beendigung des Tauchganges an Land könnte man aufgrund der erhöhten Konzentrationen von Noradrenalin ein erhöhtes Herz-Kreislauf-Risiko annehmen. Allerdings werden für eine blutdrucksteigernde Wirkung von Noradrenalin Anstiege der Plasmakonzentrationen um ca. 500 – 800% benötigt [Hjemdahl et al. 1993], die weit über den von uns gemessenen Anstiegen von 50 – 100% liegen. Jedoch ist zu beachten, dass während eines Tauchganges zumindest moderate physische Belastungen mit Anstiegen der Noradrenalin-Konzentration um 100 – 200% möglich sind (in Belastungsspitzen können sicherlich auch darüber hinausgehende Konzentrationen erreicht werden) und dass vor allem bei unerfahrenen Tauchern eine deutliche Sympathikusaktivierung hinzukommen kann.

### 6.2.2. Adrenalin

Adrenalin als Indikator für das sympathoadrenerge System wird vor allem unter psychischen Belastungen, aber auch unter physischen Belastungen freigesetzt. Psychische Stressbelastungen erhöhten die Adrenalin-Konzentration im Venenblut signifikant. So stieg die Adrenalin-Konzentration nach einer moderaten psychischen Stressbelastung (Wort-Farben-Test) um Faktor 2 [Hoshikawa et al. 1997], intensivere Stressbelastungen wie z.B. die Adrenalin-Konzentrationen vor dem ersten Fallschirmsprung stiegen im Vergleich zum Ruhewert um den Faktor 6 an [Richter et al. 1996]. Unter physischen Belastungen können die Anstiege der Adrenalin-Konzentration noch ausgeprägter sein. So führte eine submaximale Belastung von 75% der maximalen Sauerstoffaufnahme auf dem Laufband und einer Belastungsdauer von einer Stunde im Venenblut zu einer auf das Achtfache erhöhten Konzentration [Strobel et al. 1994], verglichen mit Ruhebedingungen. Eine maximale, erschöpfende Belastung bei 140% der maximalen Sauerstoffaufnahme erhöhte die Adrenalin-Konzentration um den Faktor 15 [Strobel et al. 1999]. In der vorliegenden Studie nahm die Konzentration von Adrenalin im arteriellen Blut am Ende der beiden Submersionen bei

allen drei verwendeten Atemgasen (Sauerstoff, Luft, Heliox) signifikant ab. Es ist daher davon auszugehen, dass erstens keine signifikanten psychischen und physischen Stressbelastungen unter den gegebenen Untersuchungsbedingungen vorliegen. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen der Studie von Anegg et al. (2002). In der Anegg-Studie steigt die Konzentration von Adrenalin im Venenblut bei einem entspannten Tauchgang lediglich um 90% an. Zweitens scheint eine Submersion unter den gegebenen Versuchsbedingungen die Aktivität des sympathoadrenergen Systems zu senken. Da dies sowohl für 2m als auch für 44m Tauchtiefe in gleichem Maß gilt, ist davon auszugehen, dass die Abnahme der sympathoadrenergen Aktivität unabhängig von der Tauchtiefe ist. Eine Abhängigkeit der sympathoadrenergen Aktivität von der Zusammensetzung des Atemgases scheint ebenfalls nicht gegeben. Lediglich für Sauerstoff als Atemgas ist im Gegensatz zu den anderen beiden Atemgaszusammensetzungen bereits zu Beginn der Submersion in 2m Tauchtiefe ein signifikanter Abfall der AdrenalinKonzentration festzustellen, Allerdings konnte dieser signifikante Abfall der AdrenalinKonzentration zu Beginn der Submersion in 44m Tauchtiefe nicht mehr gezeigt werden.

### 6.2.3. Dopamin

Obwohl immer wieder zur Diskussion gestellt [Kuchel 1999], scheint Dopamin keine wesentliche regulative Funktion in der Peripherie zu besitzen. Dies zeigen Studien zum Verhalten von Dopamin unter psychischen wie physischen Belastungen. So zeigten sich beispielsweise keine Veränderungen in der Dopaminkonzentration im Venenblut nach einem Wort-Farben-Test [Farrell et al. 1987]. Auch nach körperlicher Aktivität unterschiedlichster Dauer und Intensität (Sprintbelastungen, Marathonlauf) blieb die Konzentration von Dopamin unverändert [Weicker et al. 1992]. Gleiches gilt nach der vorliegenden Studie auch für die Bestimmung von Dopamin aus arteriellem Blut während des Tauchens in verschiedenen Tauchtiefen und mit verschiedenen Atemgasen.

### 6.2.4. ACTH und Cortisol

Wie das sympathoadrenerge System spielt die hypothalamisch-hypophysäre Nebennierenrindenachse eine wesentliche Rolle in Zusammenhang mit den Auswirkungen von akutem und chronischem psychischem Stress. Während ACTH und Cortisol als Wirkungsvermittler der hypothalamisch-hypophysären Nebennierenrindenachse bei psychischer Belastung zumeist vergleichbar reagieren, finden sich unter physischer Belastung deutliche Unterschiede. So steigt ACTH unter körperlicher Be-

lastung signifikant auf das Vielfache seiner Ausgangskonzentration unter Ruhebedingungen an, zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Belastungsintensität und zeigt diesen Anstieg bereits nach etwa einer Minute Belastung. Nach Belastungsende fällt die Konzentration an ACTH schnell wieder ab [Elias et al. 1991]. Cortisol zeigt unter körperlicher Belastung ebenfalls Anstiege, allerdings keine signifikante Abhängigkeit von der Belastungsintensität, und die höchsten Konzentrationen an Cortisol werden zumeist nach Belastungsende und nicht während Belastung gemessen [Raastad et al. 2000]. Ursache hierfür ist die Zeitverzögerung bei der Cortisol-synthese. In der vorliegenden Studie werden beide Hormone durch Submersion nicht beeinflusst, unabhängig von der Tauchtiefe und von der Zusammensetzung des verwendeten Atemgases. In der Literatur finden sich keine Hinweise darauf, dass beide Hormone schon einmal unter vergleichbaren Bedingungen gemessen worden.

### 6.3. Herzfrequenzvariabilität

So aussagekräftig die Bestimmung der Katecholamine Adrenalin und Noradrenalin nach arterieller Punktion als Maß der sympathoadrenergen Aktivität ist, so schwierig ist die praktische Anwendung. Die Anforderungen an die handwerklichen Fähigkeiten des punktierenden Arztes sind sehr hoch. Es ist empfehlenswert, diesen Eingriff nur von jemandem ausführen zu lassen, der ihn mehrmals pro Woche vornimmt. Auf diese Weise wurde verfahren, um das Risiko für die Taucher so gering wie möglich zu halten. Zudem liefert die Beurteilung der sympathoadrenergen Aktivität via Bestimmung der Katecholamine im Blut nur Einblick in ein kurzes Zeitfenster. Ursache ist die kurze Plasmahalbwertszeit der Katecholamine von ein bis drei Minuten [Kjaer et al. 1992]. Auch wenn mit der Bestimmung der Katecholaminsulfaten eine Alternative zur Verfügung steht mit einem auf etwa vier Stunden verlängerten Zeitfenster [Strobel et al. 1999], wäre die dauerhafte und zeitnahe Beurteilung der sympathoadrenergen Aktivität und zudem der parasympathischen Aktivität durch Messung der Herzfrequenzvariabilität von erheblichem Vorteil.

Zur Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität wurden Pulsfrequenzanzeige und –aufzeichnungsgeräte verwendet. Mit diesen Pulsuhren der Marke Polar, Typ Vantage NV™, stand nach Herstellerangaben ein Gerät zur Verfügung, welches geeignet sein sollte, die Herzfrequenzvariabilität online und auch unter Wasser zu messen. Wie die praktischen Erfahrungen bezüglich der Herzfrequenzvariabilitätsmessung, beschrieben im Kapitel "4.7 Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität", zeigen, ist die Verwendung dieses Gerätes wenig geeignet, um wiederholt zuverlässige Daten zu erhalten. Dies ist auch der Grund für die hohe Rate an nicht auswertbaren Probanden-

daten. Überdies ist die Verwendung der Herzfrequenzvariabilität zur Beurteilung der Parasympathikus- und Sympathikusaktivität nach wie vor in der Diskussion. Zu viele Faktoren beeinflussen die Daten sowohl aus dem Frequenzbereich als auch aus dem Zeitbereich: Alter, Atmung, Trainingszustand, Intensität der körperlichen Belastung, psychische Belastung [Aubert et al. 2003]. In der vorliegenden Studie wurden zahlreiche dieser Einflussgrößen standardisiert, um deren Einwirkungen auf die Daten zur Herzfrequenzvariabilität möglichst gering zu halten.

### 6.3.1. Messgrößen r-MSSD und pNN50 aus dem Zeit-Bereich

r-MSSD und pNN50 werden durch Submersion signifikant beeinflusst. So steigt r-MSSD am Ende der Submersion auf 2m Tauchtiefe für alle drei untersuchten Atemgase im Vergleich zum Ruhewert unter Luftatmung bei Profilbeginn signifikant an. In 44m Tauchtiefe findet sich ein signifikanter Anstieg für das Atemgas Sauerstoff, nicht aber für Luft und Heliox. Ein ähnliches Bild zeigt sich für pNN50. Auch hier zeigt sich am Ende der Submersion auf 2m Tauchtiefe ein signifikanter Anstieg bei allen drei untersuchten Atemgase. Ein Unterschied zwischen den Atemgasen ist nicht zu finden. In 44m Tauchtiefe allerdings bleibt pNN50 lediglich für Sauerstoff und für Heliox als Atemgas signifikant erhöht, während mit Druckluft als Atemgas zwar tendenzielle aber keine signifikanten Steigerungen zu den Ruhewerten unter Luftatmung bei Profilbeginn feststellbar sind. r-MSSD und pNN50 sind beides Messgrößen, die zeitliche Abweichungen zwischen aufeinander folgenden NN-Intervallen der Herzschläge widerspiegeln. Beide sind proportional zur parasympathischen Aktivität. Die Anstiege beider Messgrößen r-MSSD und pNN50, am Ende der jeweiligen Submersion weisen folglich auf eine gesteigerte Parasympathikusaktivität hin und damit auf eine für die Untersuchungsbedingungen verminderte Herz-Kreislauf-Belastung. Allerdings zeigen sich am Ende der zweiten Submersion diese Veränderungen von r-MSSD und pNN50 nicht mehr. Signifikante Anstiege von r-MSSD sind für diesen Untersuchungszeitpunkt lediglich noch für Sauerstoff als Atemgas und von pNN50 für Sauerstoff und Heliox als Atemgas zu finden, nicht jedoch für Luft. Und Luft ist das übliche Atemgas bei Tauchgängen im Freizeitbereich.

Es kann spekuliert werden, dass es sich eher um einen Effekt der Tauchtiefe handelt, als um einen Zeit-Effekt. Doch lässt sich mit Hilfe der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht bestimmen, welcher Wirkmechanismus diesen Effekt verursacht.

Für Sauerstoff als Atemgas bleiben r-MSSD und pNN50 auch nach der zweiten Submersion erhöht (beide Submersionen wurden auf gleicher Tauchtiefe durchgeführt), während für Luft als Atemgas die zweite Submersion bis auf simulierte 44m Tauchtiefe erfolgte. Interessanterweise fanden sich für die untersuchten Hormone No-

radrenalin und Adrenalin keine Hinweise auf eine Abhängigkeit ihrer Freisetzung von der Tauchtiefe (Vgl. Diagramme 5.1 und 5.2). Schipke et al. (2002), fanden aber vergleichbare Veränderungen von r-MSSD und pNN50 während einer Submersion. In dieser Schipke-Studie sollten Taucher während eines zehnmütigen Aufenthaltes unter Wasser in kompletter Taucherausrüstung und auf dem Boden eines 4m tiefen Schwimmbeckens knien. Unter diesen Tauchbedingungen waren r-MSSD und pNN50 um das Zweifache respektive das Vierfache angestiegen. Neben dieser Studie gibt es keine Literaturhinweise auf andere Studien, welche die Herzfrequenzvariabilität unter Submersionsbedingungen mit Tauchgerät gemessen hat.

### 6.3.2. Messgrößen niedrige (LF) und hohe Frequenzen (HF) sowie LF/HF – Verhältnis aus dem Frequenz-Bereich

LF, HF und der Quotient LF/HF stellen frequenzbezogene Messgrößen dar. Veränderungen von LF werden vor allem Veränderungen der Sympathikusaktivität zugeschrieben, während die HF-Daten Veränderungen in der Parasympathikusaktivität widerspiegeln. In der vorliegenden Studie blieben sowohl LF als auch HF unter allen Untersuchungsbedingungen unverändert und weisen auf keine veränderten Aktivitäten von Sympathikus und Parasympathikus im Vergleich zu den Kontrollbedingungen hin. Diese Ergebnisse der frequenzbezogenen Messgrößen stehen im Widerspruch zu den zeitbezogenen. Hier waren sowohl r-MSSD und pNN50 am Ende der ersten und der zweiten Submersion signifikant angestiegen und deuteten auf eine gesteigerte Parasympathikusaktivität hin. Der Quotient LF/HF wiederum zeigte für Sauerstoff als Atemgas zu Beginn der ersten und zweiten Submersion einen signifikanten Abfall gegenüber dem Untersuchungszeitpunkt 1 (Ruheuntersuchung zu Profilbeginn unter Luftatmung). Dies zumindest deutet auf eine gesteigerte Parasympathikusaktivität und steht im Einklang mit den Daten der zeitbezogenen Messgrößen. Insgesamt sind die Ergebnisse aber uneinheitlich und widersprüchlich. Dies findet sich aber auch in anderen Studien wieder. Schipke et al. (2001) finden in ihrer Studie bei Submersion und beim Tauchen mit Drucklufttauchgeräten in 4m Tauchtiefe eine signifikant erhöhte Spektraldichte im HF Bereich. Dies deutet sowohl auf eine erhöhte Sympathikus- als auch Parasympathikusaktivität hin. Der Quotient LF/HF wiederum spricht für eine Dominanz des Parasympathikus unter den gegebenen Tauchbedingungen. Als eine Ursache hierfür wird von Pelzer, Schipke et al (2001) die veränderte Atemfrequenz während Submersion und Gerätetauchen im Vergleich zu den Kontrollbedingungen an Land angenommen. Die von ihnen gemessene Atemfrequenz beträgt 13 Atemzüge pro Minute an Land, sinkt geringfügig auf 12/min bis 11/min

während der Immersion und fällt deutlich ab auf 7 Atemzüge pro Minute während des Tauchens mit Gerät.

Es ist bekannt, dass eine Abnahme der Atemzugfrequenz die Respiratorische Sinusarrhythmie in den LF-Bereich hinein verschiebt und damit die Dichte im HF-Bereich vermindert. Diese nicht direkt tauchbedingten Einflüsse können quantitativ kaum eingeschätzt werden, müssen aber zumindest bei der Interpretation der Messergebnisse zur Beurteilung des tauchbedingten Einflusses auf Sympathikus- und Parasympathikusaktivität berücksichtigt werden.

Berücksichtigt man in den vorliegenden Ergebnissen der frequenzbezogenen Messgrößen den Einfluss der Atemfrequenz, so kann angenommen werden, dass sowohl in 2m als auch in 44m Tauchtiefe vor allem für das Atemgas Sauerstoff aber auch für Luft und Heliox zumindest eine tendenzielle Dominanz der Parasympathikusaktivität vorliegt.

### 6.4. **PROTOIS-Korrelation**

#### **(Korrelation von Hormonkonzentration und Herzfrequenzvariabilität)**

Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Korrelation von Noradrenalin aber auch Adrenalin zu r-MSSD, pNN50 und LF/HF. Diese Korrelation von Blutwerten mit Herzfrequenzwerten wurde gemäß der Arbeitsbezeichnung dieser Studie **PROTOIS-Korrelation** getauft. Die positive Korrelation (Vgl. Diagramme 5.10 ff) verwundert für r-MSSD und pNN50, da diese Messgrößen die Aktivität des Parasympathikus anzeigen. Die bei den letztgenannten Messgrößen vorgefundenen Korrelationen scheinen daher eher zufällig als kausal begründet. Allerdings konstatieren Schipke und Mitarbeiter (2001) unter ähnlichen Tauchbedingungen aufgrund ihrer Daten zur Herzfrequenzvariabilität sowohl eine Aktivierung des Sympathikus als auch des Parasympathikus. Da die Aktivitätszunahme für Sympathikus und Parasympathikus parallel zu verlaufen scheint, könnten sich hierdurch auch die gefundenen Korrelationen zwischen r-MSSD und pNN50 mit Noradrenalin und Adrenalin erklären.

Plausibler jedoch erscheint die signifikante Korrelation zwischen den Veränderungen der Noradrenalin- und AdrenalinKonzentration und den Veränderungen von LF/HF (Vgl. Diagramme 5.10 und 5.12). Je ausgeprägter die Dominanz des Sympathikus (indiziert durch eine Verminderung des Quotienten) ist, desto weniger ausgeprägt ist der Abfall der Noradrenalin-, aber auch der AdrenalinKonzentration im arteriellen Blut.

Beim Tauchreflex kommt es zu einer Reduzierung der Herzfrequenz und gleichzeitig zu einer Vasokonstriktion in den Extremitäten. Grund hierfür ist, dass "zentral" in der

Körpermitte die Auswirkungen des Parasympathikus überwiegen und eine Verlangsamung der Herzfrequenz bewirken. In den Extremitäten, also "peripher", dominieren die Wirkungen des Sympathikus. Das Auftreten des Tauchreflexes beim Apnoetauchen [Stegemann et al. 1969] ist ausführlich erforscht. Für den Fall, dass der Tauchreflex auch beim Gerätetauchen auftreten würde, könnte man die Existenz der **PROTOIS** – Korrelation zwischen Hormonkonzentration und Herzfrequenzvariabilität sicher ausschließen.

Die signifikante Korrelation zwischen Noradrenalin und LF/HF lässt annehmen, dass die Messung von LF/HF am geeignetsten erscheint für die Beurteilung der Sympathikusbeanspruchung im Vergleich zu anderen Messgrößen der Herzfrequenzvariabilität. Dennoch ist einzuschränken, dass LF/HF lediglich die Relation von Sympathikus- und Parasympathikusaktivität widerspiegelt. Trotz dieser signifikanten Korrelationen scheinen daher die Noradrenalinkonzentrationen aus arterieller Punktion hinsichtlich Beurteilung der sympathoadrenergen Aktivität aussagekräftiger und zuverlässiger zu sein, als die Messgrößen zur Herzfrequenzvariabilität.

### 6.5. **Fazit**

Mit der vorliegenden Arbeit wurde erstmalig Menschen arterielles Blut entnommen, die sich mit einer externen Atemgasversorgung unter Wasser aufhielten. Auch nur annähernd vergleichbare Studien, auf deren Ergebnisse man zurückgreifen könnte, ließen sich in der Literatur nicht finden.

Die Plasmakonzentrationen von Noradrenalin und Adrenalin nehmen bei Submersion mit Tauchgerät signifikant ab und weisen daher auf eine verminderte Beanspruchung des sympathoadrenergen Systems.

Die Tauchtiefe (2m versus 44m), wie auch die untersuchten Atemgase (Sauerstoff, Luft, Heliox), spielen dabei keine Rolle. Hinsichtlich der Sympathikusaktivität ist anzumerken, dass es sich bei den Tauchern um exzellent ausgebildete und routinierte Rettungstaucher handelte. Zu deren üblichen Aufgaben zählt die Suche nach ertrunkenen Personen in den schlammigen, kalten Gewässern mit Null-Sicht, wie sie in Berlin und Brandenburg oft vorkommen. Hierbei werden die Taucher von einem Leinenführer außerhalb des Wassers über eine Signalleine dirigiert und müssen sich tastend über den Grund vorwärtsbewegen. Daher bedeutet für sie ein Aufenthalt unter Wasser, wenn dieses klar, warm und unbewegt ist, eher eine Erholung als eine Anstrengung.



Bei der Sympathikusaktivierung scheint es einen deutlichen Unterschied zu geben zwischen der Submersion bei Apnoe und der Submersion unter Verwendung eines Tauchgerätes.

In der vorliegenden Studie zeigten sich am Ende der Submersionen erniedrigte arterielle Plasmakonzentrationen von Noradrenalin und Adrenalin. Gleichzeitig erhöhten sich die Werte bei den Messgrößen r-MSSD und pNN50, welche sich proportional zur Aktivität des Parasympathikus verhalten. Daher lässt sich aufgrund dieser Studien annehmen, dass die Sympathikusaktivität weder beim Apnoetauchen noch beim Gerätetauchen an der Vasokonstriktion der Blutgefäße beteiligt ist.

Dies steht im Einklang mit den Daten von Pelzer, Schipke et al [2001], welche ebenfalls eine Aktivität des Parasympathikus feststellten. Unter Apnoebedingungen dagegen finden Radermacher und Muth [2004] unveränderte Konzentrationen an arteriellem Plasma-Noradrenalin.

Anders sieht es bei Wedell-Robben und Walen aus. Hier konnte eine tierexperimentelle Studie [Hochachka et al. 1995] zeigen, dass Submersion unter Apnoebedingungen die Katecholaminfreisetzung erhöht und diese als ein wesentlicher Mechanismus zur Vasokonstriktion der Blutgefäße unter diesen Submersionsbedingungen angesehen werden kann. Somit liegen unterschiedliche hormonelle und metabolische Mechanismen bei Mensch und Meeressäugern vor.

Eine wesentliche Frage der vorliegenden Studie war, ob mögliche Veränderungen der sympathoadrenergen Aktivität, indiziert durch die Noradrenalin- und Adrenalin-konzentration nach arterieller Punktion, durch Messgrößen der Herzfrequenzvariabilität erfasst werden kann. Dies würde künftige Untersuchungen zur Beurteilung der Beanspruchung des sympathoadrenergen Systems praktikabler gestalten und deren Anwendung erleichtern. Die vorliegenden Ergebnisse sprechen grundsätzlich für eine Anwendung der Messung der Herzfrequenzvariabilität als Maß der Beanspruchung des sympathoadrenergen Systems. Jedoch sollten dabei keine Pulsuhren der Marke Polar verwendet werden. Dies ergibt sich aus der mangelhaften Zuverlässigkeit der Pulstester der Firma Polar und aus der Tatsache, dass autorisierte Firmenmitarbeiter definitiv falsche Auskünfte zur Verwendbarkeit und Leistungsfähigkeit ihrer Pulstester geben. Deswegen konnten nahezu 50% der Probandendaten nicht ausgewertet werden. Unter den gegebenen Untersuchungsbedingungen, die bereits ein hohes Maß an Standardisierung aufwiesen, zeigten sich zum Teil kontroverse Ergebnisse sowohl zwischen den einzelnen Messgrößen der Herzfrequenzvariabilität als auch zwischen den Messgrößen der Herzfrequenzvariabilität und den Katecholamindaten.

Weiterhin ist zu bedenken, dass die Messgrößen selbst zahlreichen tauchunabhängigen Einflüssen unterliegen, welche allesamt durch Standardisierung nicht ausgeschlossen bzw. nicht unterdrückt werden können. So ist es z.B. kaum möglich, den Einfluss einer verminderten Atemfrequenz abzuschätzen oder diesen Einfluss „herauszurechnen“.

Darüber hinaus stellt sich die Frage der Notwendigkeit. Insbesondere die Daten der Konzentrationen von Noradrenalin und Adrenalin aber auch die zeitbezogenen Messgrößen der Herzfrequenzvariabilität lassen annehmen, dass die Sympathikusaktivität unter den untersuchten Tauchbedingungen abnimmt und eher der Parasympathikotonus überwiegt. Die vorliegende Studie hat aber auch gezeigt, dass nach der Beendigung der Submersionen die Sympathikusaktivität erhöht ist, vermutlich als Folge der nun fehlenden Zentralisation des Blutvolumens und einer möglicherweise einsetzenden geringen Orthostase-Symptomatik, so dass Untersuchungen zu diesem Zeitpunkt möglicherweise relevanter sind als während des Tauchganges [Ulmer 1972; Böning 1980]

### 7. Zusammenfassung

Noch immer fallen, trotz hoch entwickelter Gerätschaften und guten Ausbildungsangeboten, in jedem Jahr sowohl in Deutschland als auch weltweit in Urlaubsländern viele Hobby-Taucher einem Tauchunfall mit tödlichem Ausgang zum Opfer. Bei den anschließenden amtlichen Unfallanalysen kann zwar die Todesursache (z. B. Herzversagen oder Ertrinken) einwandfrei festgestellt werden, das Geschehen in den letzten Minuten vor dem Exitus bleibt jedoch meist unerklärbar.

Aus diesem Grunde sollte in der vorliegenden Studie mit der Arbeitsbezeichnung **PROTOIS-PROJEKT** untersucht werden, wie sich die Aktivität des sympathoadrenergen Systems bei einem Tauchgang mit Drucklufttauchgerät bis auf 44m Wassertiefe ändert, und ob die arterielle Katecholaminkonzentration als Maß der Aktivität des sympathoadrenergen Systems (Goldstandard) mit der gemessenen Herzfrequenzvariabilität korreliert. Weiterhin sollte überprüft werden, ob die Aktivität des sympathoadrenergen Systems als Messgröße zur Beurteilung der momentanen Tauchfähigkeit herangezogen werden kann, um so ein beim Taucher aufkommendes Panikgefühl bereits im Vorfeld erkennen zu können.

Zum gesicherten Erkenntnisgewinn ohne Gefährdung der zu untersuchenden Taucher war es notwendig, am Tieftauchsimulator der DLRG in Berlin-Spandau ("Tauchturm") in erheblichem Umfang technische Umbauten vorzunehmen. Dazu wurde über einen Prozess des methodischen Konstruierens, wie er im Maschinenwesen gebräuchlich ist, eine zur Durchführung der Tauchversuche optimale Lösung ausgearbeitet.

Bei der Gestaltung der Versuchsmethodik wurden die Einflussgrößen **Atemgas, Tauchtiefe und Submersion**, die während eines Tauchgangs mit Drucklufttauchgerät auf einen Menschen einwirken, spezifiziert, um Auswirkungen ihren Ursachen eindeutig zuordnen zu können. Das zu untersuchende Tauchprofil mit Druckluft bestand aus zwei kurz aufeinander folgenden Submersionen von jeweils 15 Minuten Dauer unterschiedlicher Wassertiefe. Zusätzlich wurde ein kongruentes Tauchprofil mit Heliox21 als Atemgas und ein weiteres unter Sauerstoffatmung gefahren.

**Erstmals überhaupt wurden dabei Gerätetauchern während eines Tauchgangs bis auf 44m Wassertiefe unter arterieller Punction Blutproben entnommen. Hinweise auf vergleichbare Untersuchungen ließen sich in der wissenschaftlichen Literatur nicht finden.**

Die Ergebnisse zeigen signifikante Absenkungen der Katecholaminkonzentrationen bei Noradrenalin und Adrenalin, wenn man die Ruhewerte vor den Tauchprofilen vergleicht mit den Werten am Ende der Submersionen, wenn sich die Taucher bereits

einige Minuten im Wasser befinden. Die Noradrenalin-Konzentration sinkt um fast 30 Prozent, die Adrenalin-Konzentration um etwa 40 Prozent. Die Tauchtiefe scheint dabei eine vernachlässigbare Einflussgröße zu sein. Teilweise war dieser Effekt auch in den Werten der Herzfrequenzvariabilität wieder zu finden.

**Eine Korrelation konnte festgestellt werden**

**zwischen Noradrenalin und pNN50 ( $r=0,79$ ), r-MSSD ( $r=0,68$ ) und LF/HF ( $r=0,67$ ) sowie**

**zwischen Adrenalin und pNN50 ( $r=0,69$ ), r-MSSD ( $r=0,63$ ) und LF/HF ( $r=0,76$ ).**

**Gemäß der Arbeitsbezeichnung dieser Studie / Doktorarbeit wurde jener Zusammenhang PROTOIS-Korrelation getauft.**

Mittels der gefundenen Korrelation und weiterer Forschungen auf diesem Gebiet könnte künftig das nicht invasive, wenig aufwendige und schnell auszuwertende Verfahren der Bestimmung der Herzfrequenzvariabilität die arterielle Blutentnahme zur Bestimmung der Katecholamine ersetzen.

Allerdings konnte aufgrund ständiger Fehlfunktionen der benutzten Polar-Pulsuhren die Korrelation nur an einer einstelligen Anzahl von Tauchern nachgewiesen werden. Dies bedingt eine wohlüberlegte Anwendung der Korrelation oder eine weitere Verifizierung durch künftige Versuche.

Dennoch wurde der erste Schritt auf dem Weg zur Entwicklung eines technischen Instrumentes, welches es ermöglicht, Tauchunfälle durch Panik oder nervliche Überbelastung zu verhindern, mit dieser Studie eingeleitet. Sofern dieser Weg von künftigen Forschern konsequent weiter beschritten wird, könnte erstmals in der Geschichte der Unterwassermedizin ein technisches Instrument entwickelt werden, welches es ermöglicht, Tauchunfälle zu verhindern, bevor sie geschehen, anstatt die negativen Folgen eines bereits eingetretenen Unfalls zu verringern oder zu behandeln.

### 8. Danksagung

An erster Stelle danke ich den ehrenamtlichen DLRG-Rettungstauchern, welche sich als Probanden für drei Tauchgänge unter arterieller Punktion zur Verfügung gestellt haben, ohne dafür eine finanzielle Vergütung oder andere Vorteile zu erhalten.

Jenen Männern ist diese Dissertation gewidmet.

Doch wäre sie ohne die Unterstützung vieler weiterer Menschen niemals begonnen, durchgeführt und vollendet worden. Diese Menschen fand ich am Institut für Sportmedizin der Freien Universität Berlin, bei der Deutschen Lebens-Rettungs-Gesellschaft und in meinem privaten Freundeskreis.

Zu allergrößtem Dank bin ich Herrn Univ. Professor Dr. med. D. Böning verpflichtet. Als Leiter des Institutes für Sportmedizin der Freien Universität Berlin brachte er mir immer wieder seine aufopfernde, unermüdliche Betreuung und seine hervorragende, alles übertreffende Unterstützung entgegen. Auch die ärztliche Studienleitung lag in seinen Händen, und er bewies mir stets seine Großzügigkeit und sein allergrößtes Wohlwollen.

Herrn Priv.-Doz. Dr. Günther Strobel vom Institut für Sportmedizin der Freien Universität Berlin gebührt großer Dank für die wissenschaftliche Unterstützung und die umfangreiche Betreuung beim Erstellen dieser Arbeit. Er half auch bei der Suche nach einer geeigneten Thematik und der inhaltlichen Abgrenzung dieser Studie.

Frau MTA Nadol und Frau MTLA Himmelsbach vom Institut für Sportmedizin der Freien Universität Berlin danke ich für die schnelle und gewissenhafte Auswertung von mehr als 1200 medizinischen Laborproben.

Herrn Dr. med. Mathias Hölzl, ehrenamtlicher Landesverbandsarzt und geschäftsführendes Vorstandsmitglied der DLRG-Berlin, danke ich für seine Unterstützung und Förderung aller meiner diese Dissertation betreffenden Anliegen innerhalb und außerhalb der Deutschen Lebens-Rettungs-Gesellschaft.

Ich danke Dr. med. Jürgen Plöse, Dr. med. Mathias Hölzl, Dr. med. Detlev Hölzl und Dr. med. Hans Grajetzki, welche als ehrenamtliche DLRG-Ärzte und erfahrene Anästhesisten bei den Tauchern die arteriellen Punktionen durchführten sowie vor, während und nach den Tauchgängen ihnen Blutproben entnahmen.

Mein herzlicher Dank gebührt Wolf-Dieter Schulze, Michael "Lee" Höder, Peter Seliger, Klaus "Pudding" Gänkler und auch Ralf "Verhaftefix" Kahlbau, welche als ehrenamtliche Druckkammerfahrer die Tauchturmanlage mit herausragender Professionalität bedienten.

Zu großem Dank bin ich Herrn Frank Villmow, dem ehrenamtlichen Leiter der DLRG-Zentralstation in Berlin-Spandau verpflichtet. Ohne die großartige Unterstützung durch ihn und seine ehrenamtliche 40-köpfige Mannschaft als tauchtaugliche Sanitäter, Probentransporteure, Kraftfahrer, Küchenchefs, Photographen, Mechaniker, wissenschaftliche Protokollführer und Notfallhelfer bei allen auftretenden Schwierigkeiten wäre die Studie nicht durchführbar gewesen.

Herrn Prof. Dr. med. Radermacher, Herrn Priv.-Doz. Dr. med. Claus Martin Muth, Dr. med. Jürgen Wenzel sowie auch dem Arzt Lutz Hock verdanke ich gute Ideen und Anregungen zur methodischen Gestaltung der durchgeführten Untersuchungen.

Herrn Harnoth von der Firma Linde Gas AG in Berlin danke ich für die kostenlose Lieferung großer Mengen an Helium und Sauerstoff, welche als Atemgase für die durchgeführten Tauchprofile benötigt wurden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Siekmann, Leiter des Institutes für Strömungslehre der Technischen Universität Berlin, danke ich für die kostenlose Bereitstellung einer Seitenkanalpumpe. Nur mit dieser Pumpe war es möglich, die optimalen technischen Voraussetzungen für diese Studie zu schaffen.

Herrn Lothar Weiß von der Firma Poseidon Tauchprodukte in Ralsdorf danke ich für die kostenlose Übersendung von Taucherbekleidung.

Für die abschließende Durchsicht dieser Arbeit hinsichtlich der Orthographie und Interpunktion danke ich Herrn Oberschulrat i. R. Günther Klatt

Den Herren Unternehmern Bernd und Thomas Spallek gebührt kapitaler Dank für die generöse Überlassung von Räumlichkeiten ihres Unternehmens zur Vollendung dieser Arbeit und der Kauffrau Birgit Kuhn für ihre beharrlichen und konstanten Bemühungen zur Steigerung meiner Motivation und Ausdauer.

## 9. Literaturverzeichnis

### **Anegg U,**

Stress-induces hormonal and mood responses in SCUBA divers. A field study.  
Life Sci 70, S. 2721-2734 / 2002

### **Asano K, Mazzeo RS, McCullough RE, Wolfel EE, Reeves JT**

Relation of sympathetic activation and ventilation in man at 4300 m altitude  
Aviat Space Environ Med 68, S. 104–110 / 1997

### **Aubert AE, Seps B, Beckers F**

Heart rate variability in athletes  
Sports Med 33, S. 889–919 / 2003

### **Berufgenossenschaftliche Grundsätze**

für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen "G 31 Überdruck",  
Ausführungsbehörde für die gesetzliche Unfallversicherung,  
Eigenunfallversicherung Berlin, ohne Jahreszahl

### **BGV C 23 (a)**

(=Berufsgenossenschaftliche Vorschrift, bisherige VBG 39),  
Unfallverhütungsvorschrift Taucherarbeiten, Tabelle 2, Seite 38  
in der Fassung vom 1. Januar 2001, Abrufnummer 184  
Tiefbau-Berufsgenossenschaft, Technischer Aufsichtsdienst, München / 2001

### **BGV C 23 (b)**

(=Berufsgenossenschaftliche Vorschrift, bisherige VBG 39) § 1 (1) und §1 (2),  
Unfallverhütungsvorschrift Taucherarbeiten,  
in der Fassung vom 1. Januar 2001, Abrufnummer 184  
Tiefbau-Berufsgenossenschaft, Technischer Aufsichtsdienst, München / 2001

### **Boutillier RG, Lantz CJ**

The effects of forced and voluntary diving on plasma catecholamines and erythrocyte  
pH in the aquatic anuran, *Xenopus laevis*.  
Exp Biol 48 (2), S. 83-88 / 1989

### **Böning D, Ulmer, HV, Meier U, Stegemann J**

The Effects of a Multi-Hour Immersion on Trained and Untrained Subjects.  
Blood Protein and Elektrolyte Concentrations  
Aerospace Med 43, S. 415-418 / 1972

### **Böning D, Skipka W**

Renal Blood Volume Regulation in Trained and Untrained Subjects during Immersion  
Eur J Appl Physiol 42, S. 247-254 / 1979

### **Böning D, Skipka W**

Blutvolumenregulation bei mehrstündigem Aufenthalt im Wasser.  
Vergleich zwischen Trainierten und Untrainierten.  
In: Gerstenbrandt F, Lorenzoni E, Seemann K, Hrg.  
Tauchmedizin, S. 62-66, Hannover, Schlütersche, 1980

### **Böning D, Mrugalla M, Maassen N, Busse MW, Wagner TOF**

Exercise Versus Immersion: Antagonistic Effects on Water and  
Electrolyte Metabolism during Swimming  
Eur J Appl Physiol 57, S. 248-253 / 1988

### **Bravo EL, Gifford RW**

Pheochromocytoma: diagnosis, localization and management  
N Engl J Med 311, S. 1298-1303 / 1984

**Brydon L, Magid K, Steptoe A**

Platelets, coronary heart disease, and stress.  
Brain Behav Immun 20, S. 113–119 / 2006

**Carlyle RF**

Some effects on urinary excretion of catecholamine metabolites in men during simulated dives of up to 300 metres water (31 bar)  
J Physiol 284, S. 110-111 /1978

**Casadei B, Cochrane S, Johnston J, Conway J, Sleight P**

Pitfalls in the interpretation of spectral analysis of the heart rate variability during exercise in humans  
Acta Physiol Scand 153, S. 125-131 / 1995

**Charney DS, Heninger GR**

Abnormal regulation of noradrenergic function in panic disorders  
Arch Gen Psychiatry 43, S. 1042-1054 / 1986

**Christensen NJ**

Plasma norepinephrine and epinephrine in untreated diabetics during fasting and after insuline administration  
Diabetes 23, S. 1-8 / 1974

**Christensen NJ, Videbaek J**

Plasma catecholamines and carbohydrate metabolism in patients after acute myocardial infarction  
J Clin Invest 54, S. 278-286 / 1974

**Cleroux J, Nguyen PV, Taylor AW, Leenen FHH**

Effects of beta-selective (beta-1) and non-selective beta-blockade (beta-1,beta-2) on exercise endurance and on muscle glycogen and triglyceride utilisation in man  
Hypert 9, S. 103 (Abstract) / 1987

**Cohn JA**

The sympathetic nervous system in heart failure  
J Cardiovasc Pharmacol 14 (Suppl. 5), S. 57-61 / 1989

**Cryer PE**

Physiology and pathophysiology of the human sympathoadrenal neuroendocrine system.  
N Engl J Med 303, S. 436-443 / 1980

**Druckluftverordnung**

Verordnung über Arbeiten in Druckluft (Druckluftverordnung)  
vom 4.10.72 in der Fassung vom 19.7.97  
Abruf-Nr. 781 (ZH 1/479) / 1997

Tiefbau-Berufsgenossenschaft, Technischer Aufsichtsdienst, München

**Ehm, OF**

Tauchen–noch sicherer ! S. 81-93  
Albert Müller Verlag, Rüschlikon-Zürich, 2. Auflage, 1974

**Ehm, OF und Seemann, K**

Sicher Tauchen !  
Albert Müller Verlag, Rüschlikon-Zürich, 1. Auflage, 1968

**Ehrmann U,**

Herzfrequenz und metabolische Effekte beim Apnoetauchen  
Dtsch Z Sportmed, Jahrgang 55, Nr. 11, S. 312-314, 2004



**Elias AN,**

Corticotropin releasing hormone and gonadotropin secretion in physically active males after acute exercise

Eur J Appl Physiol Occup Physiol. 62, S. 171-174 / 1991

**Esler M,**

Cardiac sympathetic nerve biology and brain monoamine turnover in panic turnover

Ann NY Acad Sci 1018, S. 505–514 / 2004

**Farrell PA,**

Enkephalins, catecholamines, and psychological mood alterations: effects of prolonged exercise

Med Sci Sports Exerc 19, S. 347 - 53 / 1987

**Fritsch-Yelle JM, Whitson PA, Bondar RL, Brown TE**

Subnormal norepinephrine release relates to presyncope in astronauts after spaceflight

J Appl Physiol 81, S. 2134-2141 / 1996

**Galbo H, Gollnick PD**

Hormonal changes during and after exercise

Medicine and Sport in Science, (Hebbelinck M, Sheperd RJ eds),

Vol 17, S. 97-110, Basel / Karger / 1984

**Ganguly P**

Catecholamines and cardiovascular disorders: pathophysiologic considerations

Am Heart J 118, S. 868-872 / 1989

**Garber AJ, Cryer PE, Santiago JV, Haymond MW, Pagliara AS, Kipnis DM**

The role of adrenergic mechanisms in the substrate and hormonal response to insulin-induced hypoglycemia in man

J Clin Invest 58, S. 7-15. / 1976

**Geffen LB, Rush RA, Louis WJ, Doyle AE**

Plasma dopamine beta-hydroxylase and noradrenaline amounts in essential hypertension

Clin Sci 44, S. 617-620 / 1973

**GKSS 1981** Forschungszentrum

25 Jahre GKSS Forschungszentrum, Seite 63ff,

Festschrift zum 25 jährigen Gründungsjubiläum der GKSS,

GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH

Paul-Gerhard Kuhls, Hamburg April 1981

**GKSS 2006** Forschungszentrum

50 Jahre GKSS, Seite 43ff,

Festschrift zum 50 jährigen Bestehen der GKSS,

GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH 2006

Verlag Hanseatischer Merkur, Hamburg 2006

**Goldstein DS**

Plasma catecholamine and essential hypertension: an analytical review

Hypertension 5, S. 86-99 / 1983

**Goodwin GM, Mc Closkey DL, Mitchell JH**

Cardiovascular and respiratory responses to changes in central command during isometric exercise at constant muscle tension

J Physiol 226, S. 173–190 / 1972

**GUV-R 2101**

(=GesetzlicheUnfallversicherung-Regel, bisher GUV 10.7), § 1.1  
Tauchen mit Leichttauchgeräten in Hilfeleistungsunternehmen, Auflage 1994,  
Bundesverband der Unfallkassen, München, 1994

**Hasking GJ, Esler MD, Jennings GL, Burton D, Korner PI**

Norepinephrine spillover to plasma in patients with congestive heart failure:  
evidence of increased overall and cardiorenal sympathetic nervous activity  
Circulatio 73, S. 615-621 / 1986

**Haux, GFK 1969**

Tauchtechnik Band 1, S. 142  
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1969

**Haux, GFK 1970**

Tauchtechnik Band 2, S. 75  
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1970

**Haux, GFK 1982(a)**

Subsea Manned Engineering, S. 62-64.,  
Carson / California (USA): Best Publishing Company 1982

**Haux, GFK 1982(b)**

Subsea Manned Engineering, S. 18-21,  
Carson / California (USA): Best Publishing Company 1982

**Haux, GFK 1997**

Wie aus der HB die HBO wurde, S. 134.,  
Kiel, Hansadruck 1997

**Henry D, Dentino M, Gibbs P, Weinberger M**

Vascular compartmentalization of plasma norepinephrine in normal man  
J Lab Clin Med 94, S. 429-437 / 1979

**Hjemdahl, P.**

Plasma catecholamines - Analytical challenges and physiological limitations  
Baillières Clin Endocrinol Metab 7, S. 307-53 / 1993

**Hochachka PW**

Hormonal regulatory adjustments during voluntary diving in Wedell seals,  
Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol 112, S. 361-375 / 1995

**Homer 1979**, übersetzt von Roland Hampe aus dem Alt-Griechischen

Odyssee, IV. Gesang, Vers 386  
Philipp Reclam Junior, Stuttgart, 1979

**Homer 1983**, übersetzt von Dietrich Ebener aus dem Alt-Griechischen

Odyssee, IV. Gesang, Vers 365-378,  
Aufbau-Verlag, Berlin (Ost) & Weimar, 1971, 3. Auflage von 1983

**Hooper SI, Mackinnon LT, Gordon RD, Bachmann AW**

Hormonal responses of elite swimmers to overtraining  
Med Sci Sports Exerc 25, S. 741-747 / 1993

**Hoshikawa Y, Yamamoto Y**

Effets of Strop-Color-word conflict test on the autonomic nervous system  
responses.  
Am. J. Physiol. 272, S. 1113-1121 / 1997

**Hsiao JK, Colison J, Bartko JJ, Doran AR, Konicki PE, Potter WZ, Pickar D**  
Monoamine neurotransmitter interactions in drug-free and neuroleptic-treated  
schizophrenics

Arch Gen Psychiatr 50, S. 606-614 / 1993

**Hudson DM, Jones DR**

Remarkable blood catecholamine levels in forced dived ducks.

J Exp Zoology, 224 (3), S. 451-455 / 1982

**Hurford WE, Hochachka PW, Schneider RC, Guyton GP, Stanek KS, Zapol DG,  
Liggins GC, Zapol WM**

Splenic contraction, catecholamine release, and blood volume redistribution during  
diving in the Weddell seal.

J Appl Physiol, 80 (1), S. 298-306 / 1996

**John, Siegfried**

Späte Dekompression eines Tauchunfalls mit Tetra- und paraplegischer  
Symptomatik mittels O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He unter einem Behandlungsdruck von 9 bar,  
entnommen dem

Konzept zur Einrichtung eines Institutes für Tauchmedizin an der FU Berlin  
als Anlage 6 zu Kapitel 2.3, S. 10, Berlin, 1986

**Joyner MJ, Freund BJ, Jilka SM, Hetrick GA, Martinez E, Ewy GA, Wilmore JH**

Effects of b-blockade on exercise capacity of trained and untrained men:  
a hemodynamic comparison

J Appl Physiol 60, S. 1429-1434 / 1986

**Jung K, Stolle W,**

Behaviour of Heart Rate and Incidence of Arrhythmia in Swimming and Diving

Biotelem Patient Monit 8, S. 228-239 / 1981

**Kaiser P, Tesch PA, Frisk-Holmberg M, Juhlin-Dannfelt A, Kaijser L**

Effects of beta-1 selective beta blockade on work capacity and muscle metabolism  
Clin Physiol 6, S. 197-207 / 1986

**Kindermann W**

Das Übertraining – Ausdruck einer vegetativen Fehlsteuerung

Dtsch Z Sportmed 8, S. 238–245 / 1986

**Kjaer M**

Exercise effects on adrenergic regulation of energy metabolism

In: Perspectives in exercise science and sports medicine,  
energy metabolism in exercise and sports, (Lamb DR, Gisolfi CV eds),  
S. 345-376, Dubuque, Brown & Benchmark / 1992

**Kjaer M, Secher NH, Galbo H**

Physical stress and catecholamine release

Baillières Clin Endocrinol Metab 2: S. 279-298 / 1988

**Kreiselpumpenlexikon 1989**

Seitenkanalpumpe, S. 281-284

KSK Aktiengesellschaft, Frankenthal, 3. Auflage von 1989

**Kromp KL**

Praxis des Tauchens, Seite 120

Delius Klasing Verlag, Bielefeld, 2002

**Kuchel O**

Peripheral dopamine in hypertension and associated conditions  
J Human Hypertens 13, S. 605-615 / 1999

**Lacombe AM, Jones DR**

The source of circulating catecholamines in forced dived ducks.  
Gen Comp Endocrinol 80 (1), S. 41-47 / 1990

**Landsberg PG**

Bradycardia during human diving.  
S Afr Med J 49 (15), S. 626-630 / 1975

**Lappe RW, Henry DP, Willis LR**

Contribution of renal sympathetic nerves to the urinary excretion of norepinephrine  
Can J Physiol Pharmacol, S.1067–1072 / 1982

**Larsen AS, Johansen LB, Stadeager C, Warberg J, Christensen NJ, Norsk P**

Volume-homeostatic mechanisms in humans during graded water immersion  
J Appl Physiol 77, S 2832–2839 / 1994

**Lechin F, van der Dijs B, Lechin AE**

Autonomic nervous system assessment throughout the wake-sleep cycle and stress.  
Psychosom Med 66, S. 974–976 / 2004

**Lehmann M, Baumgartl P, Wiesenack C**

Training - overtraining: influence of a defined increase in training volume vs training intensity on performance, catecholamines and some metabolic parameters in experienced middle- and long-distance runners  
Eur J Appl Physiol 64, S. 169-177 / 1992

**Lettnin, HKJ 1998(a)**

Tauchen mit Mischgas, S. 27-29  
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 3. Auflage von 1998

**Lettnin, HKJ 1998(b)**

Tauchen mit Mischgas, S. 179-193  
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 3. Auflage, 1998

**Lund V, Kentala E, Scheinin H, Klossner J, Koskinen P, Jalonen J**

Effect of hyperbaric conditions on plasma stress hormone levels and endothelin  
Undersea Hyperb Med 26 (2), S. 87-92 / 1999

**Lund V, Kentala E, Scheinin H, Klossner J, Sariola-Heinonen K, Jalonen J**

Hyperbaric oxygen increases parasympathetic activity in professional divers.  
Acta Physiol Scand 170 (1), S. 39-44 / 2000

**Malliani A, Pagani M, Lombardi F, Cerutti S**

Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain  
Circulation 84, S. 482-492 / 1991

**Manalaysay AR, Langworthy HC, Layton RP**

Catecholamine levels in divers subjected to stresses of immersion and hyperbaric exposure.  
Undersea Biomed Res 10 (2), S. 95-106 /1983

**Mark AL**

Regulation of sympathetic nerve activity in mild human hypertension  
J Hypertens 8 (Suppl. 7), S. 67-75 / 1990

**Martimporgues-Goyenechea C, Gomez-Jacinto L**

Simultaneous multiple stressors in the environment: physiological stress reactions, performance, and stress evaluation Psychol Rep 97, S. 867–74 / 2005

**Matsuda M, Nakayama H, Arita H, Morlock JF, Claybaugh J, Hong SK**

Physiological responses to head-out immersion in water at 11 ATA. Undersea Biomed Res 5 (1), S. 37-52 / 1978

**Mazzeo RS, Marshall P**

Influence of plasma catecholamines on the lactate threshold during graded exercise J Appl Physiol 67, S. 1319-1322 / 1997

**Miki K, Hayashi Y, Shiraki K**

Cardiac-renal-neural reflex plays a major role in natriuresis induced by left atrial distension Am J Physiol 264, S. 369-375 / 1992

**Norsk P, Bonde-Petersen F, Christensen NJ**

Catecholamines, circulation, and the kidney during water immersion in humans J Appl Physiol 69, S. 479-484 / 1990

**Ostman I, Sjostrand NO, Swedin G**

Cardiac noradrenaline turnover and urinary catecholamine excretion in trained and untrained rats during rest and exercise Acta Physiol Scand 86, S. 299-308 / 1972

**Pastena L, Faralli F, Mainardi G, Gagliardi R**

EEG patterns associated with nitrogen narcosis (Breathing air at 9 ATA) Aviat Space Environ Med 76, S. 1031–1036 / 2005

**Pelzer M, Hafner D, Arnold G, Schipke JD**

Minimale Intervall-Länge zur sicheren Erfassung der Kurzzeit-Herzfrequenzvariabilität, Minimal interval length for safe determination of brief heart rate variability) Z Kardiol 84 (12), S. 986-994 / 1995

**Pendergast DR, Tedesco M, Nawrocki DM, Fisher NM**

Energetics of underwater swimming with SCUBA. Med Sci Sports Exerc 28, S. 573-580 / 1996

**Peronnet F, Beliveau L, Boudreau G, Trudeau F, Brisson G, Nadeau R**

Regional plasma catecholamine removal and release at rest and exercise in dogs Am J Physiol 254, S. 663-672 / 1988

**Petersen, K 2002(a)**

Die Entwicklungsgeschichte der Überdruckkammer und Indikationen für die Hyperbare Sauerstoff-Therapie, S. 43-45, Dissertation, Medizinische Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2002

**Petersen, K 2002(b)**

Die Entwicklungsgeschichte der Überdruckkammer und Indikationen für die Hyperbare Sauerstoff-Therapie, S. 46-48, Dissertation, Medizinische Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2002

**Plate, C**

Die GUSI-GKSS Unterwasser Simulationsanlage in Geesthacht Die ProfiTaucher, 5/98, Verlag Triton, Lübeck, S. 8-13 / 1998

**Pomeranz B, Macaulay RJM,**

Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis  
Am J Physiol 248, S. 151-153 / 1985

**Raastad T, Bjoro T, Hallen J**

Hormonal responses to high- and moderate-intensity strength exercise.  
Eur J Appl Physiol 82, S. 121–128 / 2000

**Radermacher P, Muth CM**

Apnoetauchen-Physiologie und Pathophysiologie  
Dtsch Z Sportmed 53, Nr. 6, S. 57-61 / 2002

**Ray CA, Mark AL**

Augmentation of muscle sympathetic nerve activity during fatiguing isometric leg exercise  
J Appl Physiol 75, S. 228-232 / 1993

**Richter SD,**

Time kinetics of the endocrine response to acute psychological stress  
J Clin Endocrinol Metab 83, S. 1396–1398 / 1996

**Roggenbach, Dr. med. Hanjo 2006 (a)**

Dekompressionsunfall Typ II  
Sporttaucher, 1/06, Olympia Verlag, Nürnberg, S. 44-46, 2006

**Roggenbach, Dr. med. Hanjo 2006 (b)**

Allein in die Tiefe  
Sporttaucher, 2/06, Olympia Verlag, Nürnberg, S. 44-46, 2006

**Roggenbach, Dr. med. Hanjo 2006 (c)**

Aufgesättigt und durchgeschossen  
Sporttaucher, 4/06, Olympia Verlag, Nürnberg, S. 36-38, 2006

**Schrauwen P, van Baak MA**

The effect of beta-adrenergic blockade on non-esterified fatty acid uptake of exercising skeletal muscle during arm cranking  
Int J Sports Med 16, S. 439-444 / 1995

**Seals DR**

Sympathetic neural adjustments to stress in physically trained and untrained humans  
Hypertension 17, S. 36-43 / 1991

**Seitenkanalpumpe**

Kreiselpumpen Lexikon, S. 281-283  
KSB Aktiengesellschaft, Frankenthal, 3. Auflage, Juli 1989

**Silverberg A, Shah SD, Haymond MW, Cryer PE**

Norepinephrine: hormone and neurotransmitter in man  
Am J Physiol 234, S. 252-256 / 1978

**Spieker L, Noll G**

Pathophysiologische Herz-Kreislauf-Veränderungen bei Stress und Depression  
Ther Umschau 60, S. 667–672 / 2003

**Stegemann J**

Leistungsphysiologie, 3. überarb. Auflage, S. 245–263 / 1984

**Stegemann J, Tibes U.**

Die Veränderungen der Herzfrequenz beim Tauchen und Atemanhalten nach körperlicher Anstrengung  
Pflugers Arch 308, S. 16–28 / 1969

- Strobel G, Albert M, Welsch B, Jost J, Bärtsch P,**  
Plasma and platelet catecholamine and catecholamine sulfate response to competitive triathlon.  
Int J Sports Med 15, S. 366 / 1994
- Strobel G, Reiß J, Friedmann B, Bärtsch P.**  
Effect of repeated bouts of short-term exercise on plasma free and sulphoconjugated catecholamines  
Eur J App Physiol Occup Physiol 79, S. 82-87 / 1998
- Strobel G, Siebold R, Friedmann B, Bärtsch P**  
Effect of severe exercise on plasma catecholamines in differently trained athletes  
Med Sci Sports Exerc 31, S. 560-565 / 1999
- Tomten SE, Kjeldsen SE, Nilsson S, Westheim AS**  
Effect of alpha-1 adrenoceptor blockade on maximal  $\text{VO}_2$  and endurance capacity in well-trained athletic hypertensive men  
Am J Hypert 7, S. 603-608 / 1994
- Tremellen KP, Williamson JA, Frewin DB, Russell WJ**  
Plasma catecholamine levels during exposure to an environment of hyperbaric oxygen.  
Clin Auton Res. 3 (2), S 91-93 / 1993
- Ulmer HV, Böning D, Dtegemann J, Meier U, Skupka W,**  
Pulsfrequenz, Blutdruck, Blutvolumen und  $\text{O}_2$ -Aufnahme von Trainierten und Untrainierten während Immersion im Wasser.  
Z Kreisl Forsch 61, S. 934-946 / 1972
- Van Baak MA**  
Beta-adrenoceptor blockade and exercise  
Sports Med 4, S. 209-225 / 1988
- Vanhees L, Fagard R, Hespel P, Amery A**  
Effect of calcium channel blockade and beta-adrenoceptor blockade on short-graded and single-level endurance exercise in normal men  
Hypertension 9, S. 587 / 1987
- Versiani M, Cassano G, Perugi G, Benedetti A, Mastalli L, Nardi A, Savino M**  
Reboxetine, a selective norepinephrine reuptake inhibitor, is an effective and well tolerated treatment for panic disorder  
J Clin Psych 63, S. 31-37 / 2002
- Von Känel R**  
Veränderungen der Blutgerinnung bei Stress und Depression – von der Evolution zur Genregulation  
Ther Umschau 60, S. 682-687 / 2003
- Wallin BG, Sunlof G, Eriksson BT, Dominiak P, Grobecker H, Lindblad LE**  
Plasma noradrenaline correlates to sympathetic muscle nerve activity in normotensive man  
Acta Physiol Scand 111, S. 69-73 / 1981
- Wallin GB, Fagius J**  
Peripheral sympathetic neural activity in conscious humans  
Ann Rev Physiol 50, S. 565-576 / 1988

**Weicker H**

Sympathoadrenergic Regulation  
Int J Sports Med 7 (Suppl), S. 16-25 / 1986

**Weicker H, Strobel G, Jost J, Hack V.**

Metabolische und zirkulatorische adrenerge Regulationen  
Prakt Sport Traumatol Sportmed 8 (Suppl), S. 26–36 / 1992

**Weist, F 1998(a)**

TITAN XI (Teil 2)  
Die ProfiTaucher, 6/98, S. 48-51, Verlag Triton, Lübeck, 1998

**Weist, F 1998(b)**

TITAN XI (Teil 1)  
Die ProfiTaucher, 5/98, S. 26-29, Verlag Triton, Lübeck, 1998

**Winder WW, Hagberg JM, Hickson RC, Ehsani AA, Mclane JA**

Time course of sympathoadrenal adaption to endurance exercise training in man  
J Appl Physiol 45, S. 370-374 / 1978

**Yamamoto Y, Hughson RL, Nakamura Y**

Autonomic nervous system response to exercise in relation to ventilatory threshold  
Chest 101 (Suppl. 5), S. 206-210 / 1992

**Zapol WM, Hill RD, Quist J, Falke K, Schneider RC, Liggins GC, Hochachka PW**

Arterial gas tensions and hemoglobin concentrations of the freely diving Weddell seal.  
Undersea Biomed Res 16, S. 363-373 / 1989

**ZH 1/237 von 1994, § 1**

Sicherheitsregeln für Druckluftleichttauchgeräte  
Ausgabe vom 1. Januar 2001, Auflage 1994, Abrufnummer 381  
Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, St. Augustin, 1994

**ZH 1 / 540 von 1979 § 1.2**

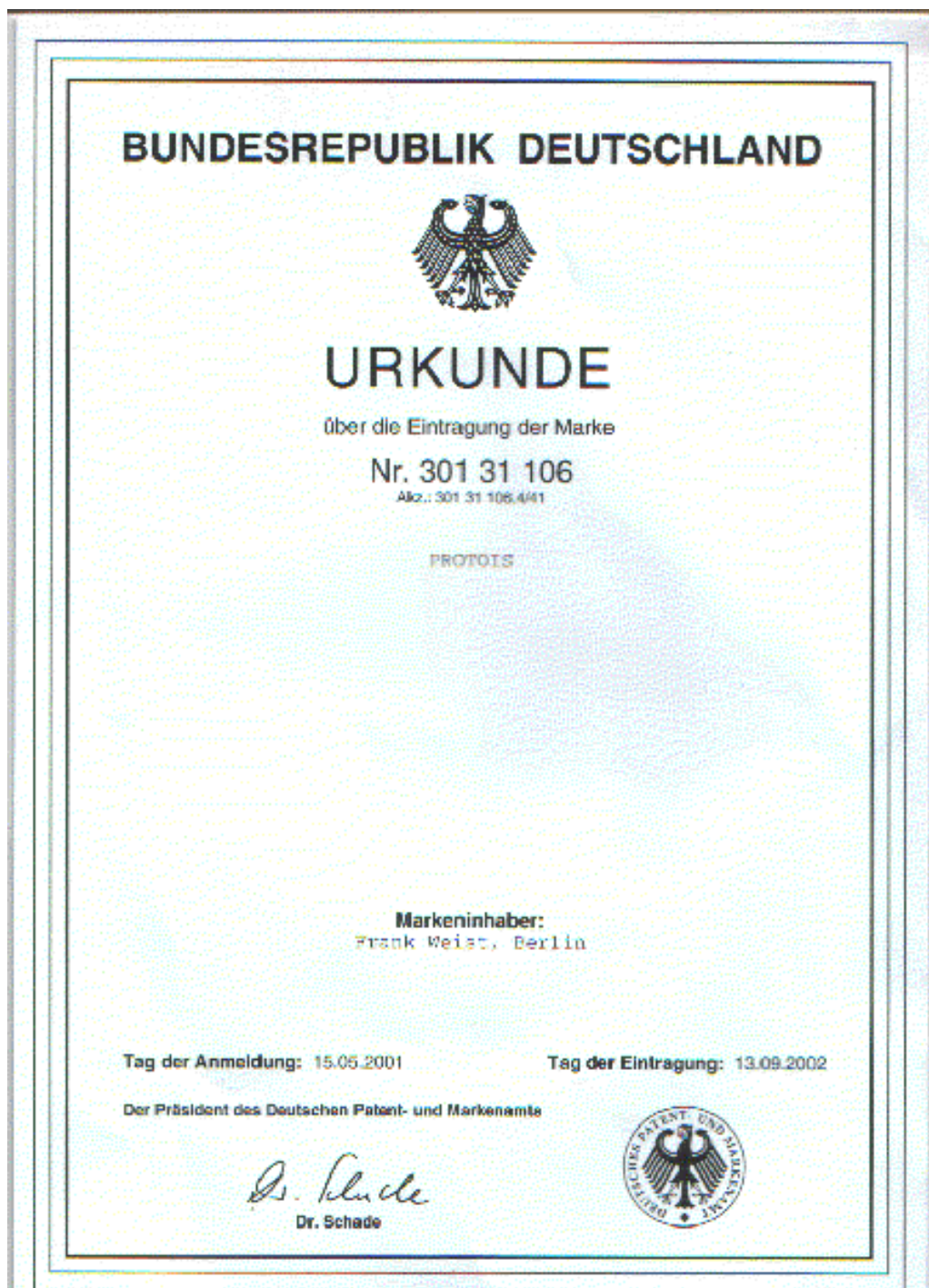
Richtlinie für den Einsatz von Forschungstauchern, Ausgabe 10/1979,  
Zentralstelle für Unfallverhütung und Arbeitsmedizin, Fachausschuß Tiefbau,  
Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Bonn, 1979

**Um dem medizinischen Laien ein minimales Verständniswissen anbieten zu können, wurde aus Zitaten der digitalen Enzyklopädie "Microsoft ® Encarta ® Professional 2003 © 1993-2002 Microsoft Corporation" ein Glossar zusammengestellt und am Ende der Arbeit angefügt.**



10. Anhang

10.1. Urkunde über die Eintragung des Projektnamens  
als Handelsmarke



## 10.2. Einverständniserklärung und Taucher-Informationsblatt

**Freie Universität Berlin**

Universitätsklinikum Benjamin Franklin  
WISSENSCHAFTLICHE EINRICHTUNG (18)

Institut für Sportmedizin

Frank Weist, Inst. für Sportmedizin, Clayallee 229, 14195 Berlin

**FU** | **Berlin**

### **Einverständniserklärung zur Teilnahme an der Studie "Effekte von simulierten 44 m Tieftauchgängen auf die Katecholamin- konzentration sowie die Herzfrequenzvariabilität unter Verwendung von Sauerstoff, Druckluft und Heliox als Atemgasen**

- Ich erkläre mich bereit, freiwillig an der Studie teilzunehmen.
- Ich habe die durch Herrn Dr. Mathias Hölzl unternommene Aufklärung über die Art und die Durchführung der Taucherstudie verstanden. Ich hatte Gelegenheit, das Informationsblatt für Patienten über diese Studie genau durchzulesen und bei einem ausführlichen Gespräch mit dem Arzt die Möglichkeit, Antwort auf meine Fragen zu bekommen. Ich wurde von dem überwachenden Arzt über mögliche Beeinträchtigungen der Gesundheit oder des Wohlbefindens, die durch die Teilnahme an der Studie entstehen können, aufgeklärt. Ein Exemplar des Informationsblattes ("Patientenaufklärung") ist mir zum Verbleib ausgehändigt worden.
- Ich erkläre mich bereit, den überwachenden Arzt sofort über unerwartete oder ungewohnte Symptome zu informieren.
- Ich bin mit der Erfassung meiner Daten und der Speicherung per EDV zur wissenschaftlichen Auswertung dieser Studie einverstanden. Mit der Einsichtnahme in meine personenbezogenen Daten durch Mitarbeiter dieser Studie, die zur Verschwiegenheit verpflichtet sind, erkläre ich mich einverstanden. Eine Weitergabe der Daten an Studienärzte und zur Veröffentlichung der Ergebnisse aus dieser Studie erfolgt anonym nach den Datenschutzbestimmungen.
- Ich weiß, daß ich das Recht habe, meine Einwilligung zur Teilnahme an der Studie jederzeit ohne Angabe von Gründen und ohne persönliche Nachteile zurückzuziehen. Vor meiner Zustimmung zur Teilnahme an der Studie wurde mir ausreichend Bedenkzeit gewährt.

Ort, Datum

Unterschrift des  
Arztes

Ort, Datum

Unterschrift des  
Tauchers

**Taucher-Informationsblatt zur Studie**  
**"Effekte von simulierten 44 m Tieftauchgängen auf die Katecholamin-**  
**konzentration sowie die Herzfrequenzvariabilität unter Verwendung von**  
**Sauerstoff, Druckluft und Heliox als Atemgasen**

Lieber Taucher,

wie Sie wissen sind Störungen im Herz-Kreislauf-System eine häufige Ursache tödlicher Tauchunfälle. Meistens wird jedoch nur noch die Todesursache durch eine Autopsie eindeutig bestimmt. Die Hintergründe können in den allerwenigsten Fällen eindeutig geklärt werden.

Es ist seit langem bekannt, daß unser vegetatives Nervensystem erheblichen Einfluß auf sämtliche menschlichen Vitalfunktionen inklusive Herz und Kreislauf ausübt. Dieses vegetative Nervensystem wird in einen für die "Auf"regung zuständigen Sympathikusnerv und einen mit der "Ab"regung beauftragten Parasympathikusnerv unterteilt. Deren Aktivitäts- bzw. Erregungszustände kann man messen, indem man die Konzentration der Botenstoffe im Blut feststellt, die diese beiden Nerven an die zu steuernden Organe (Herzmuskel, Atemzentrum, Leber, Skelett- und Gefäßmuskulatur) ausschütten. Je höher die Sympathikusaktivität liegt, desto stärker ist die Belastung des Herz-Kreislauf-Systems. In welchem Maß Tauchen den Sympathikus aktiviert ist bisher unzureichend untersucht. Dies mag einer der Gründe -vielleicht sogar der Hauptgrund- dafür sein, daß viele untrainierte Sporttaucher mit gültiger Tauchtauglichkeit im Urlaub tödlich verunglücken. Ziel dieser Studie ist es festzustellen inwieweit ein lockerer Lusttauchgang das Herz-Kreislauf-System durch die Sympathikusaktivierung belastet. Daraus können Schlußfolgerungen werden für künftige Tauchtauglichkeitsuntersuchungen gezogen und hoffentlich auch Unfälle von Urlaubstauchtouristen vermieden werden.

Diesem Nutzen für Sie und andere Taucher stehen folgende Gefahren gegenüber, die sich einerseits aus dem Tauchgang selbst, andererseits aus dem medizinischen Eingriff zur mehrfachen Blutabnahme ergeben:

Die Tauchprofile sind nicht Gegenstand der Fragestellung dieser Studie. Es wird auf bewährte Austauchtafeln zurückgegriffen und ein konservatives Dekompressionsprofil gefahren. Durch die medizinische Untersuchung nach G 31-2 ist Ihre Tauchtauglichkeit nachgewiesen. Dennoch beinhaltet jeder Tauchgang eine gewisse Grundgefährdung für den Taucher. Dazu gehören unter anderem:

- \* Barotraumata sämtlicher luftgefüllter Hohlräume im Körper (z. B. Nasennebenhöhlen, Mittelohr, Innenohr, mangelhafte Zahnfüllungen)
  - Schmerzen, Blutungen, Lösen von Zahnfüllungen, Trommelfellriß, Einschränkung oder Verlust der Hörfähigkeit
- \* Gasvergiftungen (z. B. N<sub>2</sub> ⇒ Tiefenrausch, O<sub>2</sub> ⇒ Krampfanfälle, CO bei mangelhafter Atemluft, CO<sub>2</sub> bei Pendelatmung)
  - **Bewußtlosigkeit, Atemstillstand, Tod**
- \* Dekompressionsunfälle & Lungenüberdruckunfälle
  - Hautjucken, Schmerzen, **Lähmungen, Atemstörungen, organische & nervliche Funktionsstörungen, Tod**
- \* Aspiration von Wasser
  - **Stimmritzenkrampf, Ertrinkungstod**

Das Legen des arteriellen Zuganges erfolgt durch einen erfahrenen Anästhesiearzt. Zwischenfälle bei dieser Art von Eingriffen sind in der Regel eher bei alten, kranken Menschen zu erwarten und dann, wenn man ein Medikament über diesen Zugang verabreicht. So können Blutergüssen und Entzündungen auftreten, die jedoch wieder vollständig ausheilen. Selten kann es dann zu Durchblutungsstörun-

gen der Hand kommen, wenn sich die punktierte Arterie zusammenzieht. Zwar wird jede menschliche Hand von zwei Arterien versorgt, sofern aber auch die zweite Arterie in ihrer Funktion eingeschränkt ist (z. B. durch Verkalkung) und die Unterversorgung der Hand nicht bemerkt wird, ist in sehr seltenen Fällen die Amputation einer Hand dokumentiert. Die Funktion der zweiten Arterie kann von jedem Taucher selbst auf einfache Weise vor der Punktion überprüft werden.

Alle genannten Gesundheitsrisiken können bei rechtzeitigem Erkennen durch ärztliche oder technische Sofortmaßnahmen minimiert werden. Daher ist es von äußerster Wichtigkeit, daß Sie auch kleine Unregelmäßigkeiten, Unwohlsein oder Schmerzen dem Arzt oder dem Druckkammerpersonal bekanntgeben. Auch auf geringste Normabweichungen bei ihren Tauchpartnern bitte ich Sie verstärkt zu achten und gegebenenfalls zu reagieren.

**Der Tauchgang und auch das Plazieren des arteriellen Zuganges findet unter bestmöglichen Bedingungen statt, die alle bestehenden Risiken auf ein Mindestmaß reduzieren. Der Kontakt zu einem erfahrenen Taucherarzt und Anästhesisten ist für die Dauer der Tauchprofile sichergestellt.**

Sollten während der Studie irgendwelche Fragen bezüglich der Studie auftreten, wird Ihnen der Taucherarzt jederzeit ausführliche Auskünfte geben. Die Teilnahme an dieser Studie ist freiwillig. Sie können jederzeit ohne Nennung von Gründen aus der Studie ausscheiden.

Die bei Ihnen erhobenen Daten werden ausschließlich im Rahmen der Forschung verwendet. Dabei werden die Grundsätze der ärztlichen Schweigepflicht strikt eingehalten. Die von uns erhobenen Daten und Befunde werden nicht an andere weitergegeben. Im Falle einer Veröffentlichung der Studienergebnisse in wissenschaftlichen Zeitschriften bleibt die Vertraulichkeit Ihrer persönlichen Daten gewährleistet. Eine finanzielle Entlohnung für die Teilnahme an der Studie findet nicht statt.

Der schriftlichen Veröffentlichung dieser wissenschaftlichen Studie ist eine Widmung vorangestellt. Sie wird die Namen derjenigen Taucher aufführen, welche an allen drei Tauchprofilen teilgenommen haben.

Dieses Informationsblatt sollten Sie behalten, damit Sie die Möglichkeit haben, nach dem Aufklärungsgespräch durch den Arzt noch einmal in Ruhe die Entscheidung zu überlegen, bevor Sie Ihr Einverständnis geben.

### **10.3. Meßwerte der Blut- und Herzfrequenzuntersuchungen**

Die folgende Aufstellung enthält alle im Rahmen der Blutuntersuchung ermittelten Meßwerte. Einstellige Anzahlen sind umrandet. Ein Stern\* weist auf eine leichte Hämolyse der Probe hin. Die Abkürzungen bedeuten:

SORTE: NA=Noradrenalin, EPI=Adrenalin, DA=Dopamin, C=Cortisol,  
ATEMGAS: S=Sauerstoff, L=Luft, H=Heliox

Auf den anschließenden Seiten sind alle im Rahmen der Herzfrequenzuntersuchungen ermittelten Meßwerte zu finden. Einstellige Anzahlen sind umrandet. Die Abkürzungen bedeuten:

ATEMGAS: S=Sauerstoff, L=Luft, H=Heliox,  
R=Ruheuntersuchung außerhalb der Tauchturmanlage,  
N=Nachgeholter Lufttauchgang



Aufstellung aller Meßwerte der Herzfrequenzuntersuchungen (Liste 1 von 2)

Kennung Dimension Atemgas Sorte	S_bQ_1	S_bQ_2	S_bQ_3	S_bQ_4	S_bQ_5	S_bQ_6	L_bQ_1	L_bQ_2	L_bQ_3	L_bQ_4	L_bQ_5	L_bQ_6	H_bQ_1	H_bQ_2	H_bQ_3	H_bQ_4	H_bQ_5	H_bQ_6	R_bQ_1	N_bQ_4	N_bQ_5	
	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms
	S	S	S	S	S	S	S	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	R	N	N
Untersuchszpt.	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD	RMSSD
Taucher 1	1																			23,4	32,8	33,7
Taucher 2		53,2	75,6	57,3				67,1	75,7						9,6	7,5	54,3	29,2		37,8	27,7	31,8
Taucher 3		57,9	16,4					32,7	91,9	73,2		55,8										
Taucher 4		14,5	36,8	58,5				19,9	41,8	14,1					32,1	91,3	7,2	31,4				
Taucher 5		67,3	28,7	71,7				54	70,5	17,1	15,9									27,9	58,7	63,9
Taucher 6		46,3	43,5	55,8	59,9			33,5	37,9	28,8	6,5									27,2	51,1	45,2
Taucher 7		128,7	124,4	154,5	139			30,7	108,9	108,6	129,7									50,6	116,5	101,7
Taucher 8		82,4	89,4	52,5	76,2			36,5	59,8	35,9										28,6	38,9	49
Taucher 9								21,6	54,5	14,5												
Taucher 10		62,3	71	74,1	51,2										52,3	51,3	65,9	57,6		29,8	45,5	45
Taucher 12		25,8	25,4	24,2	19,8			29,8	34,8											33,3	83,5	72,2
Taucher 13		87,6	120,6	125,5	117,1										94,3	109,9	115,2	85,7		44,3	70,7	58,8
Taucher 14		34,5	53,4	13,8	14,9			48,9	37,5	81,6	76,1				23,6	46,7	67,9	84,5				
Taucher 15		24,5	28,6	30	41,4			15,7	14,2	21,4	16,1				17,4	24,7	33,7	35,3			23,7	34,2
Taucher 16		68,5	101,4	109,9	110,7			70,7	77,4	16,3	40,1				24,8	43,8	11,9	17,9		31,9	55,5	60,2
Taucher 16		24,1	68,2	7,7	21,2			11,1	10,3	9,7	6,1				8,5	26,8	37,8	47,3				
Anzahl	0	14	14	13	10	0	0	13	13	11	8	0	0	8	8	8	8	0	0	10	11	11
Mittelwert	#DIV/0!	56	63	64	65	#DIV/0!	#DIV/0!	36	55	38	43	#DIV/0!	#DIV/0!	33	50	49	49	#DIV/0!	33	55	54	
Standardabweichung	#DIV/0!	31	36	44	44	#DIV/0!	#DIV/0!	19	29	34	43	#DIV/0!	#DIV/0!	28	34	35	25	#DIV/0!	8	27	21	
Kennung Dimension Atemgas Sorte	S_by_1	S_by_2	S_by_3	S_by_4	S_by_5	S_by_6	L_by_1	L_by_2	L_by_3	L_by_4	L_by_5	L_by_6	H_by_1	H_by_2	H_by_3	H_by_4	H_by_5	H_by_6	R_by_1	N_by_4	N_by_5	
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Untersuchszpt.	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50	pNN50
Taucher 1	2																					
Taucher 2		20,1	25,3	15,4				21,5	21,7											1	7	5,5
Taucher 3		17,4	1,4					4,2	20,9	17,9	15,4									7,7	5,5	6,9
Taucher 4		0,8	2,4	7,8				2	4,8	0,8					6	17,1	0	4,6				
Taucher 5		18,2	2	19,8				9,3	17,1	1,3	0,7									3,8	16,6	12,1
Taucher 6		10,8	12,1	14,8	16,3			5,2	12	4,5	0									3,8	12	11,2
Taucher 7		25,7	29,7	26,8	25,4			3,7	22,5	21,4	26,1									11,5	28	22,9
Taucher 8		18,5	17,2	13	16,4			6,5	12,1	4,3										5,1	8,7	12,3
Taucher 9								2,5	8,4	0,3												
Taucher 10		16,2	20,1	15,8	13,7										13,7	15,4	21,2	16,7		4,1	11,5	13,1
Taucher 12		2,2	3,9	2	1,7				3	6,7										8,5	19,3	18,5
Taucher 13		23,6	21,4	23,7	21										26,3	21,8	30,1	27,3		11,9	20,4	14,3
Taucher 14		5,7	15,3	0,7	1,1			13,9	5,6	13,9	17,3				2	11,1	18,5	24,3				
Taucher 15		2,6	3,2	5	10,8			1,4	0,3	1,9	0,8				1	2,6	8,1	9,2			1,7	8,3
Taucher 16		16,3	22,1	22,3	24,8			19,1	20,7	1,6	6,5				3,4	9,5	0,2	1,7		5,7	15,9	16,6
Taucher 16		3,7	6,3	0,2	2,9			1	0,6	0,5	0,2				0	3,7	6,9	11,8				
Anzahl	0	14	14	13	10	0	0	13	13	11	8	0	0	8	8	8	8	0	0	10	11	11
Mittelwert	#DIV/0!	13	13	13	13	#DIV/0!	#DIV/0!	7	12	6	8	#DIV/0!	#DIV/0!	7	10	12	12	#DIV/0!	6	13	13	
Standardabweichung	#DIV/0!	9	10	9	9	#DIV/0!	#DIV/0!	7	8	8	10	#DIV/0!	#DIV/0!	9	8	11	10	#DIV/0!	4	8	5	
Kennung Dimension Atemgas Sorte	S_bLF_1	S_bLF_2	S_bLF_3	S_bLF_4	S_bLF_5	S_bLF_6	L_bLF_1	L_bLF_2	L_bLF_3	L_bLF_4	L_bLF_5	L_bLF_6	H_bLF_1	H_bLF_2	H_bLF_3	H_bLF_4	H_bLF_5	H_bLF_6	R_bLF_1	N_bLF_4	N_bLF_5	
ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²	ms²
Untersuchszpt.	S	S	S	S	S	S	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	R	N	N	
Taucher 1	1																					
Taucher 2		889,83	2506,67	2537,71				2655,32	3729											554,91	1030,07	1048,31
Taucher 3		1856,35	369,55					940,66	11665,46	8524,03	3287,95									1915,59	796,03	1887,6
Taucher 4		143,06	1793,68	1984,23				412,12	2169,7	201,21												
Taucher 5		1585,5	853,63	3694,29				2010,27	3575,95	404,84	271,52									1515,09	3536,8	5795,3
Taucher 6		3189,72	3971,22	6833,07	7198,38			1425,11	4323,27	2067,83	34,23									2370,41	5103,37	5079,91
Taucher 7		10385,72	10134,28	11578,92	7800,78			1200,98	7130,53	8055,1	6495,41									2417,16	5157,22	9819,8
Taucher 8		9511,35	9482,4	3323,68	9384,14			1362,92	3132,59	1737,37										1272,48	3633,67	6346,78
Taucher 9								387,97	1762,96	238,07												
Taucher 10		3397,19	3185,38	4809,04	1820,43															836,14	2198,26	3114,4
Taucher 12		560,77	750,11	284,11	329,44			886,18	1092,27											2178,9	10605,03	8355,12
Taucher 13		3825,08	11867	10228,03	8712,98															3185,02	4807,26	3697,31
Taucher 14		1152,62	1950,6	214,01	311,05			2383,16	1097,56	5315,89	5383,41											
Taucher 15		1072,78	1677,01	1145,48	1728,39			289,83	197,23	384,51	274,2										837,58	1696,44
Taucher 16		6087,35	11641,2	15899,07	13824,81			8695,75	10898,74	238,89	1950,54									2051,12	4195,93	6712,9
Taucher 16		722,91	4552,12	58,97	681,81			124,78	90,32	112,25	38,99											
Anzahl	0	14	14	13	10	0	0	13	13	11	8	0	0	8	8	8	8	0	0	10	11	11
Mittelwert	#DIV/0!	3170	4624	4815	5179	#DIV/0!	#DIV/0!	1752	3913	2480	2217	#DIV/0!	#DIV/0!	1380	2815	2390	2150	#DIV/0!	1830	3809	4869	
Standardabweichung	#DIV/0!	3295	4241	4970	4790	#DIV/0!	#DIV/0!	2234	3788	3255	2581	#DIV/0!	#DIV/0!	1510	2457	1732	1288	#DIV/0!	794	2813	2849	

Aufstellung aller Meßwerte der Herzfrequenzuntersuchungen (Liste 2 von 2)

Kennung Dimension Atemgas Sorte	S_bHF_1	S_bHF_2	S_bHF_3	S_bHF_4	S_bHF_5	S_bHF_6	L_bHF_1	L_bHF_2	L_bHF_3	L_bHF_4	L_bHF_5	L_bHF_6	H_bHF_1	H_bHF_2	H_bHF_3	H_bHF_4	H_bHF_5	H_bHF_6	R_bHF_1	N_bHF_4	N_bHF_5	
	ms <sup>2</sup> S HF	ms <sup>2</sup> S HF	ms <sup>2</sup> S HF	ms <sup>2</sup> S HF	ms <sup>2</sup> S HF	ms <sup>2</sup> S HF	ms <sup>2</sup> L HF	ms <sup>2</sup> L HF	ms <sup>2</sup> L HF	ms <sup>2</sup> L HF	ms <sup>2</sup> L HF	ms <sup>2</sup> L HF	ms <sup>2</sup> L HF	ms <sup>2</sup> H HF	ms <sup>2</sup> H HF	ms <sup>2</sup> H HF	ms <sup>2</sup> H HF	ms <sup>2</sup> H HF	ms <sup>2</sup> H HF	ms <sup>2</sup> R HF	ms <sup>2</sup> N HF	ms <sup>2</sup> N HF
Untersuchszpt.	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	4	5	
Taucher 1	1474,08	2132,08	1087,05					1694,26	1934,91					20,75	12,87	532,84	207,63		161,36	367,94	380,68	
Taucher 2	1149,56	53,87						169,86	2080,69	1254,44	875,15								404,26	202,33	211,58	
Taucher 3	39,89	341,22	897,58					113,89	331,99	47,29				276,99	2188,3	10,88	234,19					
Taucher 4	1947,5	204,03	1752,05					780,59	1126,77	53,11	68,73								242,01	906,74	843,25	
Taucher 5	426,45	295,59	544,85	693,44				229,71	160,9	155,95	10,45								105,31	637,12	307,13	
Taucher 6	6057,88	5692,86	9438,55	9630,7				201,54	3477,75	4108,26	7098,89								907,35	4894,71	2217,07	
Taucher 7	1962,77	2232,91	592,95	1184,02				331,96	960,78	267,69									191,21	331,07	573,61	
Taucher 8								94,01	1040,66	50,61												
Taucher 9	936,18	1807,87	1588,09	756,65										809,5	657,7	988,25	835,84		330,25	537,15	453,73	
Taucher 10	147,71	158,62	136,28	94,89				214,41	406,18										237,4	1885,59	1893,07	
Taucher 12	3086,39	3195,63	3834,05	4296,9										4080	2802,02	7844,69	4906,34		342,56	1154,55	874,3	
Taucher 13	321,58	770,66	51,89	47,74				686,07	413,19	1838,44	1426,07			147,44	689,56	1823,47	2702,8					
Taucher 14	90,27	84,37	212,01	431,44				46,31	53,04	107,45	58,61			45,76	65,4	149,64	173,3			153,19	254,36	
Taucher 15	1279,69	2478,97	2715,29	3056,13				929,1	1069,41	77,63	497,28			160,33	516,34	36,4	78,07		214,28	809,92	650,34	
Taucher 16	184,47	1015,67	15,65	74,62				29,12	24,2	19,5	7,65			13,84	104,88	378,76	499,22					
Anzahl	0	14	14	13	10	0	0	13	13	11	8	0	0	8	8	8	8	0	10	11	11	
Mittelwert	#DIV/0!	1365	1462	1759	2027	#DIV/0!	#DIV/0!	425	1006	725	1255	#DIV/0!	#DIV/0!	694	880	1471	1205	#DIV/0!	314	1080	787	
Standardabweichung	#DIV/0!	1621	1607	2570	3021	#DIV/0!	#DIV/0!	481	996	1271	2415	#DIV/0!	#DIV/0!	1392	1045	2645	1726	#DIV/0!	227	1360	668	
Kennung Dimension Atemgas Sorte	S_bV_1	S_bV_2	S_bV_3	S_bV_4	S_bV_5	S_bV_6	L_bV_1	L_bV_2	L_bV_3	L_bV_4	L_bV_5	L_bV_6	H_bV_1	H_bV_2	H_bV_3	H_bV_4	H_bV_5	H_bV_6	R_bV_1	N_bV_4	N_bV_5	
	% S LF%HF	% S LF%HF	% S LF%HF	% S LF%HF	% S LF%HF	% S LF%HF	% L LF%HF	% L LF%HF	% L LF%HF	% L LF%HF	% L LF%HF	% L LF%HF	% L LF%HF	% H LF%HF	% H LF%HF	% H LF%HF	% H LF%HF	% H LF%HF	% H LF%HF	% R LF%HF	% N LF%HF	% N LF%HF
Untersuchszpt.	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	4	5	
Taucher 1		60,4	117,6	233,5				156,8	192,8											343,9	280	275,4
Taucher 2	161,5	686,1						553,8	560,7	679,6	375,8								473,9	393,5	892,2	
Taucher 3	358,7	525,7	221,1					361,9	653,6	425,6				361,8	260,4	548,3	678,3					
Taucher 4	81,5	418,4	210,9					257,6	317,4	762,3	395,1								626,1	390,1	687,3	
Taucher 5	748	1343,5	1254,2	1038,1				620,4	2687	1326	327,5								2251	801,1	1654	
Taucher 6	171,5	178,1	122,7	81				595,9	205,1	196,1	91,5								266,4	105,4	443	
Taucher 7	484,6	424,7	560,6	792,6				410,6	326,1	649,1									665,5	1097,6	1106,5	
Taucher 8								412,7	169,5	470,5												
Taucher 9	362,9	176,2	302,9	240,6										335,9	483,7	534,9	286,9		253,2	409,3	686,5	
Taucher 10	379,7	472,9	208,5	347,2				413,4	269										917,9	562,5	441,4	
Taucher 12	124	371,4	266,8	202,8										111,2	256,4	41,7	48,5		929,8	416,4	422,9	
Taucher 13	358,5	253,2	412,5	651,6				347,4	265,7	289,2	377,6			574,8	101,6	126,1	158,6					
Taucher 14	1188,5	1987,7	540,3	400,7				625,9	371,9	357,9	467,9			1484	2402,7	1523,6	1672,7			546,8	667	
Taucher 15	475,7	469,6	585,6	452,4				936	1019,2	307,8	392,3			628,3	391,1	427	420,8		957,3	518,1	1032,3	
Taucher 16	391,9	448,2	376,9	913,7				428,5	373,2	575,8	509,9			961,7	2003,9	583,7	546,2					
Anzahl	0	14	13	10	0	0	0	13	13	11	8	0	0	8	8	8	8	0	10	11	11	
Mittelwert	#DIV/0!	382	562	407	512	#DIV/0!	#DIV/0!	471	570	549	367	#DIV/0!	#DIV/0!	625	802	557	513	#DIV/0!	769	502	755	
Standardabweichung	#DIV/0!	299	508	295	322	#DIV/0!	#DIV/0!	198	678	314	125	#DIV/0!	#DIV/0!	427	881	450	511	#DIV/0!	587	264	398	
Kennung Dimension Atemgas Sorte	S_bd_1	S_bd_2	S_bd_3	S_bd_4	S_bd_5	S_bd_6	L_bd_1	L_bd_2	L_bd_3	L_bd_4	L_bd_5	L_bd_6	H_bd_1	H_bd_2	H_bd_3	H_bd_4	H_bd_5	H_bd_6	R_bd_1	N_bd_4	N_bd_5	
	Quotient S LF/HF	Quotient S LF/HF	Quotient S LF/HF	Quotient S LF/HF	Quotient S LF/HF	Quotient S LF/HF	Quotient L LF/HF	Quotient L LF/HF	Quotient L LF/HF	Quotient L LF/HF	Quotient L LF/HF	Quotient L LF/HF	Quotient L LF/HF	Quotient H LF/HF	Quotient H LF/HF	Quotient H LF/HF	Quotient H LF/HF	Quotient H LF/HF	Quotient H LF/HF	Quotient R LF/HF	Quotient N LF/HF	Quotient N LF/HF
Untersuchszpt.	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	4	5	
Taucher 1	0,603651091	1,175692282	2,334492434					1,567244697	1,927221421											3,438956371	2,799559711	2,753782705
Taucher 2	1,614835241	6,860033414						5,537854704	5,606534371	6,795087848	3,757013083									4,73850987	3,934315228	8,921448152
Taucher 3	3,586362497	5,256667253	2,210644177					3,618579331	6,535437814	4,254810742				3,617278602	2,603902573	5,483455882	6,781929203					
Taucher 4	0,814120668	4,183845513	2,10852838					2,575321231	3,173629046	7,62266993	3,950531064									6,260443783	3,900566866	6,872576342
Taucher 5	7,479704537	13,43489293	12,54119482	10,38068182				6,20395281	26,8692977	13,25957038	3,275598086									22,50887855	8,010060899	16,53993423
Taucher 6	1,714414944	1,780173762	1,226768942	0,809990966				5,95901558	2,050328517	1,960708426	0,914989527									2,663977517	1,053631369	4,429179052
Taucher 7	4,845881076	4,246655709	5,605329286	7,92566004				4,105675383	3,260465455	6,490231238										6,654882067	10,97553388	11,06462579
Taucher 8								4,126901393	1,694078758	4,704011065												
Taucher 9	3,628778654	1,76195191	3,028191097	2,405907619										3,358987029	4,836475597	5,348059701	2,868527469		2,531839516	4,092450898	6,863994005	
Taucher 10	3,796425428	4,728974909	2,084751981	3,471809464				4,133109463	2,689127973											9,178180286	5,624250235	4,413529347
Taucher 12	1,239337867	3,71350876	2,867692998	2,027736275				3,473639716	2,656308236	2,89152216	3,77499702			1,11175	2,563964641	0,416207651	0,484554678		9,297699673	4,163752111	4,228802047	
Taucher 13	3,584240313	2,531077258	4,124301407	6,515500628				6,288475491	3,718514329	3,578501629	4,678382529			14,83981643	24,02691131	15,23583267	16,72631275					
Taucher 14	11,8841254	19,87695196	5,402952691																			

## 10.4. Statistische Auswertung der Blut- und Herzfrequenzuntersuchungen

Die Tabellen enthalten die Untersuchungszeitpunkte 1 bis 6, welche sich auf NN-Niveau, in 2m oder 44m Wassertiefe befinden, in Abhängigkeit vom Atemgas.

Als Atemgase wurden verwendet: Sauerstoff (100% O<sub>2</sub>), Luft (21% O<sub>2</sub>, 79% Inertgas) und Heliox (21% O<sub>2</sub>, 79% He).

Die Daten sind Mittelwerte (MW) ± Standardfehler (SF).

**Tabelle 10.4.1:**

**Noradrenalin-Konzentrationen [pmol·l<sup>-1</sup>] im arteriellen Blutplasma**

Untersuchungszeitpunkt		Sauerstoff		Luft		Heliox	
		MW	SF	MW	SF	MW	SF
1	Ruheentnahme zu Profilbeginn	1640	169	1557	160	1660	164
2	Beginn der ersten Submersion	1425	166	1589	212	1499	228
3	Ende der ersten Submersion	1081	145	1185	156	1267	228
4	Beginn der zweiten Submersion	1637	229	1669	232	1646	273
5	Ende der zweiten Submersion	1060	157	1199	167	1270	243
6	Ruheentnahme am Profilende	1828	269	2279	236	2292	311

**Tabelle 10.4.2:**

**Adrenalin-Konzentrationen [pmol·l<sup>-1</sup>] im arteriellen Blutplasma**

Untersuchungszeitpunkt		Sauerstoff		Luft		Heliox	
		MW	SF	MW	SF	MW	SF
1	Ruheentnahme zu Profilbeginn	424	59	395	72	467	72
2	Beginn der ersten Submersion	227	46	307	51	364	72
3	Ende der ersten Submersion	282	71	254	29	316	88
4	Beginn der zweiten Submersion	353	89	256	54	418	104
5	Ende der zweiten Submersion	260	91	205	36	264	60
6	Ruheentnahme am Profilende	396	90	321	62	395	76

**Tabelle 10.4.3:**

**Dopamin-Konzentrationen [pmol·l<sup>-1</sup>] im arteriellen Blutplasma**

Untersuchungszeitpunkt		Sauerstoff		Luft		Heliox	
		MW	SF	MW	SF	MW	SF
1	Ruheentnahme zu Profilbeginn	425	53	368	44	364	57
2	Beginn der ersten Submersion	325	47	451	90	233	44
3	Ende der ersten Submersion	382	65	296	49	297	48
4	Beginn der zweiten Submersion	290	32	324	39	438	110
5	Ende der zweiten Submersion	265	43	321	48	412	107
6	Ruheentnahme am Profilende	337	60	386	77	461	84

**Tabelle 10.4.4:**

**ACTH-Konzentrationen [pg·ml<sup>-1</sup>] im arteriellen Blutplasma**

Untersuchungszeitpunkt		Sauerstoff		Luft		Heliox	
		MW	SF	MW	SF	MW	SF
1	Ruheentnahme zu Profilbeginn	36	5	27	5	32	5
2	Beginn der ersten Submersion	35	5	34	7	41	12
3	Ende der ersten Submersion	35	5	28	4	37	11
4	Beginn der zweiten Submersion	34	7	37	5	32	9
5	Ende der zweiten Submersion	32	5	29	4	38	11
6	Ruheentnahme am Profilende	29	4	27	5	26	3



**Tabelle 10.4.5:**  
Cortisol-Konzentrationen [ng-ml<sup>-1</sup>] im arteriellen Blutplasma

Untersuchungszeitpunkt		Sauerstoff		Luft		Heliox	
		MW	SF	MW	SF	MW	SF
1	Ruheentnahme zu Profilbeginn	120	28	101	25	96	13
2	Beginn der ersten Submersion	90	14	92	22	95	14
3	Ende der ersten Submersion	88	13	89	17	92	15
4	Beginn der zweiten Submersion	88	11	90	15	110	27
5	Ende der zweiten Submersion	79	10	87	14	98	24
6	Ruheentnahme am Profilende	77	9	66	14	76	10

**Tabelle 10.4.6:**  
Meßwerte der Herzfrequenzvariabilität (r-MSSD), angegeben in Millisekunden

Untersuchungszeitpunkt		Sauerstoff		Luft		Heliox	
		MW	SF	MW	SF	MW	SF
1	Ruheuntersuchung			33	3		
2	Beginn der ersten Submersion	56	31	36	19	33	28
3	Ende der ersten Submersion	63	36	55	29	50	34
4	Beginn der zweiten Submersion	64	44	38	34	49	35
5	Ende der zweiten Submersion	65	44	43	43	49	25

**Tabelle 10.4.7:**  
Meßwerte der Herzfrequenzvariabilität (pNN50), angegeben in Prozent

Untersuchungszeitpunkt		Sauerstoff		Luft		Heliox	
		MW	SF	MW	SF	MW	SF
1	Ruheuntersuchung			6	2		
2	Beginn der ersten Submersion	13	2	7	7	7	9
3	Ende der ersten Submersion	13	3	12	8	10	8
4	Beginn der zweiten Submersion	13	3	6	8	12	11
5	Ende der zweiten Submersion	13	3	8	10	12	10

**Tabelle 10.4.8:**  
Meßwerte der Herzfrequenzvariabilität im niedrigen Frequenzbereich (LF),  
angegeben in Millisekunden zum Quadrat

Untersuchungszeitpunkt		Sauerstoff		Luft		Heliox	
		MW	SF	MW	SF	MW	SF
1	Ruheuntersuchung			1830	251		
2	Beginn der ersten Submersion	3170	881	1752	620	1380	534
3	Ende der ersten Submersion	4624	1133	3913	1050	2815	869
4	Beginn der zweiten Submersion	4815	1379	2480	981	2390	613
5	Ende der zweiten Submersion	5179	1515	2217	912	2150	455

**Tabelle 10.4.9:**  
Meßwerte der Herzfrequenzvariabilität im hohen Frequenzbereich (HF),  
angegeben in Millisekunden zum Quadrat

Untersuchungszeitpunkt		Sauerstoff		Luft		Heliox	
		MW	SF	MW	SF	MW	SF
1	Ruheuntersuchung			314	72		
2	Beginn der ersten Submersion	1365	433	425	133	694	492
3	Ende der ersten Submersion	1462	429	1006	276	880	369
4	Beginn der zweiten Submersion	1759	713	725	383	1471	935
5	Ende der zweiten Submersion	2027	955	1255	854	1205	610

**Tabelle 10.4.10:**  
Werte von LF/HF, angegeben als dimensionsloser Quotient

Untersuchungszeitpunkt		Sauerstoff		Luft		Heliox	
		MW	SF	MW	SF	MW	SF
1	Ruheuntersuchung			7.68	1.86		
2	Beginn der ersten Submersion	3.82	0.80	4.71	0.55	6.25	1.51
3	Ende der ersten Submersion	5.62	1.36	5.70	1.88	8.02	3.12
4	Beginn der zweiten Submersion	4.07	0.82	5.49	0.95	5.57	1.59
5	Ende der zweiten Submersion	5.12	1.02	3.67	0.44	5.12	1.81

## 10.5. Verzeichnis der Bilder, Diagramme und Tabellen im Hauptteil

Tabelle	2.1	Atemgaspartialdrücke der Tauchprofile
Bild	3.1	Übersichtsskizze Tauchturm
Tabelle	3.2	Einschätzung der Eignung des Tauchturmes
Tabelle	3.3	Anforderungsliste mit Bewertung der drei Alternativen
Bild	3.4	Seitenkanalpumpe
Bild	3.5	Taucher in der Turmkammer
Bild	4.1	Blutentnahme im Tauchturm
Bild	4.2	Anlegen der Pulsuhr
Bild	4.3	Blutentnahme
Bild	4.4	Submersion
Diagramm	4.5	Tauchprofil I
Diagramm	4.6	Tauchprofil II
Bild	4.7	Ausschleusungsvorgang der Blutproben
Diagramm	4.8	Tauchprofil III
Diagramm	4.9	Tauchprofil I & II & III
Diagramm	4.10	Merkblatt zur Probenbehandlung
Tabelle	4.11	Absolvierte Tauchprofile
Diagramm	5.1:	Veränderung der NoradrenalinKonzentration
Diagramm	5.2:	Veränderung der AdrenalinKonzentration
Diagramm	5.3:	Veränderung der Dopaminkonzentration
Diagramm	5.4:	Veränderung der ACTH-Konzentration
Diagramm	5.5:	Veränderung der Cortisolkonzentration
Diagramm	5.6:	Veränderung der Pulsfrequenz
Diagramm	5.7:	Veränderung der Meßgröße r-MSSD
Diagramm	5.8:	Veränderung der Meßgröße pNN50
Diagramm	5.9:	Veränderung des Quotienten LF/HF
Diagramm	5.10:	Korrelation der Veränderung von Noradrenalin gegenüber pNN50 und r-MSSD
Diagramm	5.11:	Korrelation der Veränderung von Noradrenalin gegenüber LF/HF
Diagramm	5.12:	Korrelation der Veränderung von Adrenalin gegenüber pNN50 und r-MSSD
Diagramm	5.13:	Korrelation der Veränderung von Adrenalin gegenüber LF/HF

## 10.6. Medienecho auf das PROTOIS-PROJEKT

### **DER SPIEGEL**

eine ganze Seite zum Thema Sicherheit bei Sporttauchern im SPIEGEL unter dem Titel: "Aderlaß in der Druckkammer"

### **Zeitschrift GEO**

Kurzbericht auf circa ¼ Seite

### **ORB**

Reportage (circa 15 min) im Wissenschaftsmagazin

### **TV-Berlin**

Reportage (circa 5 min) im Abendmagazin

### **Deutschland-Funk**

Reportage (circa 5 min) im Hörfunk

### **UNI-Radio der Freien Universität Berlin**

Reportage (circa 2 min) als Sonderaspekt einer Sendung zum Thema Angst

## 11. Glossar

Bei der Anfertigung dieser Arbeit wurde Wert darauf gelegt, daß die in ihr enthaltenen Forschungsergebnisse sowohl von Medizinern als auch von Tauchbetriebsleitern, welche meist eine technische Ausbildung besitzen, genutzt werden können. Mit Bedacht wurde daher dieses Glossar ausführlicher angelegt, als es einerseits der Mediziner oder andererseits der Taucher für nötig halten würde. Dementsprechend befinden sich darin sowohl Fachwörter, die zum unbedingten Grundwissen eines Mediziners gehören, als auch Begriffe, welche jedem Tauchereinsatzleiter geläufig sein müssen.

Um dem medizinischen Laien ein minimales Verständniswissen anbieten zu können, wurden der digitalen Enzyklopädie "Microsoft® Encarta® Professional 2003. © 1993-2002 Microsoft Corporation" die Erklärungen folgender Begriffe entnommen und hier auszugsweise eingefügt:

"Hormone" "Endokrines System" "Nervensystem" "Neurophysiologie".

### Hormone

Hormone sind Substanzen, die beim Menschen, bei Tieren und Pflanzen wichtige Lebensprozesse des Organismus regulieren. Dazu gehören Wachstum, Stoffwechsel, Fortpflanzung und die Funktionen verschiedener Organe. Es gibt viele verschiedene Hormone, die alle eine sehr spezifische Funktion haben. Sie alle stehen in einem fein austarierten Gleichgewicht und entfalten ihre Wirkung schon bei kleinsten Konzentrationen. Der Transport der Hormone findet über die Blutbahn statt. Er ist damit langsamer als die Signalwege des Nervensystems. Die Wirkung der Hormone ist allerdings oft von längerer Dauer.

Folgende Organe produzieren hauptsächlich Hormone: Hirnanhangsdrüse (Hypophyse), Zirbeldrüse (Epiphyse), Schilddrüse, Nebenschilddrüse, Nebennierenrinde und -mark, Bauchspeicheldrüse, Keimdrüsen (Gonaden), Plazenta und – unter bestimmten Umständen – die Schleimhaut des Zwölffingerdarmes.

Die Hirnanhangsdrüse besteht aus drei Untereinheiten: dem Vorderlappen (Adenohypophyse), dem Zwischenlappen und dem Hinterlappen (Neurohypophyse). Von diesen bildet der Vorderlappen die Hauptdrüse des endokrinen Systems. Seine Hormone beeinflussen das Wachstum der Knochen, die Funktion der Schilddrüse, die Funktion der Keimdrüsen, der Nebennieren und der Nebenschilddrüse und reagieren mit dem Sekret der Bauchspeicheldrüse (Pankreas).

Die **Nebenniere** besteht aus zwei Teilen: dem inneren Mark (Medulla) und der äußeren Rinde (Cortex). Die Nebennierenrinde produziert Hormone, die den Wasser- und Ionenhaushalt des Organismus regulieren (siehe Hydrocortison). Außerdem sind die Rindenhormone von Bedeutung für die Umwandlung von Proteinen in Zucker, sodann für die Speicherung von Zucker in der Leber und auch für die Erhaltung des Widerstands gegen physische, emotionale und toxische Belastungen. Darüber hinaus entstehen auch Hormone in der Rinde, welche die Ausbildung sekundärer Geschlechtsmerkmale beeinflussen. Das Nebennierenmark ist sowohl ontogenetisch als auch funktionell von der Rinde unabhängig. Die wichtigsten Hormone, die hier produziert werden, sind **Adrenalin und Noradrenalin**. Adrenalin erhöht den Blutzuckerspiegel und wirkt stimulierend auf den Blutkreislauf sowie generell auf das **sympathische Nervensystem**.

**Wirkungsweise der Hormone:** Während ihres Transports im Blut sind Hormone an spezielle Transportproteine (Carrier) gebunden. Diese schützen sie vor vorzeitiger Auflösung im Blut sowie vor zu rascher Aufnahme durch das Zielorgan. Das Gewebe des Zielorgans besitzt normalerweise spezielle Rezeptoren für Hormone. Diese binden die Hormone so lange, bis sie gebraucht werden. Hormone wirken auf drei verschiedene Arten auf ihr Zielorgan. Erstens regulieren sie die Durchlässigkeit (Permeabilität) der äußeren und inneren Zellmembranen. Insulin z. B. erhöht die Permeabilität der Zellmembranen der Skelettmuskulatur. Dadurch können die Muskeln Glucose schneller aufnehmen. Zweitens beeinflussen Hormone die Wirkung von Enzymen in den Zellen. Das Nebennierenhormon Adrenalin z. B. bewirkt in Leber- und Muskelzellen den Abbau von Glykogen in Sechsfachzucker durch

Aktivierung des membrangebundenen Enzyms Adenylat-Cyclase. Dabei handelt es sich um eine Kaskadenreaktion verschiedener so genannter Second-Messenger-Moleküle innerhalb der Zelle. Diese wird häufig dadurch verursacht, daß ein Hormon außen am Rezeptor der Zellmembran „andockt“. Dadurch kommt es in der Zelle entweder zur Hemmung oder zur Beschleunigung bestimmter enzymatisch gesteuerter Reaktionen.

Drittens beeinflussen Hormone die Genaktivität im Zielgewebe. Man fand heraus, daß Hormone in den Chromosomen so genannte Puffs erzeugen können; dies sind temporäre Ausstülpungen der Chromosomen an bestimmten Stellen, die auf genetische Aktivität hinweisen.

Hormon	Produktionsort	Zielgewebe	Funktion
<b>Noradrenalin</b>	Nebennieren	Muskeln und Blutgefäße	erhöht Blutdruck und Herzschlag; verengt Blutgefäße
<b>Adrenalin</b>	Nebennieren	Muskeln und Blutgefäße	erhöht Blutdruck, Herzschlag, Stoffwechselrate und Blutzuckerspiegel; erweitert Blutgefäße; bereitet Körper auf Anstrengungen vor
<b>Dopamin</b>	Tuberoinfundibuläres System	Hypophysenvorderlappen	Hemmung der Prolaktinsekretion
<b>ACTH = Adrenocorticotropes Hormon</b>	Hypophysenvorderlappen	Nebennierenrinde	regt Nebennierenrinde zum Wachstum und zur Hormonproduktion (Cortison) an
<b>Cortisol</b>	Nebennierenrinde	Ubiquitär	Glucosestoffwechsel; Immunsuppression; Wachstum und Entwicklung; Calciumabsorption

### Endokrines System

Das Endokrine System ist die Sammelbezeichnung für alle Organe und Gewebe, die Hormone produzieren. Die endokrinen Organe sind Drüsen, die aber keine Ausführungsgänge besitzen, weil sie ihre Produkte unmittelbar ins Blut ausschütten. Exokrine Drüsen dagegen setzen ihre Sekrete an inneren oder äußeren Oberflächen frei: an der Haut, an der Magenwand oder in den Pankreasgängen. Die Hormone, die von endokrinen Drüsen erzeugt werden, steuern das Wachstum, die Entwicklung und die Funktionen vieler Organe; außerdem koordinieren sie die Stoffwechselfvorgänge. Als Endokrinologie bezeichnet man die Wissenschaft von den endokrinen Drüsen und den von ihnen produzierten Hormonsubstanzen, deren physiologischen Wirkungen und den Störungen und Krankheiten, die bei Fehlfunktionen auftreten.

**Hirnanhangsdrüse:** Die Hirnanhangsdrüse, auch Hypophyse genannt, besteht aus drei Teilen: dem Vorderlappen, dem Mittellappen (der bei Primaten nur während eines kleinen Teiles ihrer Lebensspanne vorhanden ist) und dem Hinterlappen. Die Hypophyse liegt an der Unterseite des Gehirns und ist gewissermaßen die „Oberdrüse“ des Körpers. Ihr Vorder- und Hinterlappen scheiden unterschiedliche Hormone aus. Aus dem Vorderlappen stammen mehrere Hormone, welche die Funktion anderer endokriner Drüsen anregen: Dazu zählen das adrenocorticotrope Hormon (ACTH), das die Nebenniere anregt, das Thyrotropin (TSH), das die Schilddrüse steuert, das follikelstimulierende Hormon (FSH) und das luteinisierende Hormon (LH), die auf die Geschlechtsdrüsen wirken, sowie das Prolactin, das zusammen mit anderen spezialisierten Hormonen die Milchproduktion in den Brustdrüsen beeinflusst.

**Nebennieren:** Jede der beiden Nebennieren besteht aus einem inneren Teil, dem Nebennierenmark, und der äußeren Nebennierenrinde. Die beiden Nebennieren liegen unmittelbar über den Nieren. Im Nebennierenmark entstehen Adrenalin und Noradrenalin, die eine ganze Reihe von Körperfunktionen beeinflussen. Sie beschleunigen den Herzschlag, lassen den Blutdruck steigen und steuern die Verengung und Erweiterung von Blutgefäßen und Muskulatur. Adrenalin (aber nicht Noradrenalin) steigert den Blutzuckerspiegel. Alle diese Wirkungen tragen dazu bei, daß der Organismus akute Notsituatio-

nen besser und wirksamer bewältigen kann. Die Nebennierenrinde erzeugt die Glucocorticoide, eine ganze Gruppe von Hormonen. Dazu gehören u. a. das Hydrocortison und die Mineralocorticoide mit Aldosteron und anderen Hormonen, die für die Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen und die Streßbewältigung unentbehrlich sind.

Hormonstoffwechsel: Alle bekannten Hormone gehören zu einer von drei Gruppen chemischer Verbindungen: Sie sind entweder Proteine, Steroide oder Amine. Zu den Polypeptid- oder Proteinhormonen gehören die Produkte von Hypophysenvorderlappen, Nebenschilddrüsen, Plazenta und Bauchspeicheldrüse. Die Hormone von Nebennierenrinde und Geschlechtsdrüsen gehören zu den Steroiden. Amine entstehen im Nebennierenmark und in der Schilddrüse. Die Hormone werden in den Zellen synthetisiert und bleiben in den meisten Fällen dort, bis sie ins Blut ausgeschüttet werden. Schilddrüse und Eierstöcke besitzen aber auch besondere Hohlräume für die Hormonspeicherung.

Die Ausschüttung der Hormone ist abhängig von anderen Hormonen im Blut, von bestimmten Stoffwechselprodukten, die von Hormonen beeinflußt werden, und von Nervenreizen. Im Hypophysenvorderlappen wird die Hormonproduktion gehemmt, wenn die Hormone der von ihm beeinflußten Drüsen – also der Nebennieren, der Schilddrüse oder der Geschlechtsdrüsen – bereits im Blut kreisen. Ist beispielsweise das Schilddrüsenhormon in einer bestimmten Konzentration im Blut vorhanden, stellt die Hypophyse die Produktion von Thyreotropin so lange ein, bis der Spiegel des Schilddrüsenhormons wieder gesunken ist. Die Hormonmenge im Blut wird also ständig im Gleichgewicht gehalten. Dieser Mechanismus, negative Rückkopplung genannt, ähnelt dem Heizsystem mit einem Thermostaten, der die Heizung je nach der Raumtemperatur ein- und ausschaltet.

Werden die Hormone von Nebennierenrinde, Schilddrüse oder Geschlechtsdrüsen über längere Zeit von außen zugeführt, kommt die Produktion der zugehörigen Anregungshormone in der Hypophyse völlig zum Erliegen, und schließlich verkümmern die von diesen beeinflußten Drüsen. Produziert eine solche Drüse dagegen ständig zu wenig Hormon, kommt es durch die fortwährende Einwirkung des stimulierenden Hypophysenhormons zu einem übermäßigen Wachstum dieser Drüse; so entsteht z. B. bei Iodmangel der Kropf.

Ein weiterer Faktor, der die Hormonausschüttung beeinflußt, ist die Blutkonzentration bestimmter Substanzen, deren Vorhandensein oder Verwertung von Hormonen gesteuert wird. Ein hoher Glucosepiegel im Blut regt die Produktion und Ausschüttung von Insulin an. Ist der Blutzuckerspiegel dagegen niedrig, werden die Nebennieren zur Produktion von Adrenalin und Glucagon stimuliert, so daß dieser Teil des Kohlenhydratstoffwechsels im Gleichgewicht bleibt. Entsprechend führt Calciummangel im Blut zu verstärkter Produktion des Parathormons; ein hoher Calciumspiegel regt dagegen die Schilddrüse zur Produktion von Calcitonin an.

Das endokrine System wird auch vom Nervensystem beeinflußt. Dies zeigt sich z. B. an der Reaktion der Nebennieren auf Streß. Die Nerven üben ihre Wirkung auf die endokrinen Organe auf mehreren Wegen aus. Das Nebennierenmark und der Hypophysenhinterlappen werden von zahlreichen Nerven versorgt, so daß das Nervensystem sie unmittelbar steuern kann. Nebennierenrinde, Schilddrüse und Geschlechtsdrüsen dagegen reagieren zwar ebenfalls auf Nervenreize, aber Nerven, die unmittelbar auf sie einwirken, sind nicht zu erkennen.

Wie Hormone ihre vielen Wirkungen auf Struktur und Stoffwechsel im Einzelnen ausüben, ist nicht bekannt. Auf die Zellfunktion wirken sie aber wahrscheinlich entweder über die Zellmembran, über Enzyme, über die Regulation der Genexpression oder über die Steuerung der Ausschüttung von Ionen und kleinen Molekülen. Hormone werden durch den Stoffwechsel nicht verbraucht oder verändert, aber sie können chemisch teilweise abgebaut werden. Die Endprodukte dieses Vorgangs werden schnell ausgeschieden; man findet sie vor allem im Urin, aber auch im Kot und im Schweiß.

### Nervensystem

Das Nervensystem ist ein hierarchisch gegliedertes System miteinander verbundener Nervenzellen (Neuronen). Es ist für die Aufnahme und Weiterleitung von Reizen, für die Erregungsverarbeitung, für die Aktivierung der Muskeln sowie für die Koordination und Aufrechterhaltung von Organfunktionen des vielzelligen Organismus zuständig. Die Reizwahrnehmung erfolgt durch spezialisierte Sinneszellen

oder Rezeptoren, die Weiterleitung der Information durch spezialisierte Zellen, so genannte Neuronen (Nervenzellen, Ganglienzellen).

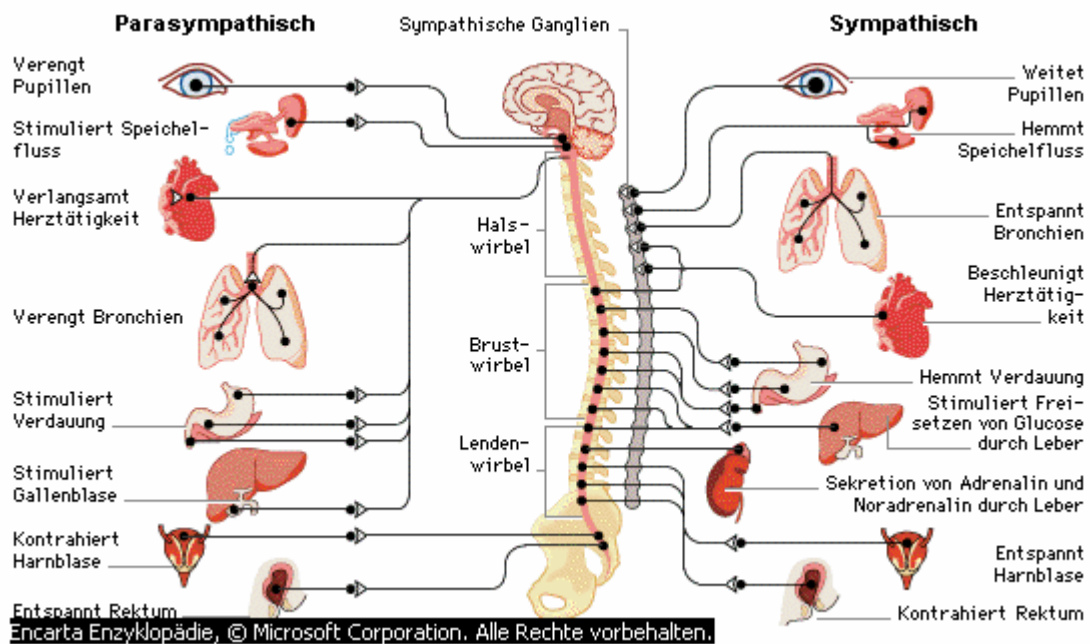
**Nervenzellen (=Neuronen)** gliedern sich generell in einen plasmareichen Zellkörper (Perikaryon), der u. a. den Zellkern enthält, sowie einer wechselnden Zahl erregungsleitender Zellfortsätze – Axon und Dendriten. Dendriten sind relativ kurze, verästelte Fortsätze, über welche die Nervenzelle Erregungsimpulse anderer Nervenzellen erhält. Das Axon ist dagegen in der Regel sehr lang und überträgt die Antwortsignale der Nervenzelle an andere Nervenzellen. Die Fähigkeit der Nervenzellen, auf bestimmte Reize mit einer bestimmten Aktivität zu reagieren, macht sie zu einem wichtigen Element bei der Übermittlung von Information zwischen den Teilen des Körpers. Siehe Neurophysiologie

Das Nervensystem der Wirbeltiere weicht in seinem Bau stark von dem der wirbellosen Tiere ab. Nach der Lage im Körper wird das Nervensystem der Wirbeltiere in das Zentralnervensystem und das periphere Nervensystem unterteilt. Zum Zentralnervensystem gehören das Gehirn und das entlang der Wirbelsäule gelegene Rückenmark. Es ist mit dem Gehirn über eine Öffnung an der Schädelbasis verbunden. Alle übrigen Teile des Nervensystems gehören zum peripheren Nervensystem. Beide Teile des Zentralnervensystems sind mit den übrigen Regionen des Körpers durch Nervenfasern verbunden.

Die Haut ist mit verschiedenen hoch spezialisierten Sinneszellen ausgestattet, von denen jede auf einen ganz bestimmten Außenreiz reagiert und diesen auf nervöse Leitungselemente überträgt. Man unterscheidet primäre und sekundäre Sinneszellen. Primäre Sinneszellen haben einen eigenen Fortsatz, der die Erregung zum Zentralnervensystem weiterleitet. Sekundäre Sinneszellen sind reine Rezeptorzellen und besitzen keinen Fortsatz. Die Weiterleitung erfolgt über nachgeschaltete Nervenzellen. Außerdem gibt es in der Haut noch weit verzweigte, freie Nervenendungen von so genannten Sinnesnervenzellen, die u. a. bei der Schmerzwahrnehmung eine Rolle spielen. Die Sinneszellen leiten den aufgenommenen Reiz entweder direkt an ein Motorneuron, das seinerseits einen Muskel innerviert, oder an Nervenbahnen, die weiter entfernt liegende Zentren im Nervensystem innervieren. Im ersten Fall besteht die Reizreaktionskette aus zwei hintereinander geschalteten Neuronen, wobei das erste Neuron ein sensibles (afferentes), das zweite ein motorisches Neuron ist. Diese Verbindung bezeichnet man auch als Reflexbogen. Viele Funktionen des Nervensystems, wie z. B. die Drüsentätigkeit oder der Schluck- und Niesreflex, werden über Reflexbögen, ohne Beteiligung des Gehirns, gesteuert.

**Hauptnervenbahnen:** Man unterscheidet zwischen Kopfnerven (Kranialnerven) und Rückenmarksnerven (Spinalnerven). Die Kopfnerven ziehen durch viele Öffnungen (Foramen) im Schädel von Kopf und Nacken zum Gehirn. Die Nerven des Rückenmarks (Spinalnerven) verlassen die Wirbelsäule durch entsprechende seitliche Öffnungen der Wirbelsäule. Beide Nervengruppen enthalten sowohl zum Gehirn bzw. Rückenmark führende (**afferente**) als vom Zentralnervensystem abgehende (**efferente**) Bahnen. Afferente Fasern sind daher sensorisch, efferente Fasern sensorisch oder motorisch, je nachdem welches Gebiet sie innervieren.

Das vegetative (autonome) Nervensystem besteht aus großen Faserkomplexen, welche die inneren Organe, Herz, Blutgefäßsystem und Drüsen innervieren. Man unterscheidet hinsichtlich der Funktion zwei mehr oder weniger antagonistisch arbeitende Untersysteme: **das sympathische (Sympathikus) und das parasympathische (Parasympathikus) Nervensystem**. Die Wirkung des Sympathikus auf den Organismus ist im Allgemeinen anregend, die des Parasympathikus beruhigend. Der Sympathikus nimmt seinen Ursprung etwa in der Mitte des Rückenmarks und verzweigt sich über weite Teile des Körpers. Der Parasympathikus entspringt aus den übrigen Bereichen des Rückenmarks, also aus der Kopfregion und der Sakralregion. Auch er ist stark verzweigt und innerviert im Wesentlichen dieselben Organe wie der Sympathikus.

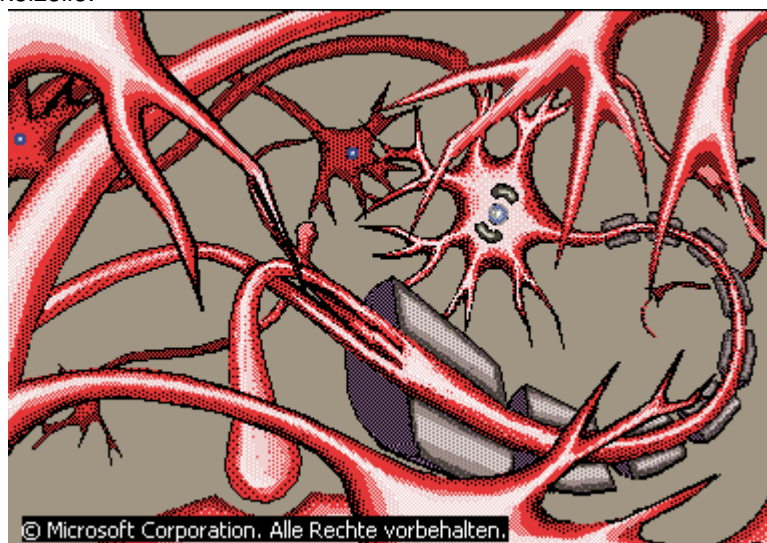


**Skizze: Das Vegetative Nervensystem** Es steuert alle Aktivitäten des Körpers, die ohne bewusste Kontrolle ablaufen; dazu gehören Atmung und Verdauung. Es besteht aus zwei Teilen: Der sympathische Teil regelt die körperlichen Aktivitäten bei Anstrengung oder Stress, der parasympathische Teil stellt den Körper auf Nahrungsaufnahme und Ruhe ein.

### Neurophysiologie

Die Neurophysiologie ist das Wissenschaftsgebiet, das sich der Frage widmet, wie Nervenzellen (Neuronen) Informationen empfangen und übermitteln. An der Verarbeitung von Nervensignalen sind elektrische und chemische Vorgänge beteiligt. Die Weiterleitung der Signale innerhalb eines Neurons erfolgt auf elektrischem Weg, und chemische Prozesse sorgen für die Übertragung der Signale von einem Neuron zum nächsten oder zu den Muskelzellen. Siehe Nervensystem

Ein Neuron besteht aus einem mehr oder weniger runden Zellkörper mit einem langen Fortsatz (dem Axon) und mehreren kurzen, verzweigten Auswüchsen (den Dendriten). Die Dendriten nehmen die Impulse von anderen Neuronen auf. (Eine Ausnahme von dieser Regel bilden sensorische Neuronen, die z. B. Informationen über Temperatur oder Berührung weiterleiten: Sie erhalten ihre Signale von besonderen Rezeptoren.) Die Impulse werden entlang der Zellmembran elektrisch bis zum Ende des Axons weitergeleitet. An der Spitze des Axons fließt das Signal auf chemischem Wege zum nächsten Neuron oder zu einer Muskelzelle.



**Skizze: Neuron** mit mehr oder weniger rundem Zellkörper, Dendriten und Axon



**Elektrische Nervenleitung:** Ein Neuron ist polarisiert, d. h., auf der Innenseite der Zellmembran befindet sich eine negative elektrische Ladung. Dies hat folgende Ursache: Die positiv geladenen Kaliumionen können sich ungehindert durch die Membran hindurchbewegen, während die großen, negativ geladenen Moleküle in der Zelle festgehalten werden. Die ebenfalls positiv geladenen Natriumionen werden durch einen aktiven Transportvorgang aus der Zelle entfernt. Diesen Ladungsunterschied gibt es bei allen Zellen, aber wenn an einer Nervenzelle ein Reiz in Form eines Stromstoßes ankommt, geschieht etwas Besonderes: Zunächst strömen Kaliumionen in die Zelle, so daß die negative Ladung geringer wird (Depolarisierung). Daraufhin ändern sich die Membraneigenschaften so, daß Natrium in die Zelle eindringen kann. Das geschieht nun sehr schnell, so daß sich im Zellinneren insgesamt eine positive Ladung aufbaut. Diese Ladung bezeichnet man als Aktionspotential.

Wenn sich das Aktionspotential an einer Stelle des Neurons eingestellt hat, wandert es durch am Axon entlang. Das Aktionspotential begrenzt sich in seiner Höhe von selbst, denn wenn die Natriumkonzentration im Zellinneren zu stark ansteigt, werden zuerst die Kalium- und später die Natriumionen wieder nach außen gepumpt, so daß sich auf der Innenseite der Zellmembran wieder die negative Ladung einstellt. Damit ist das Neuron wieder polarisiert. Der ganze Vorgang dauert noch nicht einmal eine Tausendstelsekunde. Schon nach sehr kurzer Zeit kann das Neuron den gleichen Ablauf erneut durchmachen.

**Chemische Nervenleitung:** Wenn das elektrische Signal die Spitze des Axons erreicht, regt es in der Zelle die kleinen präsynaptischen Vesikel an; diese winzigen Bläschen enthalten Neurotransmitter, chemische Botenstoffe, die in den nicht einmal im Lichtmikroskop sichtbaren Zwischenraum zwischen den Neuronen (den synaptischen Spalt) entlassen werden. An der Oberfläche des benachbarten Neurons heften sich die Moleküle des Neurotransmitters an besondere Rezeptoren. Das erzeugt einen Reiz, der zur Depolarisierung der Nachbarzelle und damit zur Entstehung eines neuen Aktionspotentials führt. Der vom Neurotransmitter vermittelte Reiz ist nur von begrenzter Dauer (er beträgt einige Millisekunden), weil die Substanzen im synaptischen Spalt durch Enzyme abgebaut oder von dem Neuron, das sie abgegeben hat, wieder aufgenommen werden. Neurotransmitter können erregende und hemmende Funktionen haben. Früher glaubte man, jedes Neuron produziere nur einen Neurotransmitter; wie sich jedoch in jüngster Zeit herausgestellt hat, bilden manche von ihnen auch mehrere solche Substanzen.

**Ende des Zitats aus der digitalen Enzyklopädie**

**”Microsoft ® Encarta ® Professional 2003. © 1993-2002 Microsoft Corporation” .**

**ACTH** ⇒ ACTH: Abk. für adrenocorticotropes Hormon (syn. Kortikotropin, Corticotropin); aus 39 Aminosäuren bestehendes glandotropes Proteohormon mit Wirkung auf die Nebennierenrinde (Abk. NNR), dessen Synthese im Hypophysenvorderlappen u. Ausschüttung durch CRH\* gesteuert wird u. einem zirkadianen Rhythmus\* unterliegt (höchste Werte am Morgen); für die physiol. Wirkung sind nur die ersten 23 Aminosäuren erforderl. (vgl. Tetracosactid). Aus dem ACTH-Prohormon Proopiomelanocortin\* entstehen auch andere Peptidhormone. Wirkungen: ACTH fördert (über eine Aktivierung der Adenylatcyclase) die Synthese v. a. der Glukokortikoide\* in der NNR, führt zu einer Steigerung der Lipolyse\* u. indirekt zu einer vermehrten Ausschüttung von Insulin. Die Bildung wird u. a. durch hohe Glukokortikoidspiegel im Serum gehemmt, durch Kälte u. Streß (Adrenalin) gefördert; erhöhte Serumkonzentrationen v. a. bei Nebennierenrindeninsuffizienz\*, Cushing\*-Syndrom u., inf. ektope Bildung von ACTH, bei paraneoplastischem Syndrom\* (s. Tumormarker) u. ACTH-bildendem Apudom\*. Med. Anwendung v. a. als Diagnostikum (s. ACTH-Test) u. zur Nachbehandlung nach Kortikoidtherapie. [Pschyrembel 2002]

**Adrenalin** ⇒ Ad|renalin n: (engl.) adrenaline, epinephrine; syn. Epinephrin (INN); zu den Katecholaminen\* gehörender Neurotransmitter u. Hormon des Nebennierenmarks (Abk. NNM); Biosynthese aus Tyrosin\* über DOPA, Dopamin\* u. Noradrenalin\* im chromaffinen Gewebe\*, NNM u. in den Paraganglien des Sympathikus; Ausschüttung aus dem NNM wird durch Nervenimpulse über die Nn. splanchnici angeregt; bei Streß stark erhöht; A. bindet an adrenerge Rezeptoren, das Signal wird über ein G-Protein vermittelt, die Aktivität der Adenylatcyclase\* erhöht u. cAMP gebildet. Wirkung: rasche Bereitstellung von Energie durch Steigerung von Pulsfrequenz, Herzminutenvolumen u. systol. Blutdruck, Verminderung der Darmperistaltik, Erschlaffung der Bronchialmuskulatur, Erweiterung der Bronchien u. Pupillen, Grundumsatzsteigerung durch Förderung des O<sub>2</sub>-Verbrauchs, Hyperglykämie durch Mobilisierung von Glykogen, Steigerung der Lipolyse\*; therap. Verw.: bei anaphylaktischem Schock, Reanimation, als Zusatz zu Lokalanästhetika; UAW: s. Sympathomimetika. [Pschyrembel 2002]

**Adrenozeptoren** (A|dre|no|zep|to|ren) (engl.: adrenoceptors) pl: durch Adrenalin\*, Noradrenalin\* und andere Catecholamine\* / ⇒ Katecholamine erregte Rezeptoren des sympathischen Nervensystems; Oberbegriff für Alpharezeptoren\* und Betarezeptoren\* [Pschyrembel 2002]

**Agoraphobie** ⇒ Agora|phobie f:

(engl.) agoraphobia; Platzangst; Phobie\*, bei der vermieden wird, sich auf öffentl. Straßen u. Plätzen aufzuhalten, öffentl. Verkehrsmittel zu benutzen od. einen schützenden Raum (Wohnung) zu verlassen; Folge einer Panikstörung. [Pschyrembel 2002]

**aliquotieren**: aufteilen (vom lateinischen Adverb aliquot=einige) [FW]

**alpha oder beta-Adrenozeptor**: siehe unter **Alpha-Rezeptoren**

**alpha-adrenerge Wirkung**: Wirkung, die durch Besetzung von Alpha-Rezeptoren mit Katecholaminen wie Adrenalin und Noradrenalin ausgelöst wird.

**alpha-Fehler** ⇒ **Fehler 1. Art**:

Da es sich bei Hypothesentests nur um Stichproben handelt, man aber trotzdem auf Grund des Versuchsergebnisses eine Entscheidung über eine Annahme oder Ablehnung der aufgestellten Nullhypothese  $H_0$  treffen muss, bleibt die Möglichkeit einer Fehlentscheidung.

Fehler 1. Art ( $\alpha$ -Fehler)

Die Nullhypothese ist zutreffend. Dennoch wird sie auf Grund des Versuchsergebnisses abgelehnt.

Fehler 2. Art ( $\beta$ -Fehler)

Die Nullhypothese ist nicht zutreffend, wird aber auf Grund des Versuchsergebnisses angenommen.

Beiden Fehlervarianten können Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden, mit denen sie eintreten. Die jeweilige Wahrscheinlichkeit ist abhängig von der Anzahl der Stichproben  $n$ , dem gewählten Annahmebereich  $A$  und außerdem von der tatsächlichen Wahrscheinlichkeit für das Eintreten des Ergebnisses  $\omega$ . [Wikipedia]

**Alpha-Rezeptoren**: (Al|pha|re|zep|to|ren) (engl.: alpha receptors) pl: Syn: alphaadrenerge Rezeptoren, Alpha - Rezeptoren ; auf Adrenalin\*, Noradrenalin\* und andere Catecholamine\* ansprechende Rezeptoren des sympathischen Nervensystems; man unterscheidet zwei Familien von Alpharezeptoren [ Alpha1-Rezeptoren, Alpha 2-Rezeptoren], die jeweils in mehr als 3 Untertypen unterteilt werden können; Alpha 1 -Rezeptoren finden sich postsynaptisch in den peripheren Zielorganen des Sympathikus; sie werden von Adrenalin und Noradrenalin etwa gleich stark erregt; Alpha 2 -Rezeptoren finden sich sowohl präsynaptisch als auch peripher postsynaptisch und im Zentralnervensystem; sie sprechen stärker auf Adrenalin als Noradrenalin an; s.a. Adrenozeptoren [Pschyrembel 2002]

**Analyse f**: (engl.) 1. analysis, 2. psychoanalysis; 1. (chem.-physik.) Zerlegung, Untersuchung; Ermittlung der Zusammensetzung eines Stoffgemisches durch chem. od. physik. Methoden; 2. Kurzbez. für Psychoanalyse\*. [Pschyrembel 2002]

**Anuren** ⇒ An-uren die; nur Mz. (biol.) schwanzlose Froschlurche [Encarta 2003]

**Arteriole ⇒ Arteriola f (pl Arteriolae):**

(engl.) arteriole; Arteriole; letzter Gefäßabschnitt der Arterien, dem Kapillaren folgen; besitzt Endothel, ein Gitterfasernetz u. einschichtig u. zirkulär angeordnete, glatte Muskelzellen; die Membrana elastica interna fehlt, so daß myoendotheliale Kontakte entstehen; reguliert als Widerstandsgefäß den Blutfluss in der Kreislaufperipherie. [Pschyrembel 2002]

**As|similation f:** 1. (physiol.) Umwandlung körperfremder Ausgangsstoffe in körpereigene Substanzen; i. e. S. Aufbau körpereigener Substanzen aus Bestandteilen, die nach der Verdauung\* von Nahrungsstoffen resorbiert wurden; vgl. Dissimilation; 2. (psychiatr.) Angleichen neuer Bewusstseinsinhalte an vorhandene Vorstellungen (C. G. Jung). [Pschyrembel 2002]

**Assay (As|say)** (engl.: assay) m: Analyse, Test, Probe, Nachweisverfahren, Bestimmung [Pschyrembel 2002]

**ATP:** Abk. für Adenosintriphosphat; ⇒ Adenosinphosphate.

Adenosin|phosphate n pl: (engl.) adenosine phosphates; Adeninnukleotide, Phosphorsäureester von Adenosin\*; physiol. wichtig sind die an der 5'-OH-Gruppe der Ribose veresterten A.: 1. Adenosin-5'-monophosphat (Abk. AMP); 2. Adenosin-5'-diphosphat (Abk. ADP); 3. Adenosin-5'-triphosphat (Abk. ATP), wichtigster Energielieferant der Zelle; die ATP-Synthese durch die ATP-Synthase (s. ATPase) findet an der inneren Membran der Mitochondrien durch oxidative Phosphorylierung\* in der Atmungskette\* od. durch Substratstufenphosphorylierung z. B. in der Glykolyse\* statt. Die in ATP gespeicherte chemische Energie wird bei hydrolyt. Spaltung frei: a) ATP ® ADP + Phosphat (Pi); das Phosphat wird bei Phosphorylierungen im Kohlenhydrat-, Lipid- u. Proteinstoffwechsel, bei Regenerierung von Triphosphaten aus Diphosphaten u. bei Regenerierung von Kreatinphosphat direkt auf ein Substrat übertragen (Phosphokinasen). b) ATP ® AMP + Pyrophosphat (PPi) mit anschl. Hydrolyse von PPi zu 2 Pi; dabei wird AMP, z. B. bei Aktivierung von Aminosäuren, Fettsäuren u. Ribose übertragen. 4. Adenosin-3',5'-monophosphat (cyclisches AMP, Cyclo-AMP, cAMP\*); 5. Desoxyadenosinphosphate sind dAMP, dADP u. dATP; vgl. Nukleotide, Nukleinsäuren. [Pschyrembel 2002]

**Azidose f:** (engl.) acidosis; Störung im Säure\*-Basen-Haushalt mit Abfall des art. pH-Werts unter 7,36; durch Gegenregulation kann eine manifeste Azidämie (dekompensierte A.) u. U. verhindert u. die Entgleisung kompensiert bleiben; Formen: 1. metabolische A. mit Abfall des aktuellen Bicarbonats bzw. Standardbicarbonats\* sowie negativer Basenabweichung\*; a) Additionsazidose durch vermehrte Zufuhr od. Bildung von Säuren mit Überforderung der Säureausscheidungskapazität der intakten Nieren; die Wasserstoffionenbilanz wird positiv; häufigste Formen: Ketoazidose\*, Laktatazidose\*; i. w. S. auch Retentionsazidose mit Einschränkung der renalen Wasserstoffionenelimination (bei Nierenversagen); b) Subtraktionsazidose durch vermehrte Bicarbonatverluste (durch Galle- od. Pankreasfisteln, bei Diarrhö, Ileus u. a.); c) Verteilungsazidose: entw. Verdünnungsazidose (Dilutionsazidose) durch unphysiol. hohe Zufuhr an neutralen Lösungen u. damit rel. Verminderung von Bicarbonat od. hyperkaliämische (extrazelluläre) A. mit Verdrängung von Wasserstoffionen aus der Zelle inf. von Kaliumüberschuss; Kompensation: v. a. respiratorisch durch Hyperventilation\*; die vermehrte pulmonale CO<sub>2</sub>-Elimination führt über einen Abfall des art. pCO<sub>2</sub> zur Kompensation der A. mit Normalisierung des pH-Werts. Klin.: vertiefte Atmung (Kussmaul\*-Atmung), Blutdruckabfall, Schock u. a.; Diagn.: art. Blutgasanalyse\*, Säure\*-Basen-Status; Ther.: teilweise Korrektur (Gefahr der Alkalose) durch Zufuhr von Puffersubstanzen (v. a. Natriumbicarbonatlösung, Tris-Puffer). [Pschyrembel 2002]

**beta-Fehler:** siehe alpha-Fehler

**Beta-Rezeptoren** (engl.: Beta receptors): Syn: β-adrenerge Rezeptoren, Betarezeptoren; Rezeptoren, die auf adrenerge Transmitter [Katecholamine\*] im sympathischen System ansprechen; werden unterteilt in Beta 1-Rezeptoren [Herz, Niere] und Beta 2-Rezeptoren [Bronchien, Gefäße, Fettgewebe] [Springer Lexikon Medizin 2006]

**Betriebsdruck:** Seit 2002 unterliegen Druckbehälter mit max. zul. Betriebsdrücken über 0,5 bar (Überdruck) der EG-Richtlinie 97/23/EG (Druckgeräterichtlinie). Druckbehälter werden gemäß der Druckgeräterichtlinie neben Rohrleitungen, Dampfkessel und druckhaltenden Ausrüstungsteilen (z.B. Ventile, Filter) als Druckgerät bezeichnet und müssen mit einer EG-Konformitätserklärung (CE-Zeichen) in Verkehr gebracht werden. In Abhängigkeit von dem Gefahrenpotential (Kriterien: maximaler Betriebsdruck, Volumen, gasförmiges oder flüssiges Fluid, Fluidgruppe) werden Druckgeräte in die Kategorien I bis IV eingestuft. Der Hersteller kann aus unterschiedlichen Konformitätsbewertungsverfahren (Baumuster, Qualitätssicherungssystem, Einzelprüfung) wählen, um den Anforderungen der Druckgeräterichtlinie zu genügen. Der Druckbehälter erhält ein Herstellschild, auf dem die individuelle Herstellnummer sowie die zulässigen Betriebsdaten (Druck, Temperatur, Volumen) und das CE-Zeichen aufgeführt sind. Falls eine benannte Stelle an der Produktionsüberwachung beteiligt war, ist auch deren Kenn-Nr. neben dem CE-Zeichen anzubringen. Der Hersteller muss im Rahmen des Konformitätsbewertungsverfahrens eine Gefahrenanalyse erstellen sowie eine Betriebsanleitung erstellen mit Angaben zur bestimmungsgemäßen Verwendung, zu Montage, Inbetriebnahme, Benutzung und Wartung und ggf. zur unsachgemäßen Verwen-

dung. Die Betriebsvorschriften von Druckbehältern sind in der Betriebssicherheitsverordnung enthalten. [Wikipedia]

**Bio|trans|formation f:** Metabolisierung v. a. in der Leber durch enzymat. Umsetzung lipophiler körpereigener Stoffe, sek. Pflanzeninhaltsstoffe, mikrobieller Abbauprodukte (in Lebensmitteln enthalten od. durch Eiweißfäulnis\* entstanden) u. Xenobiotika\* (z. B. Pharmaka, Konservierungsstoffe, Pestizide) in wasserlösl. Metaboliten, die mit Galle od. Harn ausgeschieden werden; inf. B. werden Substanzen in ihrer Wirkung abgeschwächt od. entgiftet, aber auch aktiviert (sog. Giftung). Phase 1: Oxidation (z. B. von Alkohol, Barbituraten, Anilinderivaten) v. a. durch Zytochrom\*-P-450-Isoenzyme, Alkoholdehydrogenase\*, Aldehydoxidase u. Monoaminoxidase\*; auch Reduktion (z. B. von Aldehyden, Azo- u. Nitroverbindungen) u. Hydrolyse (z. B. von Estern, Amiden, Epoxiden, Glykosiden); Phase 2: Konjugation durch Kopplung mit v. a. aktivierter Glucuron- (s. Glukuronide), Schwefel- od. Essigsäure, mit N-Adenosylmethionin, Glutathion, Glycin od. Glutamin. Auch hier können sich tox. Metaboliten bilden, die bei hoher Dosierung, eingeschränkter Leber- od. Nierenfunktion zu hepatischem Koma od. Urämie führen können. [Pschyrembel 2002]

**Blut|druck|regelung:** (engl.) blood pressure control; komplexes Regelsystem (vgl. Regelkreis) zur Einstellung des arteriellen Blutdrucks; akute Änderungen (z. B. bei orthostat. Belastung) werden von den Pressorezeptoren\* an sympathische u. parasympath. Kreislaufzentren in der Medulla oblongata vermittelt, die bei Abweichung der gemessenen Druckwerte vom Sollwert den Tonus der Widerstandsgefäße, die Herzfrequenz u. die Herzkraft nerval so beeinflussen, daß der arterielle Blutdruck durch Änderung des peripheren Widerstandes u. des Herzminutenvolumens\* entsprechend eingestellt wird (neg. Rückkopplung\*). Überlagerung mit anderen Regelsystemen (Renin\*-Angiotensin-Aldosteron-System, Volumenregulation u. a.). [Pschyrembel 2002]

**Bypass ⇒ Bypass m:**

1. Umgehung eines Gefäßverschlusses mittels autologer (z. B. V. saphena magna) od. alloplastischer (Kunststoffe) Gefäßprothese; 2. Kurzschlußverbindung zur Umgehung von inoperablen Tumoren mit Verschuß. Hier: Umgehung [Pschyrembel 2002]

**Chemolumineszenz** (Che|mo|lu|mi|nes|zenz) (engl.: chemoluminescence) f: Syn: Chemilumineszenz ; durch eine chemische Reaktion hervorgerufene Lumineszenz [Springer Lexikon Medizin 2006]

**Chinone n pl:** (engl.) quinones; carbocyclische aromat. Verbindungen mit zwei Ketogruppen in o- (Orthochinone) od. p-Stellung (Parachinone); Ch. entstehen z. B. durch Oxidation von Hydrochinon od. Brenzkatechin. Natürl. Ch. sind z. B. Vitamin\* K (Phyllochinone) u. Ubichinon\*. [Pschyrembel 2002]

**chromaffin** (chrom|af|fin) (engl.: chromaffin) adj: Syn: chromaphil, phäochrom; leicht mit Chromsalzen färbbar [Springer Lexikon Medizin 2006]

**Chromato|graphie f:** (engl.) chromatography; physik.-chem. Verfahren zur Trennung von Stoffgemischen für analytische u. präparative Zwecke; das zu trennende Gemisch verteilt sich durch Austauschvorgänge auf zwei Hilfsphasen u. wird dadurch in einer für seine jeweiligen Komponenten typ. Weise aufgetrennt; Voraussetzung für die Anw. ist, daß die im Gemisch enthaltenen Stoffe sich ohne Veränderung lösen bzw. verdampfen lassen; der eigentl. Trennungsvorgang erfolgt durch versch. Prinzipien (Adsorptionschromatographie, Verteilungschromatographie bzw. Ionenaustauschchromatographie) zw. den Einzelkomponenten u. Phasen; bei den meisten Chromatographieverfahren bewegt sich eine die Probe mitführende flüssige od. gasförmige mobile Phase (Elutionsmittel) über eine feste od. flüssige stationäre Phase (Sorptionsmittel); bei flüssiger mobiler Phase spricht man von Flüssigkeitschromatographie\*, die je nach Anordnung der stationären Phase auch als Säulenchromatographie\*, Dünnschichtchromatographie\* od. Papierchromatographie\* bezeichnet wird; ist die mobile Phase gasförmig, spricht man von Gaschromatographie\*. Nach erfolgter Trennung sind für eine Identifizierung od. Quantifizierung evtl. weitere Analyseschritte (z. B. Photometrie, Radioaktivitätsmessung) erforderlich. [Pschyrembel 2002]

**Chromato|graphie f:** (engl.) chromatography; physik.-chem. Verfahren zur Trennung von Stoffgemischen für analytische u. präparative Zwecke; das zu trennende Gemisch verteilt sich durch Austauschvorgänge auf zwei Hilfsphasen u. wird dadurch in einer für seine jeweiligen Komponenten typ. Weise aufgetrennt; Voraussetzung für die Anw. ist, daß die im Gemisch enthaltenen Stoffe sich ohne Veränderung lösen bzw. verdampfen lassen; der eigentl. Trennungsvorgang erfolgt durch versch. Prinzipien (Adsorptionschromatographie, Verteilungschromatographie bzw. Ionenaustauschchromatographie) zw. den Einzelkomponenten u. Phasen; bei den meisten Chromatographieverfahren bewegt sich eine die Probe mitführende flüssige od. gasförmige mobile Phase (Elutionsmittel) über eine feste od. flüssige stationäre Phase (Sorptionsmittel); bei flüssiger mobiler Phase spricht man von Flüssigkeitschromatographie\*, die je nach Anordnung der stationären Phase auch als Säulenchromatographie\*, Dünnschichtchromatographie\* od. Papierchromatographie\* bezeichnet wird; ist die mobile Phase gasförmig, spricht man von Gaschromatographie\*. Nach erfolgter Trennung sind für eine Identifizierung od. Quantifizierung evtl. weitere Analyseschritte (z. B. Photometrie, Radioaktivitätsmessung) erforderlich. [Pschyrembel 2002]

**chronotrop** ⇒ **chrono|trop**: (engl.) chronotropic; den Zeitablauf, i. e. S. die Schlagfrequenz des Herzens beeinflussend; positiv ch. (z. B. Sympathikus): Frequenz steigernd; negativ ch. (z. B. Parasympathikus): Frequenz mindernd. [Pschyrembel 2002]

**Clearance**: Abk. C; Bez. für diejenige Plasmamenge, die pro Zeiteinheit von einer best. Substanzmenge befreit wird; die renale C. ist ein Maß für die exkretor. Nierenleistung u. wird mit Hilfe der Formel  $C = (U \cdot V)/P$  berechnet, wobei C dem Klärwert in ml/min, U der Urinkonzentration der Testsubstanz in mmol/l, V dem Harnzeitvolumen in ml/min u. P der Plasmakonzentration der Testsubstanz in mmol/l entspricht. Man kann unterscheiden zw. exogener C. von körperfremden Substanzen wie Inulin, p-Aminohippursäure u. a. sowie endogener C. von körpereigenen Stoffen wie Harnstoff, Kreatinin, Phosphat u. a. Bestimmungsmethoden: Die direkte C.-Methode mit Blasenkatheterisierung u. Dauerinfusionstechnik (klassische C.) wird nicht mehr angewendet. Bei der indirekten C.-Methode erfolgt die Beurteilung der Nierenfunktion nach einmaliger Teststoffinjektion durch die Messung der Abnahme der Serumkonzentration ohne Harnanalyse. Die Inulin-C. (C<sub>In</sub>) ist ein Maß für die glomeruläre Filtrationsrate (Abk. GFR) beim Menschen, da Inulin\* aussch. durch Glomerulusfiltration ausgeschieden u. weder rückresorbiert noch tubulär sezerniert od. metabolisiert wird. Die C. von Substanzen wie p-Aminohippursäure (Abk. PAH), die sowohl durch glomeruläre Filtration als auch durch tubuläre Sekretion ausgeschieden werden (CPAH), ist ein Maß für den renalen Plasmafluß (Abk. RPF). Aus der GFR (° C<sub>In</sub>) u. dem RPF (° CPAH) lässt sich die Filtrationsfraktion (Abk. FF) berechnen:  $FF = GFR/RPF \text{ } ^\circ C_{In}/CPAH$ . Die C.-Werte sind neben der Nierenfunktion auch vom Alter des Pat. abhängig. Klin. wichtig für die Bestimmung der GFR ist die endogene Kreatinin-C.: einmalige gleichzeitige Bestimmung von Kreatinin in Plasma u. Urin, Messung des Harnvolumens in 24 Std. Bei chron. Niereninsuffizienz ist diese Methode wegen steigender Serumkonzentration von Kreatinin nicht mehr verlässlich. Kreatinin wird zusätzl. tubulär sezerniert u. über die Darmschleimhaut ausgeschieden, was zur Überschätzung der GFR führen kann; zuverlässiger ist hier die Serumbestimmung von Cystatin\* C. Zur Bestimmung der C. werden auch radioaktiv markierte Substanzen eingesetzt: für die GFR Cr-51-EDTA od. Tc-99m-DTPA; für den RPF Iod-123-Hippursäure, Tc-99m-MAG3 (weniger genau als Hippursäure); die sog. Radioisotopen-C. ist gegenüber der konventionellen chem. Untersuchung zeitsparend.

Mit Hilfe der C. kann die tubuläre Transportfunktion quantitativ bestimmt werden. Sowohl die tubuläre Sekretion (z. B. von PAH) als auch die Reabsorption (z. B. von Glukose) aus dem Tubulusharn sind durch sog. Transportmaxima begrenzt. Von einer best. Konzentration des Substrats an ist der Transportmechanismus gesättigt (maximale tubuläre Transportleistung, Abk. T<sub>m</sub>). Die rechnerische Beziehung der Inulin-C. bzw. PAH-C. zu der max. tubulären Transportleistung für Glukose (T<sub>mG</sub>) ist ein Maß für das funktionstüchtige reabsorptive Nierengewebe, die entspr. Beziehung zur Größe T<sub>mPAH</sub> ein Maß für das funktionstüchtige sekretor. Nierengewebe. Die Referenzwerte sind alters- u. geschlechtsabhängig. [Pschyrembel 2002]

**Cortex** ⇒ **Cortex m**: Rinde, Schale. [Pschyrembel 2002]

**Cortisol** ⇒ Cortisol n: syn. Hydrocortison (INN), auch Kortisol; zu den Glukokortikoiden\* zählendes Steroidhormon; im Blut zu 90 % an Transcortin\* gebunden; Nachweis durch direkte Bestimmung im Plasma bzw. Harn; therap. Verw.: bei Nebennierenrindeninsuffizienz, rheumat. u. allerg. Erkrankungen. ⇒ Gluko|kortikoide n pl: (engl.) glucocorticoids; auch Glukosteroide, sog. **Stresshormone**; Steroidhormone\*, die neben Mineralokortikoiden\* u. Sexualhormonen\* in der Nebennierenrinde synthetisiert werden; ⇒ **Steroid|hormone** ⇒ **Rück|kopplung** [Pschyrembel 2002]

**deskriptiv** (des|kri|p|tiv) (engl.: descriptive) adj: beschreibend, schildernd, darstellend, erläuternd [Springer Lexikon Medizin 2006]

**Desorption** ⇒ **Ab|sorption f**:

1. (physik.) a) Schwächung der Intensität nichtionisierender u. ionisierender Strahlung\* beim Durchgang durch Materie durch Umwandlung der Strahlungsenergie in andere Energieformen, z. B. Wärme, chem. Energie, Licht anderer Wellenlängen; die A. hängt von den Eigenschaften der Strahlung u. der durchstrahlten Materie ab u. nimmt mit der Dicke des durchstrahlten Mediums zu (vgl. Streuung). Durch A. bestimmter Wellenlängen des weißen Lichts werden Farben sichtbar (vgl. Absorptionsspektrum). Das Prinzip der A. von Strahlung wird genutzt in der Radiologie u. Nuklearmedizin bei der Durchführung bildgebender Verfahren (Röntgenbild, Computertomographie u. a.), dem Einsatz von Röntgenkontrastmitteln\*, beim Nachw. ionisierender Strahlung mit geeigneten Detektoren für Untersuchungs- u. Strahlenschutz Zwecke, zum Strahlenschutz für Pat. u. Personal (Strahlenschutzwände, Bleiglasfenster, Schutzkleidung, z. B. Bleischürzen) u. in der Labormedizin bei der Messung der Extinktion\* zur Konzentrationsbestimmung von Analyten in Lösungen i. R. der Photometrie\*; b) Lösung, d. h. molekulare gleichmäßige Verteilung eines Gases in einer Flüssigkeit od. in einem festen Körper; Zunahme mit der Erhöhung des Drucks, Abnahme mit zunehmender Temperatur; vgl. Adsorption; 2. (physiol.) in der Verdauungsphysiologie international gebräuchl. Bez. für den im deutschen Sprachraum üblichen Begriff Resorption\*; 3. (serol.) Absättigung eines Antikörpers mit dem homologen gelösten Antigen\*; 4. (pharmak.) s. Resorption. [Pschyrembel 2002]

**Detektor, coulometrischer**

⇒ **Cou-lomb** *das*; -s,- (*phys.*) Maßeinheit der elektrischen Ladung in → Amperesekunden, Abk.: As

⇒ **De'tek-tor** *der*; -s,-*en (tech.)* 1. Gerät, das e-n phys. od. chem. Vorgang od. e-e Veränderung e-s Zustands registrieren soll 2. Hochfrequenzdemodulator, Gleichrichter [Encarta 2003]

**Dis|similation f**: kataboler Stoffwechsel; Abbau von Nahrungsbestandteilen od. der durch Assimilation\* synthetisierten Verbindungen zur Produktion von Energie für Lebensvorgänge. [Pschyrembel 2002]

**Dopamin** ⇒ Dop|amin n: (engl.) dopamine; Abk. DA; 4-(2-Aminoethyl)brenzkatechin, 3-Hydroxytyramin; biogenes Amin; Katecholamin u. biosynthet. Vorstufe von Noradrenalin, Adrenalin (s. Katecholamine) u. Melaninen\*; Biosynthese durch Decarboxylierung von 3,4-Dihydroxyphenylalanin (s. DOPA); Hauptmetabolite sind 3,4-Dihydroxyphenylelessigsäure u. Homovanillinsäure\*, die im Urin nachweisbar sind. Funktionen als Neurotransmitter: 1. Steuerung der extrapyramidalen Motorik im nigrostriatalen DA-System (vgl. Parkinson-Syndrom); 2. Projektionen des mesolimbischen DA-Systems scheinen entscheidend zur Entwicklung von Psychosen beizutragen (therap. Wirkung von Dopaminantagonisten, z. B. Neuroleptika\*). 3. Aus dem tuberoinfundibulären System freigesetztes DA (identisch mit PIH\*) gelangt über das Blut zur Hypophyse, wo es die Freisetzung von Prolaktin\* hemmt. 4. Regulation der Durchblutung der Abdominalorgane (v. a. der Niere) als Botenstoff einiger postganglionärer Neuronen des Sympathikus. Therap. Anw.: als Dauerinfusion (HWZ 1-3 Min.) bei Schock (v. a. kardiovaskulärer Urs.), schwerer Hypotonie, drohendem Nierenversagen; UAW: Erbrechen, Herzrhythmusstörungen, Tachykardie u. Blutdruckerhöhung. Vgl. Dobutamin. [Pschyrembel 2002]

**Druck|re|zeptoren m pl**: (engl.) pressure receptors; Mechanorezeptoren\* der Haut, die auf Druckstärke (Merkel-Zellen, Tastscheiben), Druckveränderung bei Berührung (Meissner-Tastkörperchen, Rezeptoren in der Haarwurzel) u. Vibrationen (Vater-Pacini-Lamellenkörperchen) reagieren. [Pschyrembel 2002]

**efferente Sympathikusaktivität ⇒ e|f|fere.nt:**

syn. efferens, herausführend, herausleitend; z. B. efferente Nerven, die Erregungen vom ZNS zur Peripherie (z. B. Muskeln) leiten, od. Gefäße (Vas efferens); vgl. afferent. [Pschyrembel 2002]

**ELISA:**

Abk. für (engl.) enzyme-linked immuno sorbent assay; sog. heterogener Enzym\*-Immunoassay; immun. Methode, bei der spezif. Antikörper (od. Antigene) gegen das zu bestimmende Antigen (od. Antikörper) an einen Träger (z. B. Zellulose, Polystyrol) gebunden sind. Nach der Antigen-Antikörper-Reaktion werden die Immunkomplexe durch einen weiteren Antikörper detektiert. Dieser ist mit einem Enzym gekoppelt (sog. Sandwichmethode) u. wird nach Reaktion mit einem chromogenen Substrat photometrisch bestimmt. [Pschyrembel 2002]

**Elutinreagenz**: Flüssigkeit, die der Auswaschung, Eluierung; Trennung einer adsorbierten Substanz vom Adsorptionsmittel mit Hilfe einer Flüssigkeit (Elutionsmittel) dient. [Pschyrembel 2002]

**Enzymimmunoassays EIAgen Cortisol Kit HIER: NEUE VERSION**

(engl.) enzyme immunoassay; Abk. EIA; empfindliche und spezifische immunologische Methode zur Bestimmung antigener Substanzen (z. B. Proteine, Hormone, Antikörper, Tumormarker, Viren, Pharmaka) in Flüssigkeiten (z. B. Serum) unter Verwendung enzymmarkierter spezifischer Antikörper oder Antigene vom gleichen Typ wie das zu bestimmende Antigen. [Pschyrembel 2002]

**Ethikkommission ⇒ Ethik-Kommissionen f pl:**

(engl.) ethics boards; unabhängige, interdisziplinär (Medizin, Philosophie, Theologie, Rechtswissenschaft, Biologie, Biostatistik usw.) besetzte Gremien, die bei Ärztekammern, an med. Fakultäten u. anderen Einrichtungen der med. Forschung od. als sog. private od. freie E.-K. arbeiten u. die ethischen u. rechtl. Implikationen von med. Versuchen am Menschen sowie von med. Vorhaben in sensiblen Bereichen wie der Gentechnologie\*, der Transplantationstechnologie, der Intensivmedizin, der Sterbehilfe\*, dem Schwangerschaftsabbruch\*, der epidemiol. Forschung u. der med. Datenverarbeitung diskutieren u. Empfehlungen an den einzelnen Arzt aussprechen sowie allg. Leitsätze zur Unterstützung der ärztl. Entscheidungsfindung erarbeiten. Für den Arzt besteht nach ärztl. Standesrecht (§ 15 der Muster-Berufsordnung für die dt. Ärzte) die Pflicht, sich vor der Durchführung biomed. Forschung am Menschen (mit Ausnahme ausschließl. epidemiol. Forschungsvorhaben) od. der Durchführung der Forschung mit vitalen menschl. Gameten u. lebendem embryonalen Gewebe durch eine bei der Ärztekammer od. bei einer med. Fakultät gebildete (sog. öffentlich-rechtliche) Ethik-Kommission über die mit seinem Vorhaben verbundenen berufsethischen u. -rechtl. Fragen beraten zu lassen. Nach dem Arzneimittelgesetz\* (§ 40 Abs. 1 S. 2 u. 3) darf bei Menschen eine klinische Arzneimittelprüfung grundsätzl. nur begonnen werden, wenn diese zuvor von einer öffentl.-rechtl. Ethik-Kommission zustimmend bewertet worden ist; dagegen ist für die klin. Prüfung eines Medizinproduktes auch die vorherige pos. Stellungnahme einer (registrierten) privaten od. freien Ethik-Kommission ausreichend (§ 17 Abs. 6 Medizinproduktegesetz\*). Vgl. Deklaration von Tokio. [Pschyrembel 2002]

**Exercise pressor reflex:** Erhöhung des Blutdrucks als Folge körperlicher Belastung. Eine Ursache des gesteigerten Blutdruckes ist der erhöhte venöse Rückstrom. [FW]

**Feed-Forward Mechanismus ⇒ Feed|forward-Aktivierung:**

(engl.) feedforward activation; biochem. Regulationsmechanismus, bei dem ein Metabolit das ihn verbrauchende Enzym aktiviert; z. B. aktiviert Glukose-6-Phosphat die Glykogensynthetase; vgl. Rückkopplung. [Pschyrembel 2002]

**Fight- und Flight- Hormone:** Veranschaulichender Begriff für die Wirkung der Hormone Adrenalin und Noradrenalin. Diese Hormone steigern die Energiebereitstellung und begünstigen dadurch sowohl Flucht als auch Kampf. [FW]

**Flüssigkeitschromatographie f:**

(engl.) liquid chromatography; Verf. der Chromatographie\* mit flüssiger mobiler u. beliebiger stationärer Phase zur Trennung gelöster Substanzen; bei der Hochdruck-F. (Abk. HPLC für engl. high performance/pressure liquid chromatography) wird die mobile Phase mit Druck durch die Trennsäule gepumpt; Anw. z. B. zur quant. u. qual. Bestimmung von Hormonen, Medikamenten u. ihren Metaboliten. [Pschyrembel 2002]

**Ganglion** ⇒ Ga.nglion n: 1. (chir.) Überbein; einzeln od. multipel vorkommende, von Sehnerven od. Gelenkkapseln ausgehende Gallertzyste (Hyaluronsäure, Muzin); Lok.: v. a. Streckseite des Handgelenks u. Fußrücken; Sympt.: langsames Wachstum mit Hervortreten bei best. Gelenkstellungen, verbunden mit Schmerzen; Ther.: Punktion od. op. Exstirpation mit eindeutiger Identifikation von Stiel u. Basis; Rezidivquote ca. 25 %; DD: benigne u. maligne Tumoren des Sehnervengewebes (Fibroblastom, Hämangiom, Hygrom, Synovialom, Lipom, Fibrosarkom); 2. (anat.) Nervenknotten; in den Verlauf peripherer Nerven eingeschaltete Anhäufung von Ganglienzellen, die zu einer Verdickung des Nervs führt; von einer Bindegewebekapsel (Capsula ganglii) umgeben.

**Glykogenolyse ⇒ Glyko|geno|lyse f:**

(engl.) glycogenolysis; intrazellulärer Abbau von Glykogen\*, den Adrenalin (in Leber u. Muskel) u. Glucagon\* (in der Leber) stimuliert; vom nichtreduzierenden Ende spaltet Phosphorylase\* Glukose ab u. überträgt darauf a-norg. Phosphat. Glukose-1-phosphat (Abk. G-1-P) entsteht so lange, bis (bedingt durch die Konformation des Enzyms) die Reaktion vier Glukosereste vor einer  $\alpha$ -1,6-Verzweigung stoppt. Die 4 $\alpha$ -Glukanotransferase überträgt eine Trisaccharideinheit auf eine andere Kette. Das Debranching-Enzym hydrolysiert nun die 1,6-glykosidische Bindung der verbliebenen Hauptkette u. setzt Glukose frei. Neben dieser geringen Menge an freier Glukose (ca. 10 %) entsteht G-1-P, das die Phosphoglukomutase zu Glukose-6-phosphat (Abk. G-6-P) umsetzt. G-6-P kann zur Energiegewinnung über Glykolyse\* bzw. Pentosephosphatzyklus\* abgebaut od. durch Glukose-6-Phosphatase (nicht im Muskel vorhanden) dephosphoryliert u. als freie Glukose ins Blut abgegeben werden. [Pschyrembel 2002]

**Goldstandard:** Die beste Vergleichsmethode oder das beste Vergleichsverfahren. Die Methode bzw. das Verfahren mit der höchsten Aussagekraft.

**Hämodynamisch ⇒ Hämo|dynamik f:**

(engl.) hemodynamics; Lehre von den physik. Grundlagen des Blutkreislaufs\* u. dem Zusammenwirken der Faktoren, die auf den intravasalen Blutfluss einwirken (Blutdruck, -volumen, -viskosität, Strömungswiderstand, Gefäßarchitektur u. -elastizität); vgl. Hämorheologie. [Pschyrembel 2002]

**Heliox21:** Heliox ist ein Atemgasgemisch, welches vorwiegend beim Berufstauchen, dem professionellen Sättigungstauchen sowie beim "Technischen (Hobby-)Tauchen" eingesetzt wird. Es besteht meist aus 79% Helium und 21% Sauerstoff (Oxygen). Andere Mischungsverhältnisse aus He und O<sub>2</sub> kommen jedoch gerade beim Tauchen häufig zum Einsatz. Denn mit zunehmender Tauchtiefe muß der Sauerstoffanteil im geatmeten Gasgemisch reduziert werden, um eine Gefährdung des Tauchers durch einen erhöhten Sauerstoffpartialdruck zu vermeiden. Daher ist es in der Taucherei üblich, bei den benutzten Gasgemischen aus Helium und Sauerstoff durch eine angehängte Zahl den Sauerstoffanteil zu beschreiben. [Wikipedia & FW]

**Herzfrequenzvariabilität:** Die Herzfrequenzvariabilität (HFV oder HRV, nach dem englisch "heart rate variability") bezeichnet die Eigenschaft der Herzfrequenz des Gesunden, sich ständig geringfügig zu ändern. Sie ist Ausdruck der diversen Regulationsmechanismen des Körpers, die zur Erhaltung der Stabilität des Herzkreislaufsystems erforderlich sind. Die Herzfrequenzvariabilitätsanalyse versucht, diese Veränderungen quantitativ zu erfassen und für diagnostische und prognostische Zwecke nutzbar zu machen. Eine Veränderung (meist Reduktion) einzelner Maße bzw. Komponenten der Herzfrequenzvariabilität ist für verschiedene Erkrankungen beschrieben worden, so u. a. bei Bluthochdruck und septischem Schock. Einzelne Komponenten der HRV weisen eine gewisse Regelmäßigkeit auf und werden mittels einer Frequenzanalyse quantifiziert. So lassen sich typische Frequenzbänder (ULF -0.0033 Hz, VLF 0.0033-0.04 Hz, LF 0.04-0.15 Hz, HF 0.15-0.4 Hz, Grenzen wurden empirisch festgelegt) identifizieren, die mit physiologischen Prozessen wie Atmung (HF) und Aktivität der Blutdruckregulation (LF) in Verbindung gebracht werden. Die Analyse der Herzschlagstreuung sowie deren Veränderung bei Belastung gestattet Rückschlüsse auf Art und Schwere bestimmter Erkrankungen. Insbesondere als Kriterium für die Prognoseeinschätzung des Myokardinfarktes hat sie Akzeptanz gefunden. Sportmedizin-

sche Forschungsergebnisse weisen auf eingeschränkte Eignung der HRV bei der Trainingssteuerung hin. Anwendungsgebiete: Unblutige Messung der Aktivität des Nervus vagus, Autonome Störungen (Diabetes mellitus, Koronare Herzkrankheit), Unblutige Messung der Anaeroben Schwelle, Übertraining, Depression und Streß sowie Physische und psychische Belastungen. [Wikipedia & FW]

**Hochfrequente Herzfrequenzvariabilität:** = hochfrequente Komponente der R-R Intervallvariabilität  
⇒ **Herzfrequenzvariabilität**

**Hormone n pl:** (engl.) hormones; (physiol.) org. Verbindungen, die als interzelluläre Signalstoffe oft in endokrinen Organen produziert werden (Ausnahme z. B. Gewebeshormone\*), mit dem Blut in freier od. gebundener Form zu ihren Erfolgsorganen gelangen u. in extrem geringer Konz. (10-12 - 10-15 mol/mg Gewebe) den Stoffwechsel charakterist. beeinflussen; die spezif. Wirkungen von H. vermitteln Hormonrezeptoren\*. Regelkreise (s. Regelkreis) kontrollieren die komplexen Wechselwirkungen zwischen H., hormonabhängigen Metabolit(en) u. Nervensystem. Biochem. Einteilung: 1. Steroidhormone\*; 2. Peptid- od. Proteohormone des Hypothalamus (Releasing\*-Hormone, Oxytocin\*, ADH\*) u. der Hypophyse sowie Insulin u. Glucagon (Pankreas), Parathormon (Glandula parathyroidea), Calcitonin (C-Zellen der Schilddrüse) u. gastrointestinale Hormone\*; entstehen aus Prohormonen\*; 3. von Aminosäuren abgeleitete H.: z. B. Schilddrüsenhormone, Katecholamine\*, Histamin\*, Acetylcholin\*; 4. von ungesättigten Fettsäuren abgeleitete H., z. B. Prostaglandine\*. Lipophile H. (Steroidhormone, Eikanoide, Schilddrüsenhormone) passieren die Zellmembran der Zielzellen u. binden an spezif. intrazelluläre Rezeptoren. Hydrophile H. (Peptid- u. Proteohormone, Aminosäurederivate) binden an die Zellmembran u. wirken über Second messenger. Die Inaktivierung der H. erfolgt enzymat. durch Hydrolyse ihres Second messengers (z. B. cAMP) od. Abbau, z. B. der Proteohormone durch Proteasen\*, der Katecholamine durch Monoaminoxidase\*, der Steroidhormone durch Oxidation, Reduktion od. i. R. der Biotransformation\* zu Glukuroniden od. Sulfaten. Feedback [Pschyrembel 2002]

**HPLC ⇒ HPLC:**

Abk. für (engl.) high performance (bzw. pressure) liquid chromatography; ⇒ **Flüssigkeitschromatographie f:**  
⇒ **Chromatographie f:** [Pschyrembel 2002]

**HPLC-System mit elektrochemischer Detektion: Hochleistungsflüssigkeitschromatographie** (engl. high performance liquid chromatography, HPLC) - in den Anfangszeiten dieser Technik auch Hochdruckflüssigkeitschromatographie (engl. high pressure liquid chromatography) genannt - ist eine analytische Methode in der Chemie. Die HPLC ist ein Flüssigkeitschromatografie-Verfahren mit der man nicht nur Substanzen trennt, sondern diese auch über Standards identifizieren und quantifizieren (die genaue Konzentration bestimmen) kann. Funktionsweise: Es handelt sich um ein chromatographisches Trennverfahren, bei dem die zu untersuchende Substanz zusammen mit einem Laufmittel, der mobilen Phase (auch "Eluent" genannt) durch eine so genannte Trennsäule, die die stationäre Phase enthält, gepumpt wird. Eine Trennsäule in einem HPLC-Gerät ist zwischen 1,8 und 30 cm lang und hat zumeist einen Innendurchmesser von 2-4,6 mm im Falle von analytischen HPLC-Systemen.

**Hypertensiv ⇒ Hyper|tension f:**

Spannungs- bzw. Druckerhöhung; z. B. Erhöhung des art. Blutdrucks (s. Hypertonie). [Pschyrembel 2002]

**Hypoglykämie ⇒ Hypo|glyk|ämie f:**

(engl.) hypoglycemia; Verminderung der Konz. von Glukose im Blut unter einen dem jeweiligen Lebensalter entspr. Wert (s. Tab.); Urs.: 1. pharmak., durch Insulin, Sulfonylharnstoffe; 2. gesteigerte Glukoseverwertung, z. B. bei Insulinomen, insulinproduzierenden Karzinoiden u. Karzinomen (paraneoplastisches Syndrom\*), bei Neugeborenen diabet. Mütter; 3. verminderte Glukoseproduktion, z. B. bei Leberfunktionsstörungen, Alkoholintoxikation, Mangel an Insulinantagonisten (NNR-Hormone, Glucagon, Katecholamine), extrapancreat. Tumoren, die evtl. Hemmfaktoren der Glukoneogenese produzieren, u. Glykogenosen; 4. postprandial, z. B. bei Tachyalimentationssyndrom, Diabetes mellitus (spätpostprandial); 5. leucinempfindliche Hypoglykämie\* Cochrane; 6. H. bei Fruktoseintoleranz\*; Sympt.: 1. vegetative Sympt. als Ausdruck der adrenergischen Gegenregulation: kalter Schweiß, Zittern, Hungergefühl, Herzklopfen, Blässe der Haut u. a.; 2. neurol. Ausfälle: z. B. Koordinationsstörungen, Doppelbilder, Ataxie, manchmal Apathie, quant. Bewusstseinsstörungen bis zum hypoglykämischen Schock\*, evtl. auch psychot. Zustand mit Erregtheit u. Wutausbrüchen; Diagn. u. Ther.: Nachweis des niedrigen Blutzuckerspiegels (z. B. Schnelltest mit Teststreifen); sofortige i. v. Glukosegabe führt i. d. R. zum Verschwinden der hypoglykämischen Symptome. [Pschyrembel 2002]

**Immersion ⇒ Im|ersion f:**

(histol.) 1. Eintauchen eines Gewebes in eine Flüssigkeit zur Fixierung\*; 2. Öl|im|ersion f: (engl.) oil immersion; Verfahren in der Mikroskopie, bei dem der Raum zw. Deckglas u. Objektivfrontlinse mit Zedernöl ausgefüllt wird (besitzt einen dem von Glas ähnlichen Brechungsindex); führt zu einer Verringerung der Ablenkung der aus dem Deckglas austretenden Lichtstrahlen (besseres Auflösungsvermögen, stärkere Vergrößerung mögl.). [Pschyrembel 2002] **Hier:** Eintauchen des menschlichen Körpers in eine Flüssigkeit, kein Untertauchen, der Kopf bleibt außerhalb dieser Flüssigkeit. [FW] Bezüglich Immersion siehe auch in diesem Glossar: Submersion



**Inertgas** ⇒ **i.nert**: untätig, reaktionsträge. [Pschyrembel 2002] **Hier**: Inertgas = Gas, welches nicht aktiv an menschlichen Atmungsvorgängen teilnimmt. [FW]

**Inotrop** ⇒ **ino|trop**:

(engl.) inotropic; die Schlagstärke od. Kontraktionskraft des Herzmuskels beeinflussend; Pharmaka mit steigernder Wirkung (positiv inotrop) sind z. B. Herzglykoside\*, Katecholamine, Methylxanthine; herabsetzend (negativ inotrop) wirken z. B. Betarezeptorenblocker\* u. best. Calciumantagonisten\*. [Pschyrembel 2002]

**Interassay-Variations-Koeffizient**

**Assay (engl.) = Untersuchung [FW]**

⇒ **Variations|koeffizient m**: syn. Variabilitätskoeffizient

⇒ **Variabilitäts|koeffizient m**: (engl.) coefficient of variability; Abk. VK; syn. Variationskoeffizient; Quotient aus Standardabweichung\* u. Mittelwert\* als vom Mittelwert unabhängiges Maß für die Streuung\* von Verteilungen.

⇒ **Standard|abweichung**: (engl.) standard deviation; (statist.) Abk. s; Maß für die Abweichung der Einzelwerte einer Messreihe von ihrem arithmet. Mittelwert\* ( $\bar{x}$ ); definiert als der positive Wert der Wurzel aus der Varianz\*. Bei einer Normalverteilung liegen 68 % aller Werte zw.  $\bar{x}-s$  u.  $\bar{x}+s$  u. 95 % aller Werte zw.  $\bar{x}-2s$  u.  $\bar{x}+2s$ . Wenn keine Normalverteilung vorliegt, wird eine Verteilung besser durch Median u. geeignetes (z. B. 10. u. 90.) Perzentil beschrieben. [Pschyrembel 2002]

⇒ **Varia.nz f**: (engl.) variance; (statist.) rechnerisch ermittelte Größe zur Charakterisierung der Streuung\* der Einzelwerte einer Messreihe um ihren Mittelwert. Der positive Wert ihrer Wurzel wird als Standardabweichung\* bezeichnet. [Pschyrembel 2002]

⇒ **Streuung**: (engl.) 1. dispersion, 2. diffraction, scattering; 1. (statist.) Variabilität von Messwerten in einer Serie, z. B. ausgedrückt durch die Varianz\*; 2. (radiol.) Richtungsänderung eines Teils der Primärstrahlung durch Wechselwirkungsprozesse beim Durchgang durch Materie. Die St. kann elastisch (ohne Energieverlust) od. inelastisch (mit Energieübertragung an die Materie) erfolgen. [Pschyrembel 2002]

**invasive Methoden** ⇒ **in|vasiv**: eindringend. [Pschyrembel 2002]

**Inzidenz** ⇒ **In|zide.nz f**: (engl.) incidence; (statist.) Anzahl der Neuerkrankungsfälle einer best. Erkrankung innerh. eines best. Zeitraums; epidemiol. Maß zur Charakterisierung des Krankheitsgeschehens in einer best. Population; Inzidenzrate: Anzahl der Personen mit Neuerkrankung pro Zeiteinheit im Verhältnis zur Anzahl der exponierten Personen. [Pschyrembel 2002]

**Ionenhaushalt** ⇒ **Ionen n pl**: (engl.) ions; positiv od. negativ geladene Atome od. Moleküle, die sich im elektr. Feld zur jeweils entgegengesetzt geladenen Elektrode bewegen. [Pschyrembel 2002]

**isometrische Belastungen** ⇒ **Kon|traktion, iso|metrische f**: (engl.) isometric contraction; auch statische Kontraktion; Bez. für Spannungszunahme eines Muskels bei gleichbleibender Länge; vgl. Muskelkontraktion. [Pschyrembel 2002]

**kardiovaskuläres Kontrollareal** ⇒ **kardio|vaskulär**: (engl.) cardiovascular; Herz u. Gefäße betreffend. [Pschyrembel 2002]

**Kat|echol|amine n pl**: (engl.) catecholamines; Bez. für biogene Amine\*, Neurotransmitter u. Hormone (z. B. Dopamin, Adrenalin) einschl. synthet. Derivate (z. B. Isoprenalin) mit Brenzkatechin\* als Grundgerüst; relevante, im Harn nachweisbare Abbauprodukte der K. 1. von Adrenalin u. Noradrenalin: Vanillinmandelsäure\*, Metanephrin u. Normetanephrin (zus. 20-120 mg/d); 2. von Dopamin: Homovanillinsäure\* u. 3,4-Dihydroxyphenylethylsäure; vgl. Schock, Phäochromozytom. [Pschyrembel 2002]

**Katecholaminsulfate**: Stoffwechselprodukte, die endogen beim Abbau der Katecholamine entstehen. [FW]

**Ketoacidose** ⇒ **Keto|azidose f**:

(engl.) ketoacidosis; durch Ketonkörper\* verursachte metabolische Azidose\*. ⇒ **Keton|körper** ⇒ **Azidose** [Pschyrembel 2002]

**Keton|körper**: (engl.) ketone bodies; Sammelbez. für Verbindungen, die bei Lipolyse\* u. Abbau ketoplastischer Aminosäuren\* durch Ketogenese entstehen: 1. Acetessigsäure\* entsteht bei Spaltung von Betahydroxymethylglutaryl-CoA (HMG-CoA) u. wird durch b-Hydroxybutyrat-Dehydrogenase zu 2. Betahydroxybuttersäure\* reduziert od. durch Acetoacetat-Decarboxylase zu 3. Aceton\* decarboxyliert; vermehrte Bildung z. B. bei Insulinmangel (Diabetes mellitus), erhöhter Glucagonkonzentration u. Hunger; Nachweis im Urin durch Legal\*-Probe. Vgl. Ketoazidose, Ketone, Ketolyse, Fettstoffwechsel. [Pschyrembel 2002]

**Kompression** ⇒ **Kom|pression f**: (engl.) compression; Zusammendrückung, Quetschung. [Pschyrembel 2002] Hier: Zunahme des Umgebungsdruckes [FW]

**kongestive Herzfehler** ⇒ **??? Kon|gestion f:** (engl.) congestion; Bez. für arterielle Blutüberfüllung als Folge von Entzündungsreizen. [Pschyrembel 2002]

**Lipolyse** ⇒ **Lipo|lyse f:**

(engl.) lipolysis; hydrolyt. Spaltung des Neutralfetts aus dem Fettgewebe durch Triacylglycerollipasen\* u. Abgabe von Glycerol u. freien Fettsäuren ins Blut; Aktivierung der L. durch Adrenalin, Noradrenalin, Glucagon, ACTH, TSH, Medikamente (Alpharezeptorenblocker, Betasympathomimetika); Hemmung durch Insulin, Prostaglandin E1, Nicotinsäure, Medikamente (Alpha-2-Sympathomimetika, Betarezeptorenblocker). [Pschyrembel 2002]

**Lumineszenz** **nz f:**

(engl.) luminescence; (physik.) Bez. für alle Leuchterscheinungen, die auf der Freisetzung von Lichtquanten beruhen, die in zuvor durch Absorption zugeführter Energie angeregten Atomen bei Rückkehr der Elektronen auf ihr ursprüngliches Energieniveau erfolgt (sog. Kaltlicht); kann sofort (Fluoreszenz) od. mit Verzögerung erfolgen (Phosphoreszenz); Biolumineszenz wird in lebenden Organismen (z. B. Leuchtbakterien, Glühwürmchen, Algen) erzeugt, Chemilumineszenz durch chem. Reaktionen (z. B. Oxidation von Phosphor) hervorgerufen; Thermolumineszenz\* tritt bei hohen Temp. auf; Radiolumineszenz kommt inf. Anregung durch ionisierende Strahlung (Alpha-, Beta- od. Gammastrahlung) zustande; Tribolumineszenz wird mechanisch verursacht. [Pschyrembel 2002]

**luminometrisch** ⇒ **Lumineszenz f:**

**Mechanozeptor** ⇒ **Mechano|re|zeptoren m pl:**

(engl.) mechanoreceptors; Rezeptoren in Haut, Muskeln, Sehnen, Gefäßen, Herz, Lunge, Intestinaltrakt u. Harnblase, die auf mechanische Reize (z. B. Druck, Dehnung) ansprechen; ⇒ **Druck|re|zeptoren** ⇒ **Presso|re|zeptoren** ⇒ **Blut|druck|regelung** [Pschyrembel 2002]

**Metabolisch** ⇒ **meta|bolisch:**

(engl.) metabolic; veränderlich; (physiol.) im Stoffwechsel entstanden, stoffwechselbedingt. [Pschyrembel 2002]

**metabolisiert** ⇒ **Meta|bolisierung von Arznei|stoffen:**

(engl.) metabolic degradation of pharmaceuticals; ⇒ **Biotransformation** [Pschyrembel 2002]

**Metabolite** ⇒ **Meta|bolit m:**

(engl.) metabolite; im Stoffwechsel\* durch Enzymreaktionen entstandene od. veränderte Verbindung. ⇒ **Stoff|wechsel** ⇒ **As|simation** ⇒ **Dis|simation** [Pschyrembel 2002]

**Regressionsanalyse:** Die Regressionsanalyse ist ein statistisches Analyseverfahren. Ziel ist es, Beziehungen zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen festzustellen.

**Myokardinfarkt** ⇒ **Myo|ka.rd|in|farkt m: syn. Herzinfarkt\*. Herz|in|farkt m:** (engl.) myocardial infarction; syn. Myokardinfarkt, Herzmuskelinfarkt; Nekrose eines umschriebenen Herzmuskelbezirks meist als akut auftretende Kompl. bei koronarer Herzkrankheit\*; Urs.: anhaltende kritische Mangel durchblutung bei Koronarinsuffizienz\* od. länger andauernden Koronargefäßspasmen insbes. im Bereich einer vorbestehenden exzent. Koronarstenose; manifestiert sich häufig bei od. nach körperl. od. psych. Belastung inf. Steigerung des Sauerstoffbedarfs des Herzmuskels od. durch akute Unterbrechung der Blutversorgung v. a. bei Koronarsklerose mit thrombot. Verschluss eines Koronargefäßes; pathol.-anat. unterscheidet man einen transmuralen u. einen nichttransmuralen H. (subendokardialer, subepikardialer od. intramuraler Infarkt). [Pschyrembel 2002]

**Nerven|system, vegetatives** ⇒ **Nerven|system, vegetatives n:**

(engl.) autonomous nervous system; syn. autonomes Nervensystem; Gesamtheit der dem Einfluss des Willens u. dem Bewusstsein primär nicht untergeordneten Nerven u. Ganglienzellen, die der Regelung der Vitalfunktionen (Atmung, Verdauung, Stoffwechsel, Sekretion, Wasserhaushalt u. a.) dienen u. das Zusammenwirken der einzelnen Teile des Körpers gewährleisten; bildet mit dem System der endokrinen Drüsen u. den Körperflüssigkeiten eine funkt. Einheit; darüberhinaus bestehen enge Wechselbeziehungen zw. dem vegetativen u. zerebrospinalen Nervensystem, aber auch zw. vegetativen u. seel. Vorgängen. Die übergeordneten vegetativen Zentren liegen im Rautenhirn, Zwischenhirn u. z. T. auch in der Großhirnrinde. Drei Systeme: 1. Sympathikus\*; 2. Parasympathikus\*; 3. intramurales System: vegetative Nervenfasern u. Ganglien in der Wand von Hohlorganen (Herz, Magen, Darm, Blase, Uterus), die in ihrer Funktion eine gewisse Selbstständigkeit aufweisen. Während der Sympathikus in seiner Funktion vorwiegend in Richtung auf Energieentladung u. abbauende Stoffwechselprozesse wirksam wird (ergotrope Wirkung), hat die parasympathische Innervation Beziehungen zur Energiespeicherung, Erholung u. Aufbau (trophotrope Wirkung). Daraus ergibt sich in mancher Hinsicht ein antagonist. Verhalten dieser beiden Systeme (s. Tab.). Durch die stets gleichzeitige Wirksamkeit beider Systeme entsteht unter normalen Verhältnissen keine dauernde einseitige Funktionsänderung, sondern im Gegenteil eine synergist. Wirkung. [Pschyrembel 2002]

**Neuron n:** (anat.) Neuronum; Nervenzelle\* mit allen Fortsätzen (Achsenzylinder\*, Dendrit\*, Telodendron\*); bildet nach der Neuronenlehre eine genetische, morphol., funkt., trophische u. regenerative Einheit. [Pschyrembel 2002]

**neuronal** ⇒ neuronal (neu|ro|nal) (engl.: neuronal) adj: Neuron(en) betreffend [Springer Lexikon Medizin 2006]  
⇒ Neuron n: (anat.) Neuronum; Nervenzelle\* mit allen Fortsätzen (Achsenzylinder\*, Dendrit\*, Telodendron\*); bildet nach der Neuronenlehre eine genetische, morphol., funkt., trophische u. regenerative Einheit. [Pschyrembel 2002]

**Neurotransmitter** ⇒ **Neuro|trans|mitter m pl:**

(engl.) neurotransmitters; kleine, diffundierbare Moleküle, die in Vesikeln des präsynapt. Nervenendes gespeichert sind, durch ein Aktionspotential\* freigesetzt werden u. in ZNS sowie peripherem Nervensystem die Erregungsweiterleitung bewirken; nach Bindung an spezif. Rezeptoren\* der postsynapt. Membran kommt es inf. Permeabilitäts- u. Potentialänderung zu De- od. Hyperpolarisation. Inaktivierung: enzymatisch (z. B. Acetylcholinesterase\*, Monoaminoxidase\*) od. durch Wiederaufnahme in das präsynaptische Nervenende. Einteilung nach chem. Struktur in: Amine (Acetylcholin\*, Adrenalin\*, Noradrenalin\*, Dopamin\*, Serotonin\*, Histamin\*), Aminosäuren (Aspartat\*, Glutamat\*, Glycin\*, GABA\*), Nukleotid (ATP\*) u. Peptide (z. B. Substanz P, Opioide); s. Abb. Vgl. Serotoninwiederaufnahme-Hemmer, Monoaminoxidasehemmer. [Pschyrembel 2002]

**Niederfrequente Herzfrequenzvariabilität:** = niederfrequente Komponente der R-R Intervallvariabilität  
⇒ **Herzfrequenzvariabilität**

**Noradrenalin** ⇒ Nor|ad|renalin n: syn. Norepinephrin (INN), Levarterenol; die L-Form von N. ist ein in Nebennierenmark u. sympath. Nervensystem gebildetes hormonell aktives Katecholamin (vgl. Katecholamine), das als Neurotransmitter\* adrenerger Nerven\* an adrenerge Rezeptoren\* bindet; Biosynthese aus Tyrosin über DOPA u. Dopamin; Abbau: s. Katecholamine; im Ggs zu Adrenalin\* ist die Aminogruppe bei N. unmethyliert; Wirkungen: vgl. Sympathomimetika; N. erhöht den diastol. u. systol. Blutdruck sowie die peripheren Gefäßwiderstände, senkt die Herzfrequenz, kontrahiert den Uterus. N. wirkt schwächer als Adrenalin auf die glatte Muskulatur von Darm u. Bronchien sowie auf den Stoffwechsel. Anw.: bei Kreislaufkollaps u. als gefäßverengender Zusatz von Lokalanästhetika. [Pschyrembel 2002]

NormalNull ⇒ **Nor'mal-null** *das; -s, kMz.* festgelegte Höhe, die als Bezugspunkt für alle Höhenangaben dient, [Encarta 2003] Hier: Meeresniveau = Luftdruck von 1 bar<sub>absolut</sub>

**normobar:** := bei einem Umgebungsdruck von 1 bar [FW]

**normotensiv** ⇒ **normo|ton:** (engl.) normotensive; von normaler Spannung, normalem Druck (z. B. Blutdruck). [Pschyrembel 2002]

**Parasympathikus** ⇒ Para|sym|pathikus m: (engl.) parasympathetic nervous system; physiol. u. pharmak. vom Sympathikus\* abgrenzbarer Teil des vegetativen Nervensystems\*; nach den Ursprungszentren in Mittelhirn, Brückenhaube, verlängertem Mark u. Sakralbereich des Rückenmarks auch als kraniosakrales System dem thorakolumbalen (Sympathikus) gegenübergestellt; im Ggs. zum Sympathikus keine morphol. Einheit, da sich die parasympath. Fasern mit wenigen Ausnahmen stets anderen Nervenstämmen anlagern (parasympath. System). Die synapt. Umschaltung der präganglionären auf die postganglionären Neuronen erfolgt außerh. des ZNS in den peripheren Ganglien od. in den Ganglien der intramuralen Geflechte. Anat. u. Physiol.: 1. kranialer Teil: Ursprung im kleinzelligen Kerngebiet des N. oculomotorius, im Nucleus salivatorius sup. u. inf. u. im Nucleus dorsalis nervi vagi; Verlauf mit dem N. oculomotorius (Umschaltung im Ganglion ciliare), im N. facialis (Umschaltung im Ganglion pterygopalatinum u. Ganglion submandibulare), im N. glossopharyngeus (Umschaltung im Ganglion oticum), im N. vagus (Umschaltung größtenteils in den intramuralen Geflechten); Versorgung: M. sphincter pupillae, M. ciliaris, Tränendrüse, Speicheldrüsen, Schweißdrüsen, Rachen, Kehlkopf, Herz, Lungen, Magen-Darm-Trakt vom Ösophagus bis zum Cannon\*-Böhm-Punkt des Colon transversum, Leber, Pankreas, Niere; Physiol.: Verengung der Pupille, Akkommodation, Sekretion dünnflüssigen Speichels u. Schweißes, Bradykardie, Bronchokonstriktion, Anregung der Peristaltik u. Drüsentätigkeit im Magen-Darm-Trakt u. a.; 2. sakraler Teil: Ursprung im (1.) 2.-4. (5.) Sakralsegment des Rückenmarks; Verlauf: Vorderwurzeln, 2.-4. Sakralnerv, Nn. splanchnici pelvici; Umschaltung in den Ganglien des Plexus pelvici; Versorgung: Colon descendens, Rektum, Anus, Blase, Harnröhre, innere u. äußere Geschlechtsorgane; Physiol.: Entleerung der Blase u. des Mastdarms, Erektion u. a.; 3. spinaler Teil: im Bereich des gesamten Rückenmarks entspringen dünne markhaltige Fasern, die durch die hinteren u. z. T. auch die vorderen Wurzeln austreten. Physiol.: wahrscheinl. gefäßweiternde, schweißhemmende u. pilomotorische Funktion. Vgl. Nervensystem, enterisches. [Pschyrembel 2002]

**Partialdruck:** Der Partialdruck ist der Druck, der in einem Gasgemisch wie z.B. der Luft, einem bestimmten Gas zugeordnet werden kann. Der Partialdruck entspricht dabei dem Gesamtdruck, den die Komponente beim alleinigen Ausfüllen des gesamten Volumens ausüben würde. [Wikipedia]

**pathophysiologisch** ⇒ Patho|physio|logie f: (engl.) pathophysiology; Lehre von den krankhaften Lebensvorgängen u. gestörten Funktionen im menschl. Organismus; zusammen mit der Pathobiochemie beschäftigt sie sich u. a. mit molekularbiol. Untersuchungen innerh. der Zellen zur Erklärung pathol. Abweichungen von physiol. u. biochem. Vorgängen. [Pschyrembel 2002]

**Pellet** ⇒ 'Pel·let *das*; -s,-s (*tech.*) kleines kugel- od. tablettenförmiges Gebilde aus gepresstem, ursprünglich feinkörnigem Material [Encarta 2003]

**Phäochromozytom** (Phä|o|chro|mo|zy|tom) (engl.: pheochromocytoma) nt: von den chromaffinen Zellen des sympathischen Nervensystems ausgehender Tumor, der meist Adrenalin und Noradrenalin produziert. [Springer Lexikon Medizin 2006]

**Phäochromozytompatienten** ⇒ **Phäochromozytom**

**Phäochromozytomhypertensive Krisen** ⇒ **Phäochromozytom**

**Physiologie**: die Lehre von den physikalischen und chemischen Prozessen, die ein Organismus für seine normalen Lebensvorgänge benötigt. [Encarta 2003]

**physiologisch** ⇒ Physio|logie f: (engl.) physiology; Wissenschaft u. Lehre von den normalen Lebensvorgängen, insbes. von den physik. Funktionen des Organismus; vgl. Biochemie. [Pschyrembel 2002]

**postganglionär** ⇒ postganglionär (post|gan|gli|o|när) (engl.: postganglionic) adj:distal eines ⇒Ganglions (liegend) [Springer Lexikon Medizin 2006]

**postsynaptisch** ⇒ postsynaptisch (post|sy|nap|tisch) (engl.: postsynaptic) adj:hinter einer ⇒ Synapse (liegend) [Springer Lexikon Medizin 2006]

**präsynaptisch** ⇒ präsynaptisch (prä|sy|nap|tisch) (engl.: presynaptic) adj: vor einer Synapse (liegend) [Springer Lexikon Medizin 2006]

**Presso|re|zeptoren m pl:** (engl.) pressoreceptors; Barorezeptoren, Blutdruckzügler, Depressoren; in der Wand der Aorta u. im Karotissinus lokalisierte Dehnungsrezeptoren; eine Blutdruckerhöhung führt zur Dehnung der Gefäßwände u. zur Aktivierung der P., deren Afferenzen über den N. vagus vermittelt Vasodilatation, Erniedrigung der Herzfrequenz (u. des Herzminutenvolumens) u. damit ein Absinken des Blutdrucks bewirken; bei pathol. Reaktionen der P. kann es z. B. zum Karotissinus\*-Syndrom kommen. Vgl. Blutdruckregelung. [Pschyrembel 2002]

**Rebound-Phänomen n:** (engl.) rebound phenomenon; Absetzphänomen; 1. (neurol.) promptes Abbremsen u. kurze Rückstoßbewegung durch reflektor. Innervation der Muskelantagonisten, wenn der gegen den Widerstand des Untersuchers im Ellenbogengelenk rechtwinklig gebeugte Arm des Pat. plötzlich losgelassen wird; beim pathol. R.-Ph. kommt es zu einer ausfahrenden Bewegung des Arms; z. B. bei Erkr. des Kleinhirns\*, Störungen der Koordination\*; vgl. Symptome, zerebellare. 2. (pharmak.) überschießende, der Wirkung entgegengesetzte Reaktion nach plötzl. Absetzen von Medikamenten nach länger dauernder Ther., z. B. Tachykardie u. Blutdruckanstieg nach abruptem Absetzen von Betarezeptorenblockern. [Pschyrembel 2002]

**Renal** ⇒ **Ren m: syn. Nephros; Niere\***. ⇒ **Ren-: auch Reno-;** Wortteil mit der Bedeutung Niere; von lat. ren. [Pschyrembel 2002]

**Re-Uptake** ⇒ **Uptake:** (nuklearmed.) Aufnahme eines Radionuklids (Inkorporation\*) u. dessen Anreicherung in best. Organen od. Kompartimenten; wichtige Messgröße der nuklearmed. Funktionsdiagnostik, die die relative Aktivitätsanreicherung in einem Organ(abschnitt) im Vergleich zu einer Referenzregion od. zur applizierten Aktivität anzeigt (z. B. Technetium-U. der Schilddrüse). [Pschyrembel 2002]

**Re-Uptake, neuronaler** ⇒ **Uptake** ⇒ **Neuron**

**Rück|kopplung:** (engl.) feedback; aus der Regelungstechnik übernommener Begriff (vgl. Regelkreis) zur Beschreibung eines metabol. Regulationsmechanismus; Formen: 1. negative R.: das Endprodukt wirkt hemmend auf Aktivität od. Synthese; z. B. hemmen Hormone die Ausschüttung von Releasing\*-Hormonen u. Endprodukte einer Biosynthesekette Schlüsselenzyme dieser Kette (Endprodukthemmung); vgl. Allosterie; 2. positive R. (Feedback-Aktivierung): das Endprodukt aktiviert das zu seiner Synthese wichtige Enzym; z. B. aktiviert Thrombin bei der Blutgerinnung die Faktoren VIII u. V, Östrogene u. Gestagene können die Ausschüttung von LH\* induzieren u. zur Auslösung der Ovulation\* beitragen (sog. Hohlweg-Effekt, der u. U. therap. zur Ovulationsinduktion\* nutzbar ist). Vgl. Rebound-Phänomen. [Pschyrembel 2002]

**Säule, analytische chromatografische** ⇒ **Analyse f:** ⇒ **Chromatographie f:**

**Signifikanz** ⇒ **Signi|fika.nz f:**

(engl.) significance; (statist.) Ablehnung einer Nullhypothese (z. B. kein Unterschied zwischen Patientengruppen), wenn die Wahrscheinlichkeit\* eines statistischen Testverfahrens\* kleiner als die zuvor festgelegte Irrtumswahrscheinlichkeit\* ist. [Pschyrembel 2002]

**Spillover:** Überschießende Freisetzung [FW]

**Steroid|hormone** n pl: (engl.) steroid hormones; Steroide\*, die als Hormone\* fungieren; zu den menschl. St. gehören Sexualhormone\*, Nebennierenrindenhormone (Glukokortikoide\*, Mineralokortikoide\*) u. Calciferole\*. Die Biosynthese (s. Nebenniere, Abb.) wird i. Allg. vom Hypothalamus\*-Hypophysen-System durch pos. u. neg. Rückkopplung\* reguliert. Hormonrezeptoren\* der Zielzellen vermitteln die Wirkung. Metabolismus: St. werden in der Leber inaktiviert u. i. R. der Biotransformation\* in eine wasserlös. Form überführt. Die Ausscheidung erfolgt zu 30-60 % über die Niere u. zu 10 % über den Darm. Der Rest durchläuft den enterohepat. Kreislauf.

**Stoff|wechsel:** (engl.) metabolism; syn. Metabolismus; Gesamtheit aller lebensnotwendigen chem. Reaktionen im Organismus; Bestandteile der aufgenommenen Nahrungsmittel werden entw. zur Assimilation\* (anaboler St.) od. zur Dissimilation\* (kataboler St.) verwendet. Viele Reaktionen des St. verlaufen in Zyklen (z. B. Citratzyklus, Harnstoffzyklus) u. werden auf versch. Ebenen reguliert. Der ständig in lebenden Organismen stattfindende Abbau- u. Resyntheseprozess wird Stoffumsatz genannt. [Pschyrembel 2002]

**Telemetrisch:** drahtlose Übermittlung von Meßwerten durch einen Sender an einen Empfänger [FW]

**Tonus** m: Grad der Anspannung eines Organs od. Organteils, z. B. von Muskeln, Gefäßen od. Nerven; vgl. Hypotonie, Hypertonie, Sympathikotonie, Vagotonie. [Pschyrembel 2002]

**Trimix:** ist ein Atemgasgemisch, welches vorwiegend beim Berufstauchen, dem professionellen Sättigungstauchen sowie beim "Technischen (Hobby-)Tauchen" eingesetzt wird. Es besteht aus Sauerstoff, Stickstoff sowie Helium und wird zum Aufsuchen großer Tauchtiefen benutzt. Durch die Zugabe von Helium im Atemgas wird der O<sub>2</sub>- und N<sub>2</sub>-Gehalt auf akzeptable Werte reduziert. Die negativen Effekte von Sauerstoff und Stickstoff (Stickstoffnarkose, Sauerstoffvergiftung des ZNS und Dekompressionskrankheiten) sollen vermieden werden. Durch die Zugabe von Helium wird eine Sauerstoff-/Stickstoffnarkose weitestgehend unterdrückt, um hiermit Tauchtiefen weit außerhalb der üblichen Sporttauchertiefengrenze von 40 Metern aufsuchen zu können. [Wikipedia & FW]

**umpipettiert** ⇒ **Pipe.tte f:**

röhrenförmiges Gerät aus Glas od. Kunststoff mit vorgegebenem Füllungsvolumen (sog. Vollpipette) od. Graduierung zum genauen Abmessen von Flüssigkeiten. [Pschyrembel 2002]

**Uptake:** (nuklearmed.) Aufnahme eines Radionuklids (Inkorporation\*) u. dessen Anreicherung in best. Organen od. Kompartimenten; wichtige Messgröße der nuklearmed. Funktionsdiagnostik, die die relative Aktivitätsanreicherung in einem Organ(abschnitt) im Vergleich zu einer Referenzregion od. zur applizierten Aktivität anzeigt (z. B. Technetium-U. der Schilddrüse). [Pschyrembel 2002]

**Vacutainer:** Ein Vacutainer ist in der Medizin ein Probenbehältnis (Blutröhrchen) zur Entnahme und Aufbereitung von Blutproben. Weiterhin ermöglicht es den unkomplizierten Transport und auch die kurzfristige Lagerung der entnommenen Proben. Bei dem Namen handelt es sich um ein Begriffsmonopol der Firma BD (Becton Dickinson). Innerhalb des Probengefäßes herrscht ein Unterdruck. Wird es auf den mit der Punktionskanüle verbundenen Adapter gesteckt, wird durch diesen Unterdruck das Blut angesaugt. Im Handel existieren Röhren mit verschiedenen Zusätzen, die normiert sowie farbcodiert sind (siehe Probenbehältnisse) und das entnommene Blut auf die späteren Analysen vorbereiten. [Wikipedia & FW]

**Vasodilatierend** ⇒ **Vaso|dilata.nzien n pl:**

(engl.) vasodilative agents; auch Vasodilatoren; Sammelbez. für gefäßerweiternde Arzneimittel, die über versch. Mechanismen eine Erschlaffung der glatten Gefäßmuskulatur mit nachfolgender Abnahme des peripheren (Gefäß-)Widerstands u. eine Senkung des art. Blutdrucks bewirken; z. B. Alpharezeptorenblocker\*, ACE\*-Hemmer, Calciumantagonisten\*, Kalium\*-Kanalöffner. [Pschyrembel 2002]

**ventrolaterale Medulla** ⇒ **Medu.lla f:** Mark. [Pschyrembel 2002]

**Vesikeln** ⇒ Vesikel (Ve|si|kel) (engl.: 1.-2. vesicle) f: 1. Syn: Vesicula; kleine Blase, Bläschen 2. erst elektronenmikroskopisch erkennbare Vakuole [Springer Lexikon Medizin 2006]

**Wahrscheinlichkeit:** (engl.) probability (Abk. p); (statist.) ein für ein best. zufallsabhängiges Ereignis (sog. Zufallsvariable) charakteristischer, i. Allg. unbekannter, d. h. theoretischer Wert für die Häufigkeit, mit der bei Beobachtung gleichartiger Elemente einer Gesamtheit od. bei wiederholter Beobachtung eines Elements dieses Ereignis auftritt; je mehr Elemente beobachtet werden bzw. je mehr Beobachtungen stattfinden, desto geringer wird die Abweichung der tatsächl. beobachteten Häufigkeit

**Wahrscheinlichkeit:** (engl.) probability (Abk. p); (statist.) ein für ein best. zufallsabhängiges Ereignis (sog. Zufallsvariable) charakteristischer, i. Allg. unbekannter, d. h. theoretischer Wert für die Häufigkeit, mit der bei Beobachtung gleichartiger Elemente einer Gesamtheit od. bei wiederholter Beobachtung eines Elements dieses Ereignis auftritt; je mehr Elemente beobachtet werden bzw. je mehr Beobachtungen stattfinden, desto geringer wird die Abweichung der tatsächl. beobachteten Häufigkeit

**Wasserstrahlpumpe** Querschnittzeichnung einer Wasserstrahlpumpe [Encarta 2003]

