

Aus dem Institut für Experimentelle Medizin (Direktoriumssprecherin: Prof. Dr. rer. nat.  
Susanne Sebens) am Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel an der Christian-  
Albrechts-Universität zu Kiel

**HERZFREQUENZVARIABILITÄT (HRV) BEIM TAUCHEN MIT PRESSLUFT.  
EIN VERGLEICH ZWISCHEN SCHWIMMBAD-  
UND REALEN FREIWASSERBEDINGUNGEN**

**Inauguraldissertation**

zur

Erlangung der Doktorwürde  
der Medizinischen Fakultät  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

**FLORIAN ROBERT DAVID REHNER**

aus Pegnitz

Kiel 2013

1. Berichtstatter: Priv.-Doz. Dr. med. Andreas Koch

2. Berichtstatter: Prof. Dr. med. Hendrik Bonnemeier

Tag der mündlichen Prüfung: 26.06.2014

Zum Druck genehmigt, Kiel, den 26.06.2014

gez.: Prof. Dr. med. Burkhard Weisser

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	- 1 -
2. Methoden.....	- 5 -
2.1. Formale Aspekte der Studie .....	- 5 -
2.2. Untersuchte Parameter .....	- 5 -
2.3. Probanden.....	- 5 -
2.4. Tauchausrüstung.....	- 6 -
2.5. Datengewinnung.....	- 6 -
2.6. Tauchgänge .....	- 7 -
2.6.1. Hallenbad .....	- 7 -
2.6.1.1. Ableitung eines EKG in Ruhe .....	- 8 -
2.6.1.2. Tauchgang 1 .....	- 8 -
2.6.1.3. Tauchgang 2 .....	- 8 -
2.6.2. Freiwassertauchgang .....	- 9 -
2.7. Aufarbeitung und Konservierung der Urin- und Speichelproben .....	- 10 -
2.8. Auswertung der Tauchgangsdaten .....	- 10 -
2.9. EKG Auswertung und HRV Analyse.....	- 10 -
2.10. Auswertung der laborchemischen Messparameter.....	- 13 -
2.10.1. Speichel .....	- 13 -
2.10.1.1. Cortisol .....	- 13 -
2.10.1.2. Chromogranin A.....	- 14 -
2.10.2. Harn.....	- 15 -
2.10.2.1. Metanephrine.....	- 15 -
2.11. Luftverbrauch .....	- 16 -
2.12. Statistik.....	- 17 -
3. Ergebnisse .....	- 18 -

3.1. Probanden.....	- 18 -
3.2. Deskriptive Darstellung der Ergebnisse.....	- 19 -
3.2.1. Herzfrequenz.....	- 19 -
3.2.2.1. Time Domain Werte.....	- 22 -
3.2.2.1.1. Mittlere NN.....	- 22 -
3.2.2.1.2. pNN50%.....	- 23 -
3.2.2.1.3. RMSSD.....	- 24 -
3.2.2.1.4. Standardabweichung der NN-Abstände.....	- 25 -
3.2.2.2. Frequency Domain Werte.....	- 26 -
3.2.2.2.1. LF/HF Ratio.....	- 26 -
3.2.2.2.2. Low Frequency (LF).....	- 28 -
3.2.2.2.3. High Frequency (HF).....	- 30 -
3.2.3. Luftverbrauchsanalyse.....	- 31 -
3.2.3.1. Absoluter Luftverbrauch.....	- 31 -
3.2.3.2. Durchschnittlicher Luftverbrauch/ Atemminutenvolumen.....	- 33 -
3.2.3.2. Maximaler Luftverbrauch/ Atemminutenvolumen.....	- 34 -
3.2.4. Cortisol im Mundspeichel.....	- 35 -
3.2.5. Chromogranin A im Mundspeichel.....	- 36 -
3.2.6. Metanephrine im Urin.....	- 37 -
3.3. Fallstudie: Einzelfall Panikaufstieg.....	- 37 -
4. Diskussion.....	- 39 -
4.1. Herzfrequenz.....	- 39 -
4.1.1. Änderung der Herzfrequenz bei den fortgeschrittenen Tauchern.....	- 39 -
4.1.2. Änderung der Herzfrequenz bei den Anfängern.....	- 40 -
4.1.3. Vergleich der Herzfrequenzprofile Fortgeschrittene mit Anfängern.....	- 40 -
4.2. Herzfrequenzvariabilität.....	- 40 -
4.2.1. Time Domain Werte.....	- 40 -

4.2.1.1. Mittlere NN-Werte .....	- 40 -
4.2.1.2. pNN50% .....	- 40 -
4.2.1.3. RMSSD .....	- 41 -
4.2.1.4. Standardabweichung der NN-Abstände .....	- 41 -
4.2.2. Frequency Domain Werte .....	- 42 -
4.2.2.1. Physiologische Korrelate der Frequency-Domain-Komponenten .....	- 42 -
4.2.2.2. Interpretation der LF/HF Ratio .....	- 43 -
4.2.2.3. Interpretation der LF-Werte und HF-Werte .....	- 45 -
4.3. Luftverbrauchsanalyse .....	- 46 -
4.4. Interpretation der Cortisol-Werte .....	- 48 -
4.5. Interpretation der Chromogranin-A Werte .....	- 48 -
4.6. Interpretation der Metanephrin Werte .....	- 49 -
4.7. Fallstudie Panikreaktion .....	- 49 -
4.8. Methodenkritik .....	- 50 -
4.9. Fazit .....	- 51 -
5. Zusammenfassung .....	- 52 -
6. Literaturverzeichnis .....	- 54 -
7. Anhang .....	- 58 -
I. Abbildungsverzeichnis .....	- 58 -
II. Tabellenverzeichnis .....	- 58 -
III. Bilderverzeichnis .....	- 58 -
IV. Verwendete Chemikalien .....	- 59 -

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AMV	Atemminutenvolumen
bar	SI-Einheit des atmosphärischen Druckes
BMI	Body Mass Index
CMAS	Confédération Mondiale des Activités Subaquatiques
DAN	Divers Alert Network
DES	discrete event series
ELISA	Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay
FFT	fast fourier transformation
FW	Freiwassertauchgang
HF	high frequency
HPLC	high pressure liquid chromatography
HRV	Herzfrequenzvariabilität
ICR	Intercostalraum
LF	low frequency
maxAMV	Maximales Atemminutenvolumen
NN	normal to normal
PADI	Professional Association of Diving Instructors
pNN50	Prozentsatz der NN-Abstände mit >50ms Abweichung vom vorausgegangenen NN-Abstand
PSD	Powerspektraldichte
RMSSD	root mean square of successive differences of NN intervals
SDNN	Standardabweichung aller NN-Abstände
Stdabw	Standardabweichung

## 1. Einleitung

Tauchen gewinnt in modernen Gesellschaften zunehmend an Bedeutung.

Polizei, Feuerwehr und Marine besitzen eigene Taucherstaffeln. Arbeitstaucher werden bei verschiedenen Unterwasserarbeiten benötigt. Aber gerade auch das Freizeit- und Sporttauchen nimmt einen zunehmend höheren Stellenwert ein. Tauchverbände und -vereine melden stetigen Zuwachs an Mitgliedern. Im In- und Ausland gibt es immer mehr Tauchschulen, -center und -basen.

Bei der größten kommerziellen Sporttauchorganisation (PADI) dauert ein Anfängertauchkurs ca. fünf Tage. Dieser berechtigt den Absolventen zum weltweiten Tauchen bis 18m Tiefe. Der so genannte Open-Water-Diver-Kurs beinhaltet meist fünf Schwimmbadtauchgänge, vier Freiwassertauchgänge, sowie mehrere Theorielektionen.

Bis heute hat sich das Tauchen von einer Nischensportart –man denke an Tauchpioniere wie Jacques-Ives Cousteau oder Hans Hass- zu einer Breitensportart entwickelt. Durch die wachsende Popularität des Sporttauchens gibt es auch immer mehr ältere Tauchanfänger.

Die physischen und psychischen Umwelteinwirkungen auf den Taucher unter Wasser sind erheblich. Somit stellt sich die Frage, in wieweit Tauchanfänger (besonders die älteren) durch tauchbedingten Stress belastet oder evtl. sogar überlastet werden und somit deren Risiko einen Tauchunfall zu erleiden, erhöht ist. Bei ca. 90% aller Tauchunfälle sind menschliche Fehler als Unfallursache anzunehmen (1). Stress kann beim Tauchen zu unüberlegten Handlungen bis hin zu Panikreaktionen führen (2).

Schipke und Pelzer untersuchten die Aktivierung des vegetativen Nervensystems beim Tauchen im Hallenbad. Hier zeigte sich in der Herzfrequenzvariabilitätsanalyse sowohl beim Sympathikus (Anstieg der LF-Komponente), als auch beim Parasympathikus (Anstieg der HF-Komponente) eine Aktivitätszunahme (3). Diese war beim Parasympathikus jedoch stärker ausgeprägt als beim Sympathikus (LF/HF-Ratio erniedrigt). Die Verschiebung in Richtung Parasympathikus könnte durch den Taucherreflex verursacht worden sein. Der Taucherreflex wurde erstmals von Paul Bert beschrieben. Bert beobachtete eine Herzfrequenzabsenkung bei tauchenden Vögeln (4). Schagatay und Andersson beschrieben 1998 bei Apnoetauchern eine Herzfrequenzabnahme im Sinne einer „Sauerstoffsparmaßnahme“ (5). Hong und Moore beschrieben den Taucherreflex als eine Aktivierung des Parasympathikus (6) (7).

Tauchausbildungen beginnen meist im Hallenbad, wo die taucherischen Grundfertigkeiten erlernt und diverse Übungen durchgeführt werden. Unter anderem lernen die Taucher das

Tarieren unter Wasser, das Einnehmen verschiedener Positionen (Schwimmen, Knien, etc.) sowie das Ablegen und Ausblasen der Tauchermaske.

Die Mehrzahl der ausgebildeten Taucher werden die meisten ihrer Tauchgänge jedoch nach Abschluss der Tauchausbildung nicht im Hallenbad absolvieren, sondern sie werden im Freiwasser in Seen oder Meeren tauchen.

Hierbei stellt sich die Frage, inwieweit sich das Tauchen im Schwimmbad auf das Tauchen im Freiwasser übertragen lässt. Die Umgebung der Freiwassertauchgänge unterscheidet sich deutlich von Hallenbadtauchgängen. Im Freiwasser wird meist deutlich tiefer getaucht als im Hallenbad (Sporttauchgrenze: 40m, Tiefe der meisten Hallenbäder < 5m), die Temperatur ist in heimischen Gewässern deutlich niedriger als im Hallenbad (Binnensee Deutschland ca. 6-10°C, Hallenbad 26-29°C). In vielen Seen ist zudem die Sicht durch aufgewirbeltes Sediment und/oder Dunkelheit eingeschränkt. Inwiefern die Ergebnisse der Hallenbadstudie von Schipke et al. sich auf Freiwassertauchgänge übertragen lassen, wurde bislang nicht untersucht.

Auch wurde in vorangegangenen Studien nicht zwischen Anfängern und fortgeschrittenen Tauchern unterschieden.

Die vorgelegte Untersuchung beschäftigte sich vor diesem Hintergrund mit dem Einfluss des Tauchens auf das vegetative Nervensystem, wobei die Aktivierung von Sympathikus und Parasympathikus als auch der Einfluss des Taucherreflexes hierauf im Zentrum des Interesses standen. In der Studie wurden Schwimmbadtauchgänge, wie sie bei Tauchausbildungen durchgeführt werden, mit realen Freiwassertauchgängen verglichen, zudem wurde ein Vergleich zwischen erfahrenen Tauchern und Tauchanfängern gezogen.

Als Maß für die Sympathikus-/ Parasympathikusaktivierung wurde wie bereits durch Schipke et al. die Herzfrequenzvariabilitätsanalyse (HRV) gewählt. Diese nicht invasive Methode erfasst die Einflüsse des vegetativen Nervensystems auf den Organismus (8). Die einzelnen Herzschläge erfolgen nicht in exakt regelmäßigen Abständen. So kommt es beispielsweise auch in Ruhe zu dezenten Zeitunterschieden zwischen den einzelnen Herzschlägen. Diese Variabilität innerhalb des Herzrhythmus bezeichnet man als Herzfrequenzvariabilität. Die HRV stellt ein Maß der Modulationsfähigkeit des Herzrhythmus dar (9) (10). Grundlegend für die Detektion der Herzfrequenzvariabilität ist die Aufzeichnung eines EKGs im zu untersuchenden Zeitraum. Die Modulationen im Herzrhythmus, die HRV, können hierbei durch verschiedene Methoden analysiert werden. In einer durchgehenden EKG-Aufzeichnung wer-



den die individuellen RR-Intervalle gemessen und als NN-Intervall (normal to normal) dokumentiert sowie mit Hilfe statistischer Verfahren normiert.

Eine weitere Analysemöglichkeit der HRV ist die Spektralanalyse. Hierbei wird mittels einer schnellen Fourier'schen Transformation das Spektrogramm der RR-Intervalle erstellt (11). Im Spektrogramm lässt sich eine hochfrequente (HF) von einer niederfrequenten (LF) Komponente abgrenzen. Die HF entsteht durch die respiratorische Modulation des Nervus vagus, die LF entsteht durch die Barorezeptormodulation der sympathischen und vagalen Aktivität (12). Die hochfrequente Komponente (0,15-0,4 Hz) gilt als Indikator für die Aktivität des Parasympathikus (13) (14) (8), die niederfrequente Komponente (0,04-0,15 Hz) zeigt die Aktivität des Sympathikus an (8) (15) (16), jedoch enthält sie auch vagale Einflüsse (13) (17).

Neben der HRV wurden zur weiteren Präzisierung physiologische Parameter wie Pulsfrequenz und Luftverbrauch ausgewertet und die etablierten nicht invasiven Stressmarker Cortisol und Chromogranin A aus dem Speichel, sowie die Metanephrine aus dem Urin analysiert. Cortisol (18) (19), Chromogranin A (20) (21) (22) und Metanephrine (23) gelten als Stressmarker. Auf eine Bestimmung der Katecholamine im Blutserum wurde aufgrund mangelnder Praktikabilität verzichtet, da eine Blutentnahme unter sterilen/ bzw. semisterilen Kautelen beim, respektive vor und nach dem Tauchen (insbesondere beim Freiwassertauchgang) nicht zu gewährleisten ist und die sehr kurze biologische Halbwertszeit der Katecholamine (ca. eine Minute) keine adäquaten Aussagen über den beendeten Tauchgang zulässt.

Beim Tauchen werden sowohl Sympathikus als auch Parasympathikus aktiviert (3). Der Parasympathikus sollte primär durch den Tauchreflex stimuliert werden (6) (7), wohingegen psychologischer und physischer Stress sympathische Reize darstellen. Dunkelheit, Kälte, Angst, körperliche Belastung, sowie Durchtauchen der Sprungschicht sind im Freiwasser als zusätzliche Stressoren anzunehmen, welche im Hallenbad nicht vorhanden sind.

Die vorgelegte Studie wurde unter folgender Fragestellung durchgeführt:

*Unterscheiden sich Anfänger und fortgeschrittene Taucher bezüglich Sympathikus-/Parasympathikusaktivierung?*

*Besteht ein Unterschied bezüglich Hallenbad- und Freiwassertauchgängen?*

Die Fragestellung wurde wie folgt präzisiert:

1. Unterscheiden sich Anfänger und Fortgeschrittene bezüglich der Herzfrequenzreaktionen bei verschiedenen Übungen in der Schwimmhalle zueinander und im Vergleich zum Freiwasser?
2. Wie ändern sich Parameter der Herzfrequenzvariabilität und insbesondere das LF/HF-Verhältnis der Anfänger und Fortgeschrittenen im Hallenbad zueinander und im Vergleich zum Freiwasser?
  - speziell beim Tauchen ohne Sicht (mit abgedunkelter Maske) im Vergleich zum Tauchen mit Sicht?
  - speziell beim Tauchen ohne Maske im Vergleich zum Tauchen mit Maske?
  - im generellen Vergleich Schwimmhalle / Freiwasser?
3. Unterscheiden sich Anfänger und fortgeschrittene Taucher bezüglich des Luftverbrauchs zueinander und im Vergleich zum Freiwasser?
4. Wie ändern sich die Chromogranin A-, Cortisol- und Metanephrinkonzentrationen vor und nach den einzelnen Tauchgängen bei Anfängern und Fortgeschrittenen?

## 2. Methoden

### 2.1. Formale Aspekte der Studie

Bei der vorgelegten Studie handelt es sich um eine experimentelle Studie am Menschen. Vor Versuchsdurchführung wurde die Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel konsultiert. Diese gab 2009 ihre Erlaubnis zur Durchführung der Studie (Aktenzeichen der Ethik-Kommission A161/09).

Jeder Proband wurde einzeln für den Versuchszeitraum bei DAN Europe versichert.

Die benötigte Tauchausrüstung für die Probanden wurde dankenswerterweise vom Tauch-Sport-Zentrum der Universität Kiel für den Versuchszeitraum zur Verfügung gestellt.

Alle Tauchgänge wurden von einem Tauchlehrer begleitet.

Die Versuche fanden im Zeitraum von Frühjahr 2010 bis Herbst 2011 statt.

Alle Probanden nahmen freiwillig an der Studie teil und wurden vor den Versuchen ausführlich über den Versuchsablauf und dessen Risiken aufgeklärt.

### 2.2. Untersuchte Parameter

Von den Probanden wurde Alter, Geschlecht, Größe und Gewicht erfasst. Die Einteilung in Anfänger und Fortgeschrittene erfolgte anhand der Anzahl der absolvierten Tauchgänge.

Des Weiteren wurden folgende Daten erhoben und ausgewertet:

1. Herzfrequenz
2. Herzfrequenzvariabilität (HRV)
3. Luftverbrauch
4. Speichel Cortisolkonzentration
5. Speichel Chromogranin-A-Konzentration
6. Urin Metanephrinkonzentration

### 2.3. Probanden

Bei den Probanden handelte es sich um Sport-/Freizeittaucher im Alter von 21-63 Jahren. Alle Probanden besaßen zum Versuchstermin eine gültige ärztliche Tauchtauglichkeitsbescheinigung. Schwangere wurden von den Versuchen ausgeschlossen, da eine Teratogenität durch das Presslufttauchen nicht ausgeschlossen werden kann. Zum Ausschluss einer Schwangerschaft wurde vor den Freiwassertauchgängen ein Schwangerschaftstest durchgeführt. Die Daten wurden an insgesamt 28 Personen erhoben, davon waren 18 männlich und 10 weiblich.

Das Probandenkollektiv wurde in Tauchanfänger (weniger als 30 Freiwassertauchgänge) und Fortgeschrittene (über 30 Freiwassertauchgänge) unterteilt. Da renommierte Tauchorganisationen, wie die CMAS, Taucher ab 30 Freiwassertauchgängen zu Fortgeschrittenentauchkursen zulassen, wurde die Grenze zwischen Anfängern und Fortgeschrittenen hier festgelegt.

#### 2.4. Tauchausrüstung

Alle Tauchgänge wurden, wie beim Sporttauchen allgemein üblich, mit Pressluft durchgeführt.

Um vergleichbare Ergebnisse zu erreichen, verwendeten alle Probanden die gleiche Tauchausrüstung.

Die Ausrüstung vom Hersteller Poseidon Tauchprodukte GmbH bestand aus folgenden Teilen: Tauchermaske, Flossen, Wingjacket Besea W50 MK3®, Atemregler (1 + 2 Stufe) Cyclon 5000® (1. Stufe: Membrangesteuert, kompensiert, 2. Stufe Kipphebelgesteuert) mit Finimeter, Bleigurt (Bleimenge: Je nach Körpervolumen des Probanden),

Tauchanzug: Westsuit Visionary Semidry® 5mm (Hallenbadtauchgänge); Pro Dive Suit 3® (7mm Long John und Weste mit Kopfhaut) sowie Füßlinge und Handschuhe (Freiwasser), Pressluftflasche 10l bzw. 12l (je nach Körpergröße des Probanden).

Außerdem trugen alle Probanden den Tauchcomputer Galileo Sol® der Firma Scubapro. Dieser ist luftintegriert und zeigt zudem via Brustgurt der Firma Polar zusätzlich die Herzfrequenz an.

#### 2.5. Datengewinnung

Vor und während der Tauchgänge wurde fortlaufend ein Langzeit EKG mit einem Lifecard-CF-Langzeit-EKG-Digitalrekorder der Firma Spacelabshealthcare/ Delmarreynolds® abgeleitet. Als EKG-Elektroden wurden Ag/ AgCl Zoll ECG Electrodes® der Firma ZOLL Medical Corporation benutzt und gemäß Klebeschema des EKG-Rekorder Herstellers in einer modifizierten Einthoven Ableitung als 3-Kanal-Aufzeichnung aufgeklebt (Gelb: 1. ICR, sternal; Grün: 5. ICR rechts, medioclavicular; Rot: 5. ICR links, vordere Axillarlinie). Die Probanden trugen die Elektroden unter dem Tauchanzug, die Kabel wurden aus der Halsöffnung des Tauchanzuges ausgeleitet. Der EKG-Rekorder befand sich in einem wasser- und druckfesten Aluminium-Plexiglas-Behältnis, mit einer Größe von 27x14x6cm und einem Gewicht von 2500g mit EKG-Kabelaushängen und wurde für die Tauchgänge an der Pressluftflasche befestigt.



Foto 1: Taucher mit Langzeit-EKG

Vor und nach jedem Tauchgang gaben die Probanden Urin und Speichelproben ab. Die Speichelproben wurden jeweils mit einer Salivette<sup>®</sup> der Firma Sarstedt gewonnen, hierbei kaute der Proband ca. eine Minute auf einer Watterolle, welche im Anschluss in ein Plastikröhrchen gegeben wurde.

Die Urinproben gab der Proband in verschließbaren Harnprobenbechern der Firma Kress, Meinberg, ab.

Die Urin- und Speichelproben wurden sofort nach Abgabe in einer mit Industrie-Eis gefüllten Styroporkühlbox bis zum Ende des Versuchstages aufbewahrt.

## 2.6. Tauchgänge

Bei dieser Studie wurden mit allen 28 Probanden zwei Hallenbadtauchgänge, sowie mit 25 der Probanden zusätzlich ein Freiwassertauchgang durchgeführt.

Alle Tauchgänge wurden mit jeweils nur einem Probanden durchgeführt.

Wegen des circadianen Rhythmus der HRV wurden alle Tauchgänge im gleichen Zeitfenster durchgeführt (zwischen 13 und 17 Uhr).

### 2.6.1. Hallenbad

Die Tauchgänge im Hallenbad wurden in der Universitätsschwimmhalle der Universität Kiel durchgeführt. Die Lufttemperatur in der Schwimmhalle betrug 30°C, die Wassertemperatur 26°C. Ein Versuchstag, mit jeweils einem Probanden, bestand aus der Ableitung eines Langzeit-EKG in Ruhe, sowie aus zwei Tauchgängen mit Probennahmen.

Vor Beginn wurde der Proband über die Studie und den Versuchsablauf aufgeklärt und willigte schriftlich in die Studienteilnahme ein. Der Proband füllte daraufhin einen Fragebogen aus. Hierbei wurde erfragt, wann der Taucher mit dem Tauchen begann und wie viele Tauchgänge er bereits absolvierte. Anhand der Anzahl der Tauchgänge wurden die Taucher jeweils in die Anfänger und fortgeschrittenen Gruppe eingeteilt. Weiter wurde im Fragebogen Größe und Gewicht der Taucher erfragt und somit später der BMI ermittelt.

#### 2.6.1.1. Ableitung eines EKG in Ruhe

Zunächst wurde ein 30 minütiges EKG in Ruhe abgeleitet. Hierbei saß der Proband in der Schwimmhalle entspannt auf der Wärmebank und sollte nicht sprechen.

Nach dem Ruhe EKG gab der Proband eine Speichel- und eine Urinprobe ab.

#### 2.6.1.2. Tauchgang 1

Nachdem der Proband die Tauchausrüstung angelegt hatte wurde abgetaucht, bis der Becken- grund in 4m Tiefe erreicht wurde. Zunächst kniete der Proband für 10 Minuten am Becken- grund. Im Anschluss tauchte der Proband unter Ausnutzung des gesamten Schwimmbeckens für weitere 20 Minuten im Kreis. Nach dem Auftauchen gab der Proband sofort eine Spei- chel- und eine Urinprobe ab. Es folgte eine ca. 30 minütige Ruhepause auf der Wärmebank. In der weiteren Ausführung werden diese beiden Versuchsabschnitte als „Knien“ bzw. „Tau- chen im Kreis“ bezeichnet

#### 2.6.1.3. Tauchgang 2

Nach Beendigung der Ruhepause gab der Proband erneut eine Speichel- und, wenn möglich, eine Urinprobe ab. Vor dem erneuten Abtauchen setzte der Proband eine verdunkelte (abge- klebte) Maske auf, durch welche er nichts sehen konnte. Daraufhin wurde wieder bis zum Beckengrund abgetaucht. Der Proband kniete für 10 Minuten am Grund, im Anschluss tauch- te er wieder für 10 Minuten, immer an der Hand geführt, im Kreis. Die letzten 5 Minuten des Tauchgangs setzte der Proband seine Maske ab und tauchte ohne Maske weitere 5 Minuten im Kreis. Nach dem Tauchgang gab der Proband nochmals eine Urin- und Speichelprobe ab. Im Folgenden werden diese Versuchsteile als „Knien mit abgedunkelter Maske“, „Tauchen mit abgedunkelter Maske“ und „Tauchen ohne Maske“ bezeichnet.

### 2.6.2. Freiwassertauchgang

Die Freiwassertauchgänge wurden im Großen Plöner See durchgeführt (GPS Koordinaten der Einstiegsstelle: 54.15930°N, 10.42711°E) und fanden jeweils an einem anderen Versuchstag als die Hallenbadtauchgänge statt.



Foto 2: Plöner See

Die Tiefe betrug 15m, die Tauchzeit 33 Minuten (inkl. 3 Minuten Sicherheitsstopp) bei einer Wassertemperatur unter der Sprungschicht von 10°C.

Vor dem Tauchgang gab der Proband eine Speichel- und Urinprobe ab. Bei weiblichen Studienteilnehmern wurde aus dieser Urinprobe ein Schwangerschaftstest mit einem hCG-Teststreifen der Firma Diagnostik Nord durchgeführt.

Im Anschluss wurde das EKG aufgeklebt und die Tauchausrüstung angelegt. Mit kompletter Tauchausrüstung wurden vom Parkplatz bis zur Einstiegsstelle ca. 100m zurückgelegt. Während der Anzieh- und Gehzeit wurde bereits das EKG aufgezeichnet.

Die Flossen wurden erst im Wasser angelegt. Bis zur Abtauchstelle mussten die Probanden noch ca. 20m an der Wasseroberfläche schwimmen, sodass vom ersten Wasserkontakt bis zum Abtauchen noch ca. 5 Minuten vergingen. Beim Abtauchen wurde zunächst entlang der Tiefenlinie mit ca. 50-100cm Abstand zum Grund getaucht. Nach ca. 10 Minuten wurde eine Tiefe von 15m erreicht und für weitere 10 Minuten wurde die Tiefe von 15m gehalten. Danach begann langsam der Aufstieg, sodass nach 30 Minuten Tauchzeit eine Tiefe von 5m erreicht war. In dieser Tiefe wurde ein Sicherheitsstopp für 3 Minuten eingehalten und im Anschluss aufgetaucht.

Nach dem Tauchgang gab der Proband ein letztes Mal eine Urin- und Speichelprobe ab.

### 2.7. Aufarbeitung und Konservierung der Urin- und Speichelproben

Im direkten Anschluss an die Versuche wurden die gewonnenen Proben ins Labor gebracht. Dort wurden die Salivetten<sup>®</sup> gemäß Herstellerangaben bei einer Drehzahl von 1000 U/min für 2 Minuten mit einer Mikro Rapid<sup>®</sup> Zentrifuge der Firma Hettich zentrifugiert und der gewonnene Speichel in 1,5ml fassende Eppendorfgeläße<sup>®</sup> pipettiert. Der pH-Wert der Harnproben wurde mit einem pH-Meter der Firma Wissenschaftlich Technische Werkstätten Weilheim bestimmt und unter pH-Metrie via Essigsäure auf einen pH-Wert von 2-3 zur längeren Haltbarkeit (24) eingestellt. Im Anschluss wurden die Urin- und Speichelproben bei einer Temperatur von -26°C eingefroren und bis zur Auswertung aufbewahrt.

### 2.8. Auswertung der Tauchgangsdaten

Via Infrarotschnittstelle wurden die Tauchgangsdaten vom Tauchcomputer auf einen PC übertragen. Eine Auswertung der Tauchgangsdaten erfolgte mit der Software SmartTRAK<sup>®</sup> der Firma Scubapro. Zur Auswertung kamen das Tauchprofil, die Tauchzeit, die Tauchtiefe, die Wassertemperatur, die Herzfrequenz, der absolute Luftverbrauch, das durchschnittliche Atemminutenvolumen (AMV) und das maximale AMV.

Die Daten aus dem SmartTRAK<sup>®</sup> Programm wurden manuell in eine Microsoft Excel<sup>®</sup> Tabelle übertragen und weiter ausgewertet.

### 2.9. EKG Auswertung und HRV Analyse

Die Daten des EKG-Rekorders wurden via Schnittstelle auf einen PC übertragen und im Programm CardioNavigator<sup>®</sup> der Herstellerfirma des EKG-Rekorders Spacelabshealthcare gespeichert.

Die Analyse der HRV erfolgte mit HRV-Tools des Programms Pathfinder digital<sup>®</sup> ebenfalls von Spacelabshealthcare.

Folgende Berechnungsgrundlagen und Einstellungen wurden zur Analyse verwandt:

Die **Frequency Domain Analyse**, auch als Spektralanalyse bezeichnet, kann entweder mit einem auf Autoregression basierenden Algorithmus oder mit einem auf der schnellen Fourier'schen Transformation (FFT) basierenden Algorithmus errechnet werden (15), (11). Die Berechnungen in der vorgelegten Studie erfolgten mit einem auf der schnellen Fourier'schen Transformation basierenden Algorithmus, da sich dieser besonders für die Errechnung mit einem PC eignet.



Die Theorie der Fourier'schen Transformation besagt, dass fortlaufende Folgen von Datenwerten im Zeitbereich auch als Summe vieler Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen, Amplituden und Phasen dargestellt werden können.

Von Interesse sind in der HRV-Analyse die RR-Intervalle. Aus einer Abfolge von RR-Intervallen wird eine DES (discrete event series) erstellt. Hierbei handelt es sich um einen Graphen bestehend aus der Länge der RR-Intervalle und der Zeit (Abb. 1).

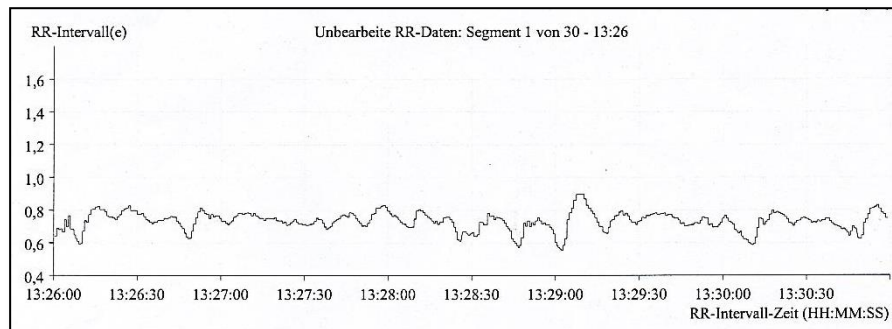


Abb. 1 DES (discrete event series), aufgezeichnet während eines Hallenbadtauchgangs, Y-Achse: RR-Intervalle, X-Achse: Zeit, Software: HRV-Tools<sup>®</sup>, Spacelabshealthcare

Mittels Fourier'scher Transformation lässt sich nun diese DES durch viele Wellen darstellen. Jede Welle wird durch ihre Amplitude, Frequenz und ihre Phase beschrieben. Die Phase beschreibt, ob die Welle an ihrem Maximum, Minimum oder an einem dazwischen liegenden Punkt beginnt. Da die Phase für die Spektralanalyse nicht von Interesse ist, wird diese ausgeglichen, indem man für jede Frequenz, also jede Welle, die Amplitude quadriert. Dadurch erhält man einen Potenzwert (Power) pro Frequenz, die PSD (Powerspektraldichte), es ergibt sich der Wert  $s^2/Hz$ . Trägt man auf einem Graphen die jeweilige PSD (Y-Achse) gegen die dazugehörige Frequenz (X-Achse) der einzelnen Wellen auf, so ergibt sich das Spektrogramm (Abb. 2).

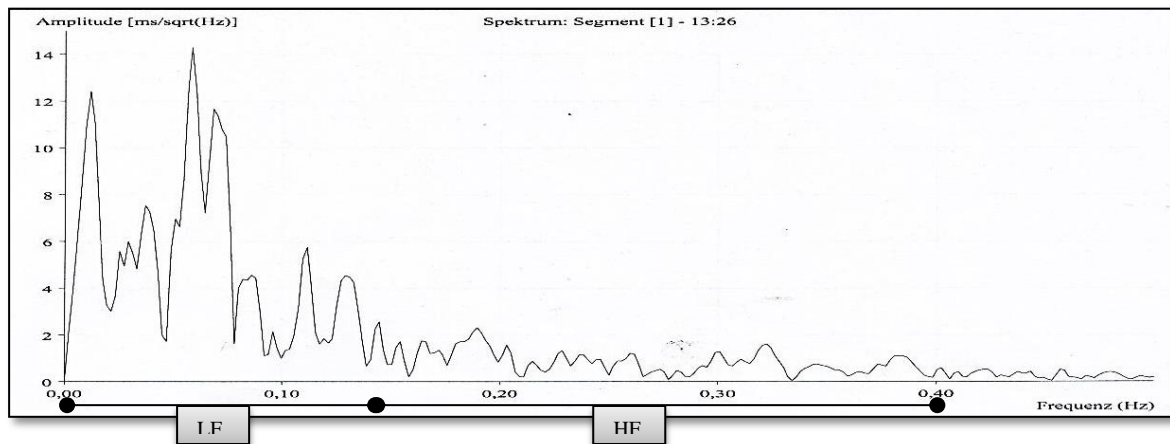


Abb. 2 Spektrogramm, Y-Achse: Powerspektraldichte (PSD) in  $s^2/Hz$ , X-Achse: Frequenz in Hz.

LF = 0,04 - 0,15 Hz, HF = 0,15 - 0,4 Hz, Software: HRV-Tools<sup>®</sup>, Spacelab healthcare

Beim Spektrogramm unterscheidet man im Hinblick auf Sympathikus und Parasympathikus hauptsächlich zwischen 2 Frequenzbändern, der Low Frequency (LF) und der High Frequency (HF). Die Low Frequency liegt im Bereich von 0,04 – 0,15 Hz, die High Frequency im Bereich von 0,15 – 0,4 Hz. Die Werte der LF und HF ergeben sich durch die „area under the curve“ im jeweiligen Frequenzbereich im Spektrogramm.

Mathematisch liegt die folgende Formel zu Grunde (15):

$$P(f) = \sum_{k=1}^n r_{xx}[k] \exp(-j2\pi fk) \quad -1/2 \leq f \leq 1/2$$

Wobei  $r_{xx}[k]$  die Autokorrelat Funktion des Signals  $x[i]$  darstellt,  $i=1 \dots k$

Die Mathematik der FFT setzt voraus, dass die zu analysierenden Werte einer Potenz von 2 entsprechen. Wenn dies nicht der Fall ist, wird ein Zero Padding durchgeführt, d. h. es werden die fehlenden Werte bis eine Potenz von 2 erreicht ist, mit Nullen aufgefüllt, was zu einer minimalen Abweichung des PSD führt.

Des Weiteren müssen für die FFT die Eingangsdaten in regelmäßigen Zeitintervallen abgetastet (gesampelt) werden. In der vorgelegten Studie wurde eine sampling Rate von 2Hz angewandt. Da eine natürliche Herzfrequenz jedoch nicht regelmäßig ist, müssen die RR-Intervalle regelmäßig „resampled“ werden. Hierzu bedient man sich des Instrumentes der Interpolation. Bei der in dieser Studie angewandten Interpolation mittels „kubischen Splines“, wird eine kurvenförmige Linie zwischen zwei R-Zacken ermittelt und dann als Schätzwert für das RR-Intervall verwandt.

Als spektrale Verbreiterung bezeichnet man das Phänomen der Übertragung von Power von einer Frequenz auf Benachbarte. Diese Verbreiterung entsteht aufgrund der begrenzten Dauer der analysierten Datenfolge. Um diesen Effekt zu minimieren, bedient man sich einer sogenannten Fensterfunktion, bei der die Daten wieder der „richtigen“ Frequenz zugeordnet werden. In dieser Studie wurde ein sog. Hamming Fenster (25) verwendet.

In der „**Time domain**“ Analyse werden die einzelnen Abstände der R-Zacken analysiert. Die Spitze der R-Zacke wird hierbei als N (normal) bezeichnet und der RR-Abstand als NN (normal to normal). Hierbei wurden folgende Parameter ermittelt: Mittlere NN (Mittelwert der NN-Abstände), SDNN (Standardabweichung aller NN-Abstände), RMSSD (root mean square of successive differences of NN intervals, Quadratwurzel der Mittelwerte der Summe der Differenzen zwischen benachbarten NN Intervallen), pNN50 (Prozentsatz der NN-Abstände mit >50ms Abweichung vom vorausgegangenen NN-Abstand).

Bei der „frequency domain“ und der „time domain“ Analyse wurden jeweils einzelne 5-Minuten Intervalle gebildet und untersucht.

Entsprechend der Länge der einzelnen Tauchaktivitäten wurden aus mehreren 5-Minuten-Intervallen Mittelwerte gebildet. So wurde beispielsweise für den 30 minütigen Freiwasserteil ein Mittelwert aus sechs 5-Minuten-Intervallen gebildet.

Die berechneten Zahlenwerte wurden in eine Microsoft Excel<sup>®</sup> Tabelle übertragen.

## 2.10. Auswertung der laborchemischen Messparameter

### 2.10.1. Speichel

#### 2.10.1.1. Cortisol

Für die Auswertung der Speichelcortisolwerte wurde ein ELISA (Enzyme Linked Immuno Sorbent Assay) Testkit der Firma DRG Diagnostics verwandt. Hierbei handelt es sich um einen Festphasen-Enzymimmunoassay. Die Wells der Mikrotiterplatten sind mit monoklonalen Antikörpern beschichtet, welche gegen Cortisol Moleküle gerichtet sind. Die in die Wells gegebenen Proben konkurrieren mit hinzu gegebenem Cortisol-Enzymkonjugat, um freie Bindungsstellen auf den beschichteten Wells. Durch den Waschvorgang wird nicht gebundenes Konjugat entfernt. Im Anschluss wird ein Substrat zugegeben, welches vom Cortisol-Enzymkonjugat enzymatisch umgesetzt wird und so einen Farbumschlag bewirkt. Die Intensität der Farbentwicklung ist somit von der Menge an gebundenem Cortisol-Enzymkonjugat abhängig und umgekehrt proportional zur Cortisol-Konzentration der Probe.

Die Intensität wird photometrisch mit einem Mikrotiterplattenmessgerät als Extinktion bei 450 nm gemessen. Die Messwerte werden durch Auftragung an der Standardkurve ermittelt.

Die bei -26°C eingefrorenen Speichelproben wurden bei Zimmertemperatur (20°C) aufgetaut. Nach dem Auftauen wurden die Proben für fünf Sekunden mit dem Gerät REAX 2000® der Firma Heidolph gemischt und danach für sieben Minuten bei 5000 U/min zentrifugiert (Zentrifuge: Mikro Rapid®, Firma Hettich).

Anschließend wurde gemäß Testkitanweisung verfahren.

Zunächst wurden je 100µl Standards, Kontrollen und Proben in die entsprechenden Wells pipettiert, danach 200µl Enzym-Konjugat in jedes Well hinzugegeben. Nach Durchmischung wurde bei Raumtemperatur für 60 Minuten inkubiert. Daraufhin wurden die Wells entleert und mit Waschlösung dreimal gewaschen. Nach dem Waschvorgang wurde 200 µl Substratlösung in jedes Well gegeben und für 30 Minuten bei Raumtemperatur inkubiert. Die Enzymatische Reaktion wurde durch Zugabe von 100µl Stop Lösung beendet.

Sofort im Anschluss wurde die Optische Dichte bei 450nm mit dem Mikrotiterplattenmessgerät Sunrise remote® der Firma TECAN gemessen. Anhand der optischen Dichte der einzelnen Proben und der Standardwerte wurden die Cortisolwerte automatisiert mit der vier Parametergleichung ermittelt.

#### 2.10.1.2. Chromogranin A

Die Auswertung der Chromogranin A Werte erfolgte mit einem ELISA Kit der Firma BlueGene. Bei dem Kit handelt es sich ebenfalls um ein Festphasen-Enzymimmunoassay. Die Wells der Mikrotiterplatten sind mit polyklonalen anti-Chromogranin A (anti-CHGA) Antikörpern beschichtet. Die in die Wells gegebenen Proben konkurrieren mit hinzu gegebenem Chromogranin-A-Konjugat um freie Bindungsstellen auf den beschichteten Wells. Durch den Waschvorgang wird nicht gebundenes Konjugat entfernt. Im Anschluss wird ein Substrat zugegeben, welches vom Chromogranin-A-Enzymkonjugat enzymatisch umgesetzt wird und so einen Farbumschlag bewirkt. Die Intensität der Farbentwicklung ist somit von der Menge an gebundenem Chromogranin-A-Enzymkonjugat abhängig und umgekehrt proportional zur Chromogranin-A-Konzentration der Probe. Die Intensität wird photometrisch mit einem Mikrotiterplattenmessgerät als Extinktion bei 450 nm gemessen. Die Messwerte werden durch Auftragung an der Standardkurve ermittelt.

Nach dem Auftauen wurden die Proben für fünf Sekunden mit dem Gerät REAX 2000<sup>®</sup> der Firma Heidolph gemischt und danach für sieben Minuten bei 5000 U/min zentrifugiert (Zentrifuge: Mikro Rapid<sup>®</sup>, Firma Hettich).

Anschließend wurde gemäß Testkitanweisung verfahren.

Zunächst wurden 10µl Lyse-Puffer zusammen mit 100µl Proben in Eppendorf-Gefäße pipettiert, gemischt und für eine Stunde inkubiert.

Im Anschluss wurden je 100µl Standards bzw. lysierte Proben in die entsprechenden Wells pipettiert, danach in jedes Well 50µl Enzym Konjugat hinzugegeben und gemischt. Daraufhin wurde für 1 Stunde bei 37°C inkubiert, dann wurden die Wells fünfmal mit Waschlösung gewaschen. Nach dem Waschvorgang wurde in jedes Well je 50µl Substrat A und 50µl Substrat B hinzugefügt, daraufhin die Platten bei 20°C für 15 Minuten inkubiert. Nach der Inkubation wurde pro Well 50µl Stop-Lösung hinzugegeben und die Proben wurden erneut gemischt. Sofort im Anschluss wurde die Optische Dichte bei 450nm mit dem Mikrotiterplattenmessgerät Sunrise remote<sup>®</sup> der Firma TECAN gemessen. Anhand der Optischen Dichte der einzelnen Proben und der Standardwerte wurden die Chromogranin-A Werte automatisiert mit der vier Paramatergleichung ermittelt.

## 2.10.2. Harn

### 2.10.2.1. Metanephrene

Die Auswertung der Metanephrene erfolgte mit dem HPLC Komplettkit ClinRep<sup>®</sup> der Firma Recipe/ Germany. Zuerst wurden die Proben hydrolysiert. Hierzu wurde eine 1 ml Urinprobe mit 20µl interner Standardlösung gemischt und auf einen pH-Wert von 0,5-1,0 eingestellt, im Anschluss wurde die Probe 30 Minuten bei 90°C inkubiert. Nach der Inkubation wurde der pH-Wert eingestellt, indem 4ml Verdünnungslösung mit Farbindikator hinzugegeben wurde. Bei dem angestrebten pH-Wert von >6 erfolgte ein gelber Farbumschlag. Bei einem zu niedrigen pH wurde gemäß Versuchsprotokoll mit ein molarer NaOH tröpfchenweise titriert, bis der Farbumschlag eintrat. Die gesamte Probe wurde nun auf das Probenvorbereitungssäulchen aufgetragen und mit HPLC-Wasser und Waschlösung gewaschen. Danach erfolgte die Elution, wobei die Probe mit 5ml Elutionsreagenz versetzt wurde und das entstandene Eluat gesammelt wurde.

Es folgte die HPLC-Analyse, durch Injektion von 20µl Probe in das HPLC Gerät der 1200 Serie der Firma Agilent Technologies. Am HPLC wurden folgende Parameter eingestellt:

isokratische Pumpe, Flussrate 1,0 ml/min, Injektionsvolumen 20µl, Injektionsintervall 17 min, EC-Detektor: Potential: 650 mV, Empfindlichkeit 50, Thermostat 30°C.

Die Ermittlung der Werte der Metanephrene erfolgte durch Erstellung eines Chromatogrammes. Hierbei wurde gemäß Versuchsprotokoll der Metanephrenwert bei 7,79 min Retentionszeit abgelesen.

Des Weiteren wurde aus den Urinproben der Kreatininwert bestimmt. Dieser wurde photometrisch in Methode nach Jaffé ermittelt.

Da die Probanden eine unterschiedliche Diurese aufwiesen, wurden die Metanephrene auf den Kreatininwert bezogen, indem sie relativ zum Kreatinin gesetzt wurden (Metanephrenkonzentration/ Kreatininkonzentration).

### 2.11. Luftverbrauch

Der Luftverbrauch wurde durch den luftintegrierten Tauchcomputer Galileo Sol<sup>®</sup> der Firma Scubapro registriert. Hierbei wurde ein Drucksensor am Hochdruckabgang der 1. Stufe des Atemreglers montiert, welcher via Funk stets den in der Pressluftflasche herrschenden Druck an den Tauchcomputer übermittelt.

Die gespeicherten Daten des Tauchcomputers wurden über die Infrarotschnittstelle auf einen PC übertragen und mit Hilfe des Programmes SMART-Trak<sup>®</sup> ausgewertet.

Der Inhalt einer Pressluftflasche errechnet sich durch Multiplikation des Flaschendruckes mit dem Flaschenvolumen. Durch Multiplikation von bar mit l ergibt sich physikalisch korrekt die Einheit barl. Diese kann man jedoch vereinfacht mit Litern gleichsetzen, sodass sich der Luftverbrauch in Litern angeben lässt.

Der absolute Luftverbrauch wurde aus der Druckänderung in der Tauchflasche errechnet. Für die jeweiligen Werte wurde der Flaschendruck vor und nach dem analysierten Abschnitt bestimmt. Die Differenz der beiden Druckwerte wurde mit der Flaschengröße multipliziert und somit der absolute Luftverbrauch errechnet.

Das Atemminutenvolumen (AMV) wurde folgendermaßen berechnet: Nachdem der Atemregler dem Umgebungsdruck entsprechend Luft liefert, nimmt der Luftverbrauch analog zur Tauchtiefe zu. Um das Atemminutenvolumen unabhängig vom Umgebungsdruck anzugeben, wurde das absolute Atemminutenvolumen (Druckänderung der Flasche in einer Minute multipliziert mit dem Flaschenvolumen) durch den jeweiligen Umgebungsdruck dividiert. Somit lässt sich das Atemminutenvolumen druckkorrigiert unabhängig von der Tauchtiefe angeben,

woraus eine bessere Vergleichbarkeit der AMV Werte bei unterschiedlichen Tauchtiefen resultiert.

Das hierzu benötigte Tauchtiefenprotokoll lieferte der Tauchcomputer, ebenso das Flaschendruckprotokoll, aus dem sich mittleres und maximales Atemminutenvolumen errechnen ließen.

#### 2.12. Statistik

Für einfache Vergleiche zweier normalverteilter Variablen wurde der t-test für unabhängige bzw. für abhängige Stichproben (vor/nach-Vergleiche innerhalb einer Probandengruppe) verwendet. Anhand des Shapiro-Tests wurde vor dem Test auf Normalverteilung geprüft. Als signifikant wurden p-Werte mit einem  $p \leq 0,05$  angenommen. Bei Mehrfachtestungen in einem Kollektiv wurde das Signifikanzlevel nach Bonferoni korrigiert.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Probanden

An der Studie nahmen insgesamt 28 Probanden teil. Alle 28 Probanden absolvierten den Versuchsteil im Hallenbad vollständig. Von den 28 Probanden absolvierten 25 den Freiwasserteil der Studie.

#### Taucherfahrung

Die Teilnehmer der Studie wurden in 2 Gruppen aufgeteilt: Tauchanfänger und erfahrene Taucher. Zu den erfahrenen Tauchern zählten alle Taucher mit über 30 Freiwassertauchgängen.

An der Studie nahmen 14 Fortgeschrittene und 14 Anfänger teil. Von den 14 Fortgeschrittenen Tauchern absolvierten 12, von den 14 Anfängern 13 Personen den Freiwasserteil.

Die durchschnittliche Anzahl an Freiwassertauchgängen lag bei den Fortgeschrittenen bei  $399 \pm 405$ , bei den Anfängern bei  $3 \pm 6$  Tauchgängen.

#### Geschlecht

Von den insgesamt 28 Studienteilnehmern waren 10 weiblich. Von den Probanden, die am Freiwasserteil teilnahmen waren 9 weiblich.

Bei den Anfängern nahmen 7 Frauen an der Untersuchung teil, bei den Fortgeschrittenen 3.

#### Alter

Das Durchschnittsalter aller Probanden lag bei  $34,7 \pm 11,5$  Jahren. Das Durchschnittsalter der Anfänger lag bei  $28 \pm 6,2$  Jahren, das der Fortgeschrittenen bei  $41,4 \pm 11,8$  Jahren.

#### Größe, Gewicht und BMI (Body Mass Index)

Die Durchschnittsgröße aller Probanden betrug  $177 \pm 9,3$  cm. Die Durchschnittsgröße der Anfänger betrug  $178 \pm 12$  cm, die der Fortgeschrittenen  $176 \pm 5,8$  cm.

Das durchschnittliche Gewicht aller Probanden lag bei  $72,8 \pm 12,3$  Kg. Die Anfänger hatten ein Durchschnittsgewicht von  $70,4 \pm 12,3$  Kg, die Fortgeschrittenen von  $75,1 \pm 12,3$  Kg.

Der BMI als Maß für den Ernährungszustand wird errechnet aus dem Quotienten der Körpermasse (Kg) und dem Quadrat der Körpergröße (m). Womit sich die Einheit  $\text{kg}/\text{m}^2$  ergibt.



Laut WHO-Definition gilt als Normalgewicht ein BMI von 20 - 25. Werte unter 20 gelten als Untergewicht, Werte von 25 – 30 als Übergewicht. Die Adipositas beginnt bei einem BMI von über 30.

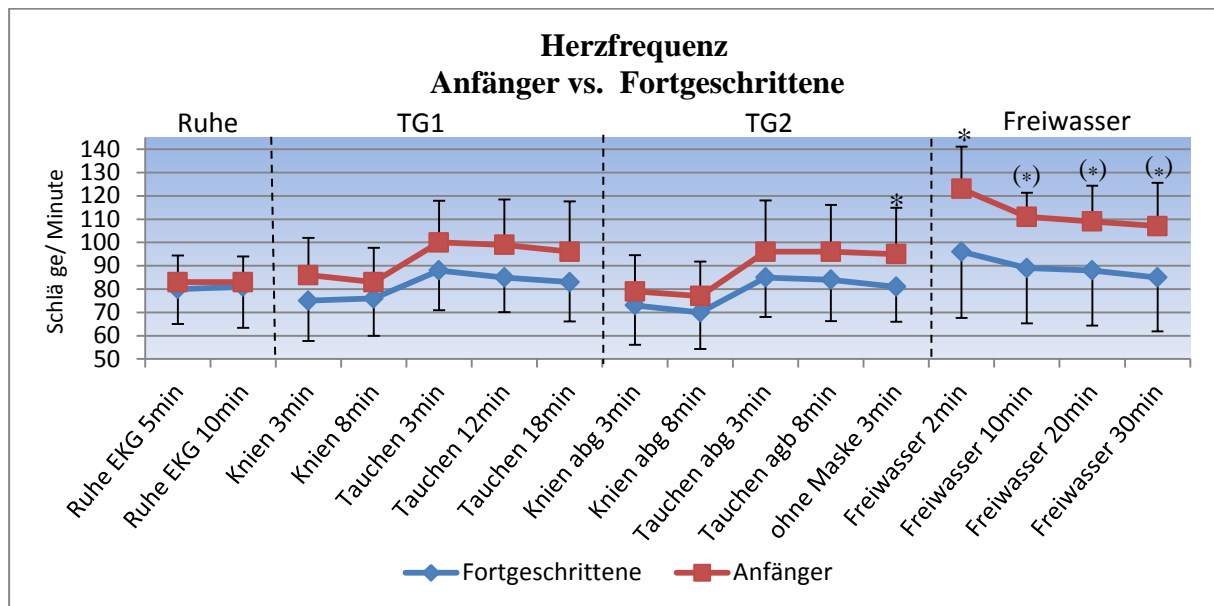
Der durchschnittliche BMI aller Probanden betrug  $23,1 \pm 2,5$  kg/m<sup>2</sup>. Der durchschnittliche BMI der Anfänger betrug  $22,1 \pm 1,7$  kg/m<sup>2</sup>, der BMI der Fortgeschrittenen  $24,1 \pm 2,8$  kg/m<sup>2</sup>. Ein BMI von unter 20 lag bei einem fortgeschrittenen Taucher vor (3,6% aller Probanden), einen BMI von 20-25 wiesen 13 Anfänger und 9 Fortgeschrittene (78,6% aller Probanden) auf, einen BMI von 25-30 hatten 1 Anfänger und 3 Fortgeschrittene (14,3% aller Probanden) und einen BMI von über 30 wies ein Fortgeschrittener (3,6% aller Probanden) auf.

### 3.2. Deskriptive Darstellung der Ergebnisse

#### 3.2.1. Herzfrequenz

Die Herzfrequenz wurde während der Versuche kontinuierlich aufgezeichnet.

Die Herzfrequenz wurde im Ruhe EKG (Kontrolle) jeweils nach 5 Minuten und nach 10 Minuten separat betrachtet. Beim 1. Tauchgang wurde die Herzfrequenz während des Kniens unter Wasser je nach 3 Minuten und nach 8 Minuten ermittelt. Beim Tauchen im Kreis wurde die Herzfrequenz nach 3, 12 und 18 Minuten bestimmt. Analog dazu wurde die Herzfrequenz beim 2. Tauchgang nach 3 und 8 Minuten während des Kniens mit abgedunkelter Maske, sowie nach 3 und 8 Minuten beim Tauchen mit abgedunkelter Maske und nach 3 Minuten beim Tauchen ohne Maske ermittelt.



**Abb. 3:** Vergleich des Herzfrequenzprofils der Tauchanfänger mit den fortgeschrittenen Tauchern.

.Knien: Knien unter Wasser, Tauchen: Tauchen im Kreis, abg: Abgedunkelte Maske, ohne Maske: Tauchen im Kreis ohne Maske, Freiwasser: Freiwassertauchgang. Signifikante Unterschiede zwischen Anfängern und Fortgeschrittenen sind mit \* gekennzeichnet; (\*): nach Bonferoni Korrektur nicht mehr signifikant.

Die fortgeschrittenen Taucher hatten eine mittlere Ruheherzfrequenz von  $80 \pm 15$  Schläge/Minute. Beim ersten Tauchgang während des „Kniens unter Wasser“ ( $75 \pm 17$  Schläge/Minute) sank die Herzfrequenz moderat um 6,2%. Beim „Tauchen im Kreis“ ( $88 \pm 17$  Schläge/Minute) stieg die Herzfrequenz leicht an (3,8% über Ruhewert).

Beim 2. Tauchgang sank die Herzfrequenz während des „Kniens unter Wasser mit abgedunkelter Maske“ ( $73 \pm 17$  Schläge/Minute) um 8,7% und stieg beim „Tauchen im Kreis mit abgedunkelter Maske“ ( $85 \pm 17$  Schläge/Minute) um 6,3%. Beim „Tauchen ohne Maske“ ( $81 \pm 15$  Schläge/Minute) war die Herzfrequenz ähnlich der Ruheherzfrequenz (+1,3%).

Beim Freiwassertauchgang stieg die Herzfrequenz in der Abtauchphase ( $96 \pm 28$  Schläge/Minute) um 20% an und lag nach 10 ( $89 \pm 24$  Schläge/Minute) bzw. 20 Minuten ( $88 \pm 24$  Schläge/Minute) tauchen +11,3% bzw. +10% über dem Ruhewert (Abb. 3-4).

Die Tauchanfänger hatten eine mittlere Ruheherzfrequenz von  $83 \pm 11$  Schläge/Minute. Beim ersten Tauchgang beim „Kniens unter Wasser“ ( $86 \pm 16$  Schläge/Minute) stieg die Herzfrequenz leicht an (+3,6%). Beim „Tauchen im Kreis“ [ $100 \pm 18$  Schläge/Minute (erster 3 Minuten Abschnitt)] stieg die Herzfrequenz signifikant ( $p=0,0063$ ) an (15,7% über Ruhewert).

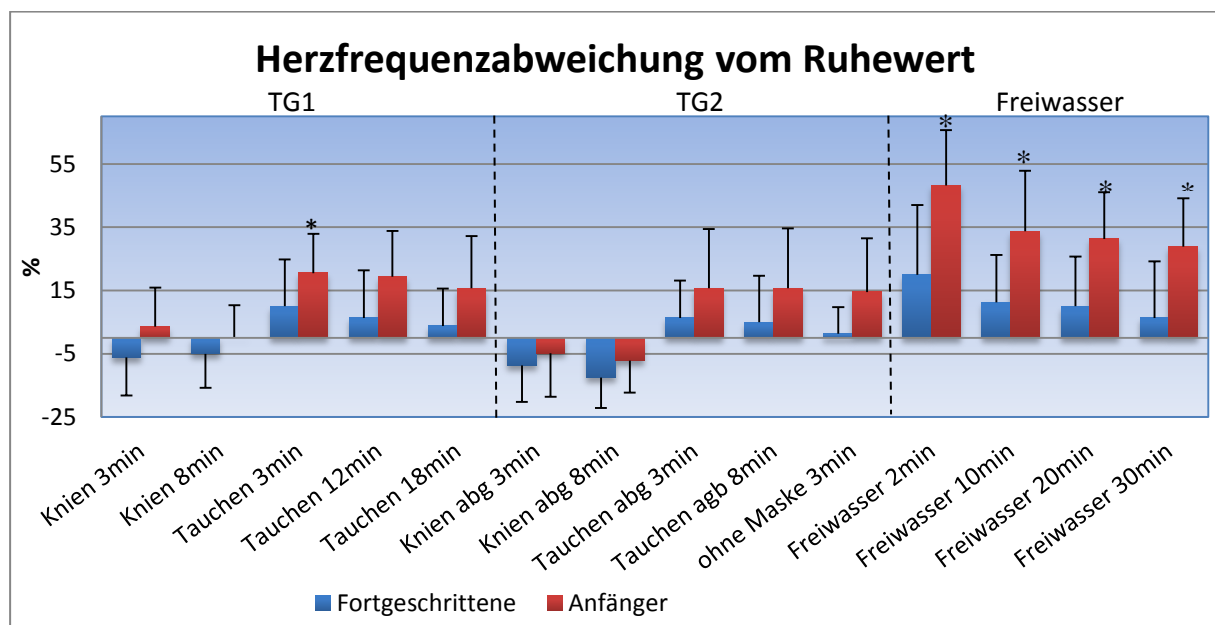
Beim 2. Tauchgang sank die Herzfrequenz beim „Kniens unter Wasser mit abgedunkelter Maske“ ( $79 \pm 16$  Schläge/Minute) um 4,8% und stieg beim „Tauchen im Kreis mit abgedun-

kelter Maske“ ( $96 \pm 22$  Schläge/ Minute) um 15,7%. Beim „Tauchen ohne Maske“ ( $95 \pm 20$  Schläge/ Minute) war die Herzfrequenz 14,5% höher als die Ruheherzfrequenz.

Beim Freiwassertauchgang stieg die Herzfrequenz in der Abtauchphase ( $123 \pm 18$  Schläge/ Minute) signifikant ( $p < 0,001$ ) um 48,2% an und lag nach 10 ( $111 \pm 10$  Schläge/ Minute), 20 Minuten ( $109 \pm 15$  Schläge/ Minute) und 30 Minuten ( $107 \pm 19$  Schläge/ Minute) Tauchen +33,7%, +31,3% bzw. 28,9% signifikant ( $p < 0,001$ ) über dem Ruhewert (Abb. 3-4).

Im Herzfrequenzprofil lag die Herzfrequenz der Anfänger kontinuierlich über der Herzfrequenz der Fortgeschrittenen (Abb. 3). Relevante Unterschiede zeigten sich beim „Tauchen ohne Maske“ (Fortgeschrittene:  $81 \pm 15$  Schläge/ Minute vs. Anfänger:  $95 \pm 20$  Schläge/ Minute) ( $p = 0,043$ ), beim Freiwassertauchgang in der Abtauchphase (Fortgeschrittene:  $96 \pm 28$  Schläge/ Minute vs. Anfänger:  $123 \pm 18$  Schläge/ Minute) ( $p = 0,01$ ) und während des restlichen Freiwassertauchgangs (Fortgeschrittene:  $88 \pm 24$  Schläge/ Minute vs. Anfänger:  $109 \pm 15$  Schläge/ Minute) ( $p = 0,012$ ). Bei Anwendung der Bonferoni-Korrektur muss die Signifikanz der p-Werte eingeschränkt betrachtet werden.

Der deutlichste Abfall der Herzfrequenz war sowohl bei den Fortgeschrittenen als auch bei den Anfängern beim „Knien mit abgedunkelter Maske“ zu verzeichnen (-8,7% bzw. -4,8%) (Abb. 4).



**Abb. 4:** Herzfrequenzabweichung vom Ruhewert. Anfänger und Fortgeschrittene.

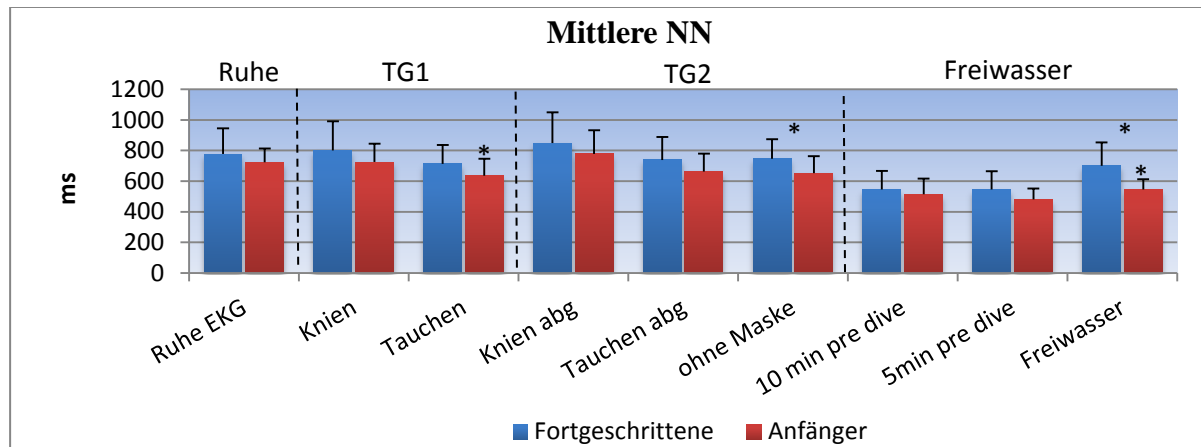
Knien: Knien unter Wasser, Tauchen: Tauchen im Kreis, abg: Abgedunkelte Maske, ohne Maske: Tauchen im Kreis ohne Maske, Freiwasser: Freiwassertauchgang. Signifikante Unterschiede zum Ruhewert sind mit \* gekennzeichnet.

### 3.2.2. Herzfrequenzvariabilität

#### 3.2.2.1. Time Domain Werte

##### 3.2.2.1.1. Mittlere NN

Die Mittelwerte der NN-Abstände sind jeweils als Mittelwerte der einzelnen 5 Minuten Segmente der jeweiligen Versuchsabschnitte angegeben.



**Abb. 5:** Mittelwerte der NN Abstände. Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich.

Knien: Knien unter Wasser, Tauchen: Tauchen im Kreis, abg: Abgedunkelte Maske, ohne Maske: Tauchen im Kreis ohne Maske, 10 min pre dive: 10 Minuten vor Freiwassertauchgang, 5 min pre dive: 5 Minuten vor Freiwassertauchgang, Freiwasser: Freiwassertauchgang. \* über einzelнем Balken: signifikanter Unterschied zum Ruhewert; \* zwischen 2 Balken: signifikanter Unterschied zwischen Anfängern und Fortgeschrittenen.

Mittlere NN Abweichung % vom Ruhe Wert	Knien	Tauchen	Knien abg	Tauchen abg	ohne Maske	10 min pre dive	5min pre dive	Freiwasser
Fortgeschrittene	3±13	-8±11	9±13	-5±12	-4±8	-30±11	-30±9	-10±10
Anfänger	1±10	-12±11	8±15	-8±12	-10±14	-29±10	-34±8	-34±9

**Tab. 1:** Abweichung der mittleren NN Abstände vom Ruhewert. Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich.

Knien: Knien unter Wasser, Tauchen: Tauchen im Kreis, abg: Abgedunkelte Maske, ohne Maske: Tauchen im Kreis ohne Maske, 10 min pre dive/ 5 min pre dive: 10 Minuten bzw. 5 Minuten vor dem Freiwassertauchgang, Freiwasser: Freiwassertauchgang.

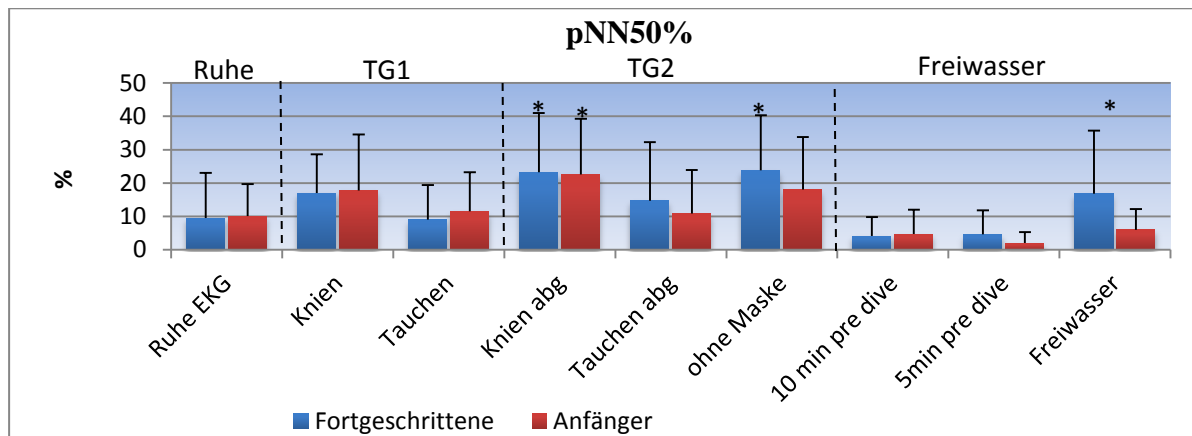
Die Dauer der mittleren NN-Abstände verkürzte sich bei allen Versuchsabschnitten im Vergleich zum Ruhewert, außer beim „Knien unter Wasser“ (Abb. 5 und Tab 1). Bei den Anfängern war die mittlere NN beim „Tauchen im Kreis“ ( $635 \pm 113 \text{ms}$ ) ( $p=0,0315$ ) und im Freiwasser ( $545 \pm 59 \text{ms}$ ) ( $p < 0,001$ ) signifikant niedriger als in Ruhe ( $723 \pm 91 \text{ms}$ ). Bei den Fortgeschrittenen bestanden keine bedeutenden Änderungen zum Ruhewert. Eine nennenswerte Verlängerung der NN-Zeit bestand nur beim „Knien unter Wasser mit abgedunkelter Maske“.

Im Vergleich der mittleren NN Dauer der Anfänger und der Fortgeschrittenen, zeigt sich ein signifikanter Unterschied beim „Tauchen ohne Maske“ (Anfänger:  $653 \pm 110$ ms vs. Fortgeschrittene:  $747 \pm 128$ ms) ( $p=0,049$ ) und beim Freiwassertauchgang (Anfänger:  $545 \pm 59$ ms, Fortgeschrittene:  $701 \pm 149$ ms) ( $p=0,0019$ ).

Insgesamt verhält sich die mittlere NN Dauer, auf Grund der direkten mathematischen Beziehung, umgekehrt analog zur Herzfrequenz.

### 3.2.2.1.2. pNN50%

Die pNN50% bezeichnet den Prozentsatz der aufeinander folgenden NN-Intervalle, welche sich um mindestens 50ms unterscheiden. Die Werte wurden aus den einzelnen 5 Minuten Intervallen gemittelt.



**Abb. 6:** pNN50% (Prozentsatz der NN-Abstände mit >50ms Abweichung vom vorausgegangenen NN-Abstand). Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich.

Knien: Knien unter Wasser, Tauchen: Tauchen im Kreis, abg: Abgedunkelte Maske, ohne Maske: Tauchen im Kreis ohne Maske, 10 min pre dive/ 5 min pre dive: 10 Minuten bzw. 5 Minuten vor dem Freiwassertauchgang, Freiwasser: Freiwassertauchgang. \* über einzeltem Balken: signifikanter Unterschied zum Ruhewert; \* zwischen 2 Balken: signifikanter Unterschied zwischen Anfängern und Fortgeschrittenen.

Signifikant höher als in Ruhe (Ruhewert Fortgeschrittene:  $10 \pm 13\%$ , Anfänger:  $10 \pm 9\%$ ) lag der pNN50% bei den Fortgeschrittenen beim „Knien mit abgedunkelter Maske“ ( $23 \pm 18\%$ ) ( $p=0,027$ ) und beim „Tauchen ohne Maske“ ( $24 \pm 16\%$ ) ( $p=0,018$ ), bei den Anfängern nur beim „Knien mit abgedunkelter Maske“ ( $23 \pm 17\%$ ) ( $p=0,021$ ).

Der pNN50% der Anfänger während des Freiwassertauchgangs lag mit  $6 \pm 5\%$  signifikant ( $p=0,045$ ) niedriger als der pNN50% der Fortgeschrittenen, welcher bei  $17 \pm 18\%$  lag (Abb. 6).

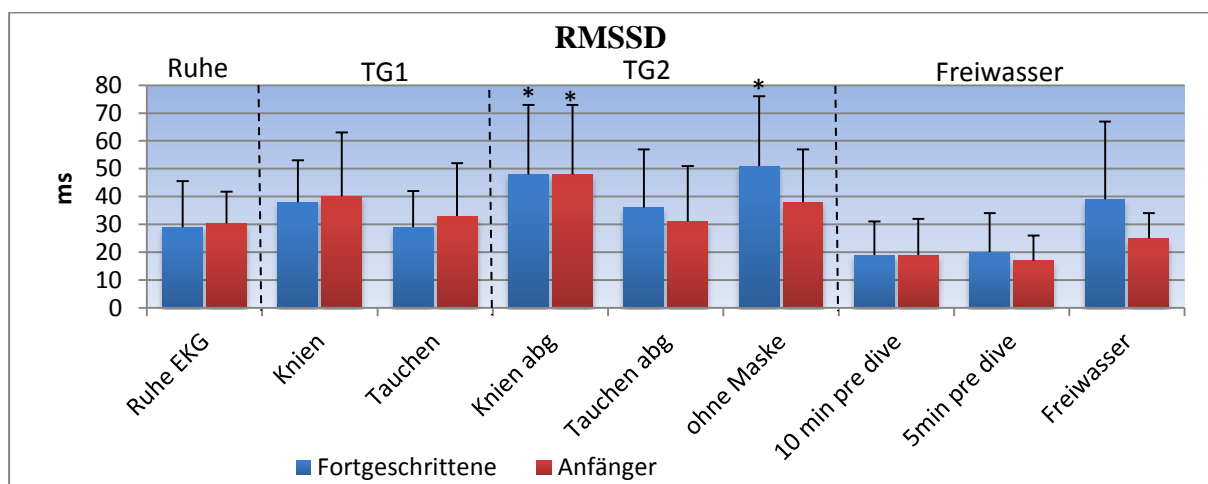
Der höchste Prozentsatz an NN-Intervallen, welche sich um mindestens 50ms unterscheiden zeigte sich beim „Knien“, beim „Knien mit abgedunkelter Maske“, beim „Tauchen ohne Maske“, sowie bei den Fortgeschrittenen im Freiwasser.

Der niedrigste pNN50% zeigte sich im Ruhe EKG, sowie in der Phase vor dem Freiwassertauchgang.

Anfänger und Fortgeschrittene zeigten ähnliche Werte. Im Freiwasser lag der pNN50% der Fortgeschrittenen jedoch deutlich über dem der Anfänger.

### 3.2.2.1.3. RMSSD

Die RMSSD bezeichnet die Quadratwurzel der Mittelwerte der Summe der Differenzen zwischen benachbarten NN Intervallen. Die Werte wurden aus den einzelnen 5 Minuten Intervallen gemittelt.



**Abb. 7:** RMSSD (Quadratwurzel der Mittelwerte der Summe der Differenzen zwischen benachbarten NN Intervallen). Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich.

Knien: Knien unter Wasser, Tauchen: Tauchen im Kreis, abg: Abgedunkelte Maske, ohne Maske: Tauchen im Kreis ohne Maske, 10 min pre dive/ 5 min pre dive: 10 Minuten bzw. 5 Minuten vor dem Freiwassertauchgang, Freiwasser: Freiwassertauchgang. Signifikante Unterschiede zum Ruhewert sind mit \* gekennzeichnet.

Eine signifikante Zunahme der RMSSD im Vergleich zum Ruhewert ( $29 \pm 16$ ms) zeigte sich bei den Fortgeschrittenen beim „Knien mit abgedunkelter Maske“ ( $48 \pm 24$ ms) ( $p=0,019$ ) und beim „Tauchen ohne Maske“ ( $51 \pm 25$ ms) ( $p=0,008$ ).

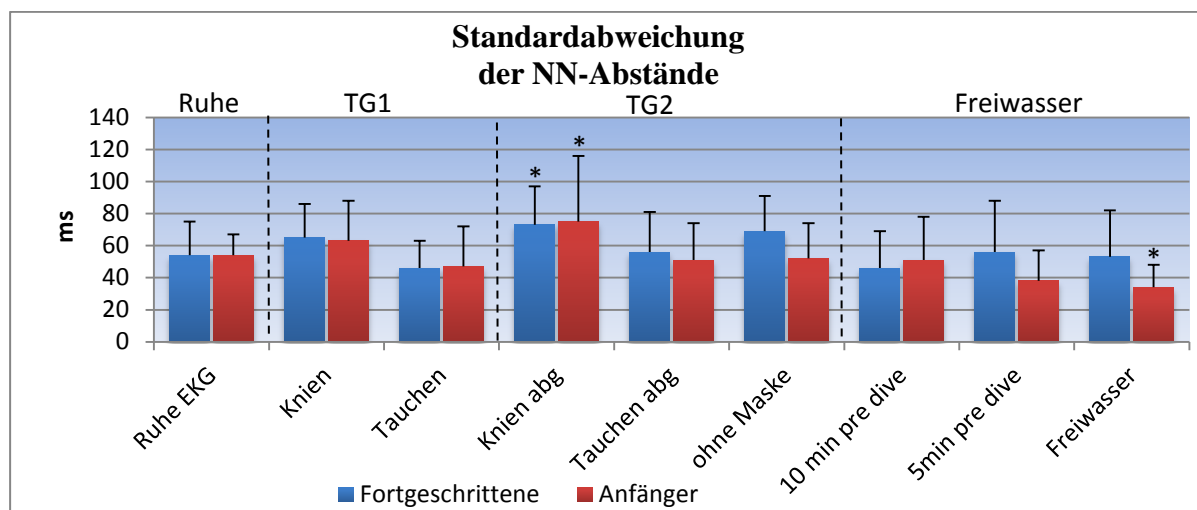
Bei den Anfängern nahm die RMSSD im Vergleich zum Ruhewert ( $30 \pm 11$ ms) signifikant beim „Knien mit abgedunkelter Maske“ ( $48 \pm 25$ ms) ( $p=0,026$ ) zu.

Zwischen Anfängern und Fortgeschrittenen zeigten sich keine bemerkenswerten Unterschiede bei den RMSSD Werten.

Insgesamt zeigt die RMSSD ein ähnliches Bild wie der PNN50%, jedoch mit einer geringeren Ausprägung. Der niedrigste RMSSD-Wert zeigt sich auch hier vor dem Freiwassertauchgang (Abb. 7).

#### 3.2.2.1.4. Standardabweichung der NN-Abstände

Ermittelt wurde die Standardabweichung der NN-Abstände der jeweiligen Versuchsabschnitte, gemittelt aus den einzelnen 5 Minuten Segmenten.



**Abb. 8:** Standardabweichung der NN-Abstände. Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich.

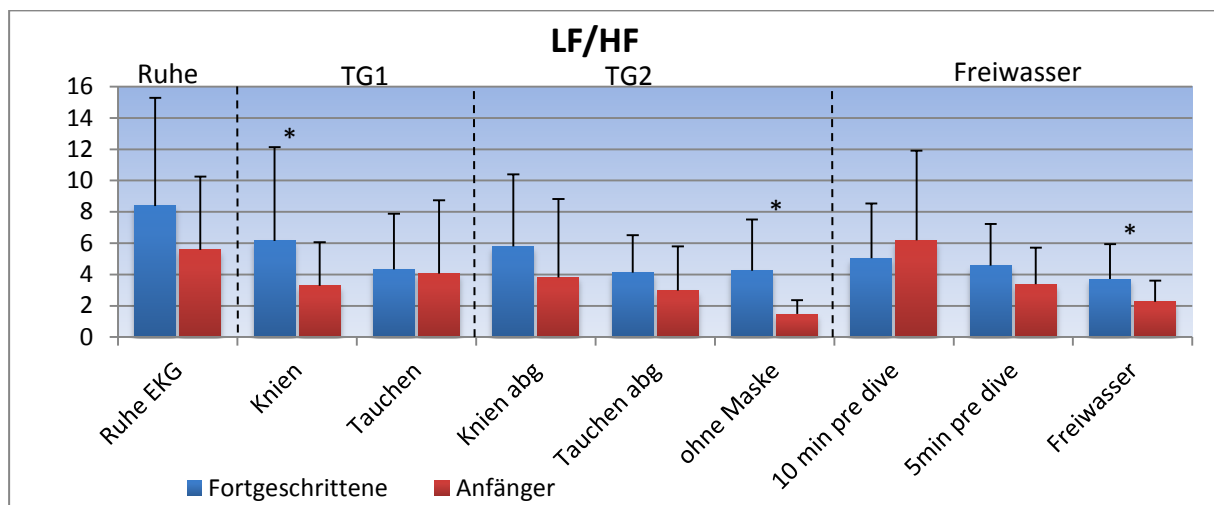
Knien: Knien unter Wasser, Tauchen: Tauchen im Kreis, abg: Abgedunkelte Maske, ohne Maske: Tauchen im Kreis ohne Maske, 10 min pre dive/ 5 min pre dive: 10 Minuten bzw. 5 Minuten vor dem Freiwassertauchgang, Freiwasser: Freiwassertauchgang. Signifikante Unterschiede zum Ruhewert sind mit \* gekennzeichnet.

Eine signifikante Zunahme der Standardabweichung der NN-Abstände im Vergleich zum Ruhewert (Anfänger:  $54 \pm 10$ ms, Fortgeschrittene:  $54 \pm 17$ ms) zeigte sich erneut beim „Knien mit abgedunkelter Maske“ [(Anfänger:  $75 \pm 36$ ms, Fortgeschrittene:  $73 \pm 18$ ms) ( $p=0,046$ ) bzw. ( $p=0,007$ )]. Bei den Anfängern bestand zudem eine signifikante Abnahme der Standardabweichung der NN-Abstände beim Freiwassertauchgang ( $34 \pm 13$ ms) ( $p=0,0001$ ). Bei den anderen Versuchsabschnitten zeigten sich keine nennenswerten Unterschiede in der Standardabweichung der NN-Abstände (Abb. 8).

## 3.2.2.2. Frequency Domain Werte

## 3.2.2.2.1. LF/HF Ratio

Die LF/HF Ratio ist der Quotient aus der Low Frequency Komponente und der High Frequency Komponente. Durch die Bildung des Quotienten werden die simultanen Veränderungen in der LF und HF Komponente bei den unterschiedlichen Aktivitäten ausgeglichen. Auf diese Weise wird durch die LF/HF Ratio der Shift in zugunsten der LF bzw. der HF charakterisiert.

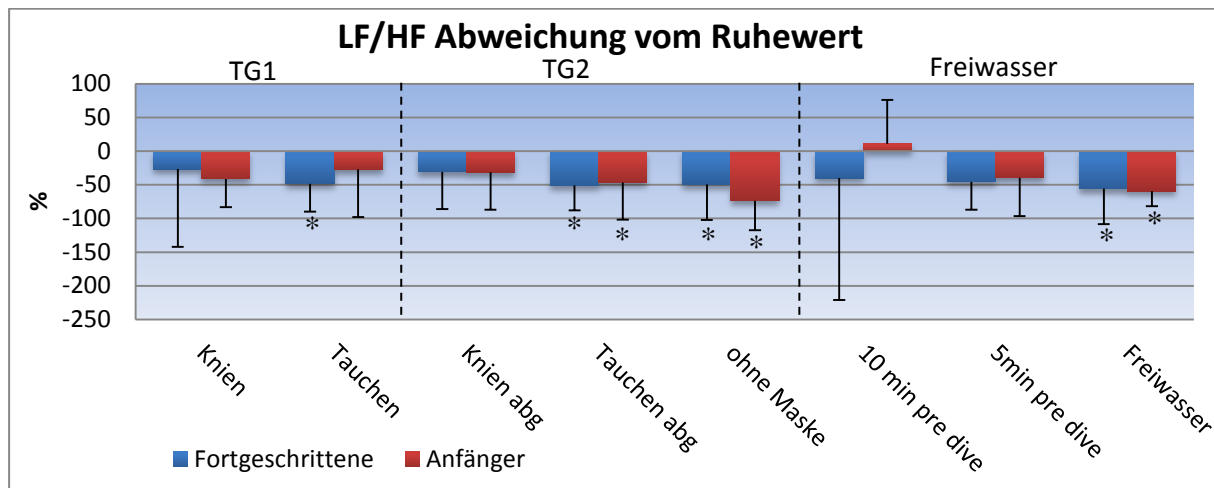


**Abb. 9:** LF/HF Ratio. Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich.

Knien: Knien unter Wasser, Tauchen: Tauchen im Kreis, abg: Abgedunkelte Maske, ohne Maske: Tauchen im Kreis ohne Maske, 10 min pre dive/ 5 min pre dive: 10 Minuten bzw. 5 Minuten vor dem Freiwassertauchgang, Freiwasser: Freiwassertauchgang. Signifikante Unterschiede zwischen Anfängern und Fortgeschrittenen sind mit \* gekennzeichnet.

Die LF/HF Ratio war bei den fortgeschrittenen Tauchern bei allen Aktivitäten höher als bei den Anfängern. Signifikant war dieser Unterschied beim „Knien unter Wasser“ (Fortgeschrittene  $6,14 \pm 4,27$ , Anfänger  $3,27 \pm 2,62$ ) ( $p=0,04$ ), beim „Tauchen ohne Maske“ (Fortgeschrittene  $4,08 \pm 3,33$ , Anfänger  $1,47 \pm 0,88$ ) ( $p=0,009$ ) und beim Freiwassertauchgang (Fortgeschrittene  $3,7 \pm 1,68$ , Anfänger  $2,27 \pm 0,88$ ) ( $p=0,013$ ) (Abb. 9).





**Abb. 10:** Abweichung der LF/HF Ratio vom Ruhewert. Anfänger und Fortgeschrittene.

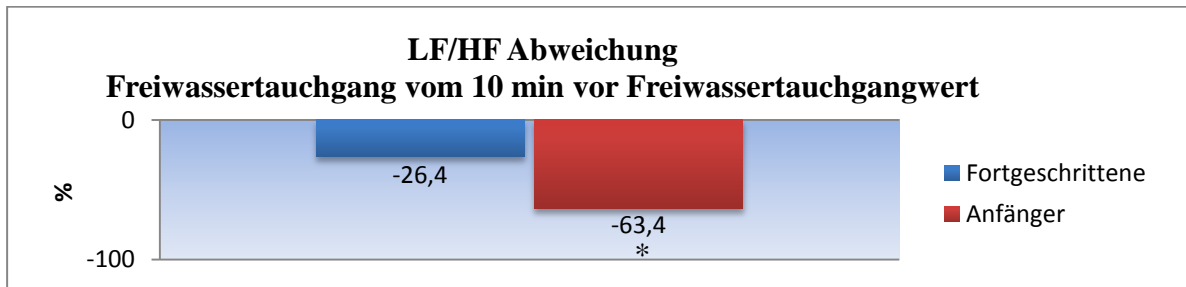
Knien: Knien unter Wasser, Tauchen: Tauchen im Kreis, abg: Abgedunkelte Maske, ohne Maske: Tauchen im Kreis ohne Maske, 10 min pre dive/ 5 min pre dive: 10 Minuten bzw. 5 Minuten vor dem Freiwassertauchgang, Freiwasser: Freiwassertauchgang. Signifikante Unterschiede zum Ruhewert sind mit \* gekennzeichnet.

Beim Vergleich mit dem Ruhewert fällt auf, dass die LF/HF Ratio bei allen Tauchaktivitäten sowohl bei den Anfängern als auch bei den Fortgeschrittenen abfiel. Am deutlichsten ist hier der Abfall beim „Tauchen ohne Maske“ und beim Freiwassertauchgang. Beim "Tauchen ohne Maske" fiel bei den Anfängern die LF/HF Ratio stärker als bei den Fortgeschrittenen (Fortgeschrittene -49,4%, Anfänger -73,6%) (Abb. 10).

Die LF/HF Ratio fiel bei den Anfängern im Vergleich zum Ruhewert ( $LF/HF = 5,57 \pm 3,48$ ) signifikant beim "Tauchen mit abgedunkelter Maske" ( $LF/HF = 2,98 \pm 1,97$ ) ( $p = 0,023$ ), beim "Tauchen ohne Maske" ( $LF/HF = 1,47 \pm 0,88$ ) ( $p = 0,0003$ ) und beim Freiwassertauchgang ( $LF/HF = 2,27 \pm 0,88$ ) ( $p = 0,003$ ) ab.

Vergleicht man die Versuchsabschnitte, welche mit Bewegung einhergehen miteinander, so zeigt sich bei den Anfängern ein signifikanter Abfall ( $p = 0,043$ ) der LF/HF Ratio beim "Tauchen ohne Maske" ( $LF/HF = 1,47 \pm 0,88$ ) im Vergleich zum "Tauchen im Kreis" ( $LF/HF = 4,05 \pm 4,44$ ).

Bei den Fortgeschrittenen fiel die LF/HF Ratio im Vergleich zum Ruhewert ( $LF/HF = 8,4 \pm 5,27$ ) signifikant beim "Tauchen im Kreis" ( $LF/HF = 4,33 \pm 2,88$ ) ( $p = 0,018$ ), "Tauchen mit abgedunkelter Maske" ( $LF/HF = 4,03 \pm 2,19$ ) ( $p = 0,008$ ), "Tauchen ohne Maske" ( $LF/HF = 4,08 \pm 3,33$ ) ( $p = 0,015$ ) und beim Freiwassertauchgang ( $LF/HF = 3,7 \pm 1,68$ ) ( $p = 0,007$ ) ab.

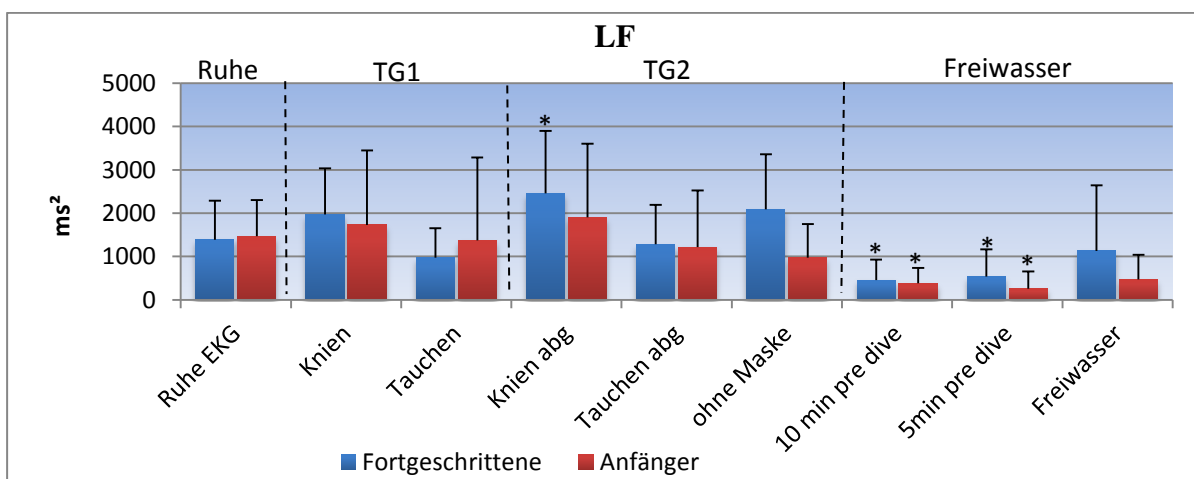


**Abb. 11:** Abweichung der LF/HF Ratio beim Freiwassertauchgang vom 10 Minuten vor dem Freiwassertauchgangswert. Anfänger und Fortgeschrittene. Signifikante Unterschiede sind mit \* gekennzeichnet.

Wenn man die LF/HF Ratio "10 Minuten vor dem Freiwassertauchgang" mit der des Freiwassertauchgangs vergleicht, zeigt sich auch hier ein deutlicher Abfall. Bei den Anfängern ist dieser Abfall deutlich ausgeprägter als bei den Fortgeschrittenen (Fortgeschrittene -26,4%, Anfänger -63,4%). Der Abfall der Anfänger (LF/HF "10 min vor dem Freiwassertauchgang":  $6,18 \pm 4,89$  vs. Freiwasser:  $2,27 \pm 0,88$ ) ist signifikant ( $p=0,009$ ) (Abb. 11).

### 3.2.2.2.2. Low Frequency (LF)

Die Low Frequency wurde aus dem kontinuierlich aufgezeichneten EKG aus den einzelnen 5 Minuten Segmenten der jeweiligen Versuchsabschnitte mittels schneller Fourier'scher Transformation errechnet. Für den Vergleich der einzelnen Versuchsabschnitte wurden die jeweiligen 5 Minuten Segmente summiert und Mittelwerte gebildet.



**Abb. 12:** Low Frequency (LF). Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich.

Knien: Knien unter Wasser, Tauchen: Tauchen im Kreis, abg: Abgedunkelte Maske, ohne Maske: Tauchen im Kreis ohne Maske, 10 min pre dive/ 5 min pre dive: 10 Minuten bzw. 5 Minuten vor dem Freiwassertauchgang, Freiwasser: Freiwassertauchgang. Signifikante Unterschiede zum Ruhewert sind mit \* gekennzeichnet.

LF Abweichung % zum Ruhe Wert	Knien	Tau- chen	Knien abg	Tau- chen abg	ohne Maske	10 min pre dive	5min pre dive	Frei- wasser
Fortgeschrittene	43±103	-30±49	78±108	-7,2±45	51±122	-67±27	-61±41	-18±133
Anfänger	18±103	-6±91	30±113	-17±87	-34±53	-74±18	-82±22	-68±41

**Tab. 2:** Abweichung der LF vom Ruhewert. Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich.

Knien: Knien unter Wasser, Tauchen: Tauchen im Kreis, abg: Abgedunkelte Maske, ohne Maske: Tauchen im Kreis ohne Maske, 10 min pre dive/ 5 min pre dive: 10 Minuten bzw. 5 Minuten vor dem Freiwassertauchgang, Freiwasser: Freiwassertauchgang.

Bei den Fortgeschrittenen Tauchern stiegen die LF Werte im Vergleich zum Ruhewert (LF= 1389±611 ms<sup>2</sup>) beim "Knien unter Wasser" (LF= 1972±1030 ms<sup>2</sup>), "beim Knien mit abgedunkelter Maske" (LF= 2464±1236 ms<sup>2</sup>) und beim "Tauchen ohne Maske" (LF= 2075±1288 ms<sup>2</sup>) an. Beim "Knien mit abgedunkelter Maske" war dieser Anstieg signifikant (p=0,007).

Bei den anderen Aktivitäten fielen die LF Werte ab, dieser Abfall war jedoch statistisch nicht signifikant (Abb. 12).

Bei den Anfängern stieg die LF im Vergleich zum Ruhewert (LF= 1468±605 ms<sup>2</sup>) beim "Knien unter Wasser" (LF= 1728±1699 ms<sup>2</sup>) und beim "Knien mit abgedunkelter Maske" (LF= 1907±1587 ms<sup>2</sup>) an. Bei allen anderen Aktivitäten fiel die LF im Vergleich zum Ruhewert ab.

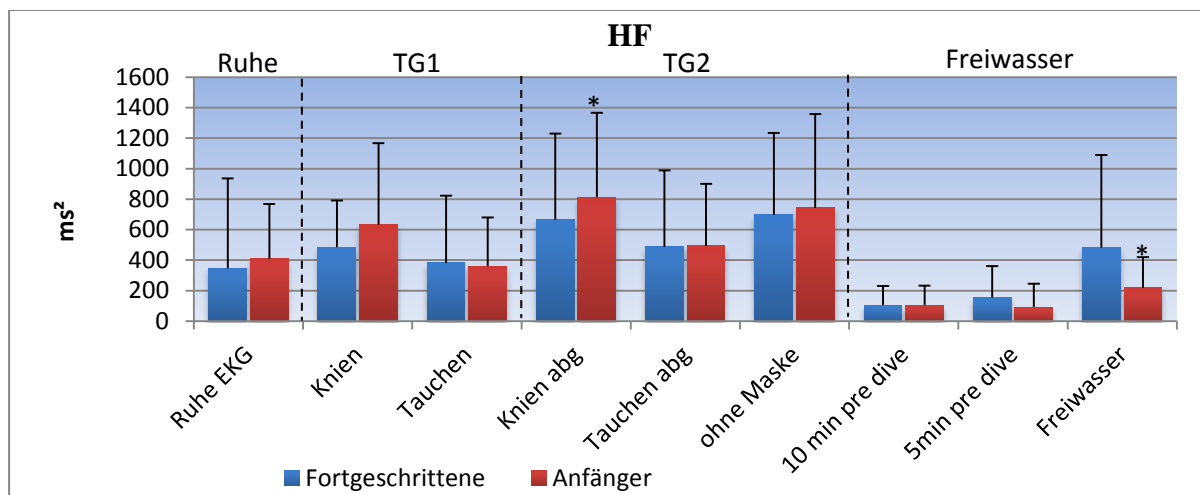
Bei den Freiwassertauchgängen lag die LF bereits „pre-dive“ bei Anfängern und Fortgeschrittenen signifikant (p<0,001) unter dem Ruhe-EKG vor den Hallen-Tauchgängen (Abb. 9) und blieb bei den Anfängern auch unter Wasser erniedrigt.

Wenn man Anfänger mit Fortgeschrittenen vergleicht, zeigt sich beim Tauchen ohne Maske und beim Freiwassertauchgang bei den Anfängern ein deutlich, jedoch nicht signifikant niedrigerer LF-Wert.

Im weiteren Vergleich der Anfänger mit den Fortgeschrittenen fällt auf, dass die Anfänger beim „Knien“ weniger LF Anstieg verzeichnen als die Fortgeschrittenen (+42,5% vs. +17,8%), das gleiche zeigt sich beim „Knien mit abgedunkelter Maske“ (+77,7% vs. +29,9%). Beim „Tauchen im Kreis“ fiel die LF bei den Fortgeschrittenen stärker ab (-29,8% vs. -6,4%). Beim „Tauchen ohne Maske“ stieg die LF bei den Fortgeschrittenen an (+51,1), bei den Anfängern ab (-33,7%). Beim Freiwassertauchgang fiel die LF bei den Anfängern um 67,7% ab, bei den Fortgeschrittenen nur um 18,4% (Tab. 2).

## 3.2.2.2.3. High Frequency (HF)

Die High Frequency wurde wie die Low Frequency aus dem kontinuierlich aufgezeichneten EKG aus den einzelnen 5 Minuten Segmenten der jeweiligen Versuchsabschnitte mittels schneller Fourier'scher Transformation errechnet. Für den Vergleich der einzelnen Versuchsabschnitte wurden die jeweiligen 5 Minuten Segmente summiert und Mittelwerte gebildet.



**Abb. 13:** High Frequency (HF). Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich.

Knien: Knien unter Wasser, Tauchen: Tauchen im Kreis, abg: Abgedunkelte Maske, ohne Maske: Tauchen im Kreis ohne Maske, 10 min pre dive/ 5 min pre dive: 10 Minuten bzw. 5 Minuten vor dem Freiwassertauchgang, Freiwasser: Freiwassertauchgang. Signifikante Unterschiede zum Ruhewert sind mit \* gekennzeichnet.

Beim Vergleich Anfänger/ Fortgeschrittene fällt auf, dass die HF bei den Anfängern beim Freiwassertauchgang deutlich niedriger war als bei den Fortgeschrittenen ( $228 \pm 202 \text{ ms}^2$  vs.  $483 \pm 606 \text{ ms}^2$ ).

HF Abweichung % zum Ruhe Wert	Knien	Tauchen	Knien abg	Tauchen abg	ohne Maske	10 min pre dive	5min pre dive	Freiwasser
Fortgeschrittene	40±173	10±181	92±161	40±141	101±204	-70±41	-56±66	39±343
Anfänger	55±112	-12±191	99±166	21±167	81±360	-75±27	-78±30	-47±130

**Tab. 3:** Abweichung der HF vom Ruhewert. Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich.

Knien: Knien unter Wasser, Tauchen: Tauchen im Kreis, abg: Abgedunkelte Maske, ohne Maske: Tauchen im Kreis ohne Maske, 10 min pre dive/ 5 min pre dive: 10 Minuten bzw. 5 Minuten vor dem Freiwassertauchgang, Freiwasser: Freiwassertauchgang.

Bei den Anfängern stieg die HF im Vergleich zum Ruhewert ( $\text{HF} = 409 \pm 292 \text{ ms}^2$ ) beim "Knien unter Wasser" ( $\text{HF} = 633 \pm 467 \text{ ms}^2$ ), beim "Knien mit abgedunkelter Maske" ( $\text{HF} = 813 \pm 520 \text{ ms}^2$ ) und beim "Tauchen ohne Maske" ( $\text{HF} = 742 \pm 617 \text{ ms}^2$ ) an. Beim "Knien mit

abgedunkelter Maske" war diese Zunahme signifikant ( $p=0,018$ ). Beim Freiwassertauchgang fiel die HF deutlich ab ( $HF= 213\pm 181 \text{ ms}^2$ ) ( $p=0,048$ ).

Bei den Fortgeschrittenen zeigte sich bei der HF keine signifikante Zu- oder Abnahme. Jedoch stieg auch in dieser Gruppe die HF im Vergleich zum Ruhewert ( $HF= 348\pm 533 \text{ ms}^2$ ) beim "Knien unter Wasser" ( $HF= 484\pm 272 \text{ ms}^2$ ), beim "Knien mit abgedunkelter Maske" ( $HF= 672\pm 525 \text{ ms}^2$ ) und beim "Tauchen ohne Maske" ( $HF= 699\pm 536 \text{ ms}^2$ ) an. Ein weiterer Anstieg zeigte sich bei den Fortgeschrittenen beim Freiwassertauchgang ( $HF= 483\pm 545 \text{ ms}^2$ ) (Abb. 13).

Beim Vergleich Anfänger/ Fortgeschrittene fällt auf, dass die HF bei den Anfängern und Fortgeschrittenen ein unterschiedliches Verhalten aufwies. Bei den Fortgeschrittenen stieg die HF um 39,2% an, bei den Anfängern fiel sie um 46,7% ab (Tab. 3).

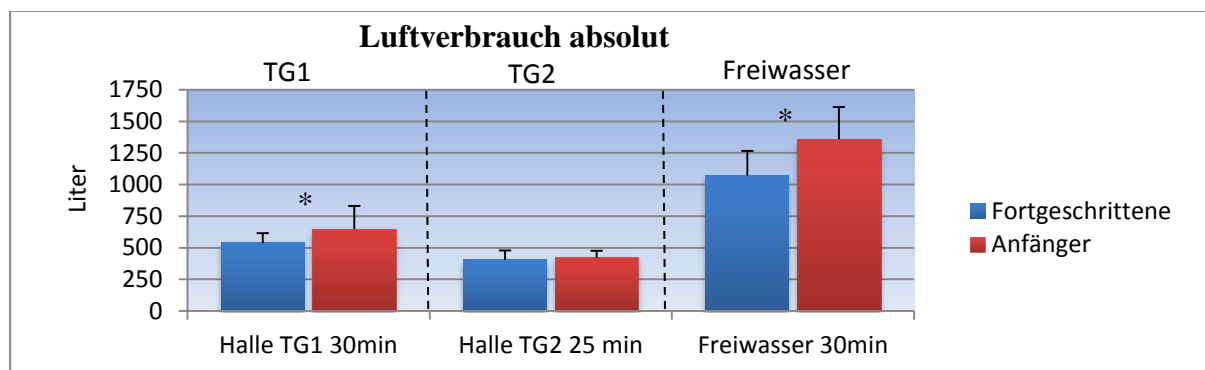
Insgesamt ist somit die HF bei den Anfängern beim Freiwassertauchgang deutlich, jedoch nicht signifikant, niedriger als bei den Fortgeschrittenen (Anfänger:  $213\pm 181 \text{ ms}^2$  vs. Fortgeschrittene:  $483\pm 545 \text{ ms}^2$ ).

Analog zur LF lag die HF bei den Freiwassertauchgängen ebenfalls bereits „pre-dive“ bei Anfängern und Fortgeschrittenen niedriger als im Ruhe-EKG vor den Hallen-Tauchgängen (Abb. 13).

### 3.2.3. Luftverbrauchsanalyse

#### 3.2.3.1. Absoluter Luftverbrauch

Der absolute Luftverbrauch wurde aus der Druckänderung in der Tauchflasche errechnet. Für die jeweiligen Werte wurde der Flaschendruck vor und nach dem analysierten Abschnitt bestimmt. Die Differenz der beiden Druckwerte wurde mit der Flaschengröße multipliziert.

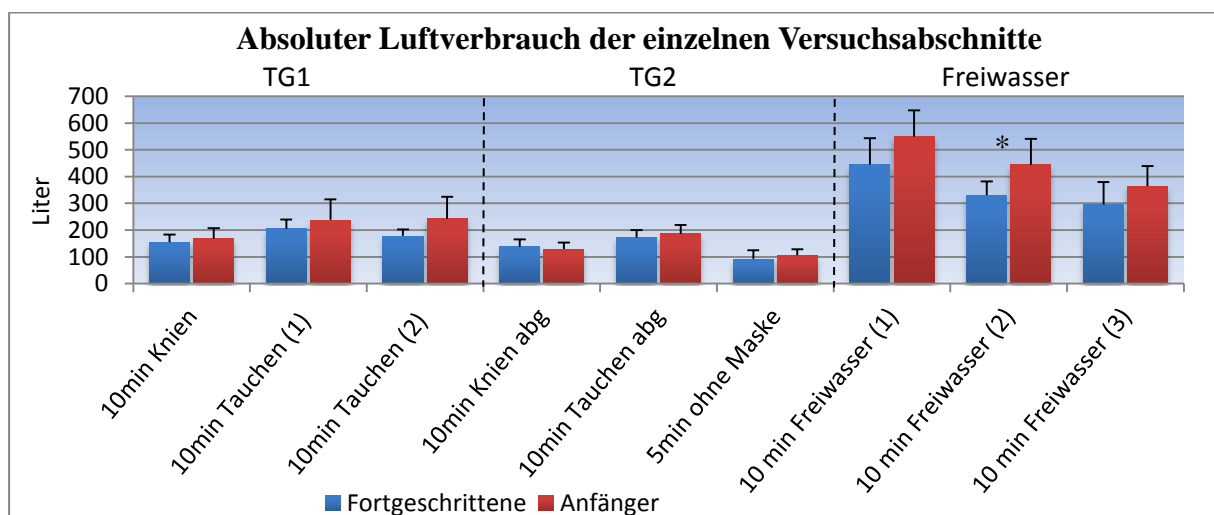


**Abb. 14:** Absoluter Luftverbrauch der einzelnen Tauchgänge absolut. Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich. TG1: 1. Hallenbadtauchgang, TG2: 2. Hallenbadtauchgang, Freiwasser: Freiwassertauchgang. Signifikante Unterschiede zwischen Anfängern und Fortgeschrittenen sind mit \* gekennzeichnet.

Beim 1. Hallenbadtauchgang verbrauchten die Fortgeschrittenen durchschnittlich  $537 \pm 79$  l Luft, wohingegen die Anfänger mit  $648 \pm 183$  l signifikant ( $p=0,049$ ) mehr Luft verbrauchten. Der Luftverbrauch des 2. Hallenbadtauchgangs lag unter dem Wert des 1. Tauchgangs, da dieser nur 25 Minuten anstatt 30 Minuten dauerte. Beim 2. Tauchgang unterschied sich der Luftverbrauch der Anfänger kaum von dem der Fortgeschrittenen (Fortgeschrittene:  $403 \pm 77$  l, Anfänger:  $420 \pm 57$  l).

Da der Luftverbrauch vom Umgebungsdruck abhängig ist, war der Luftverbrauch dementsprechend beim Freiwassertauchgang am höchsten. Die Tauchtiefe des Freiwassertauchgangs betrug bis zu 15m, was einem Umgebungsdruck von ca. 2,5 bar entspricht.

Die Anfänger verbrauchten beim Freiwassertauchgang  $1358 \pm 255$  l Luft, wohingegen die Fortgeschrittenen nur  $1071 \pm 195$  l verbrauchten. Somit verbrauchten die Anfänger im Freiwasser signifikant mehr Luft als die Fortgeschrittenen ( $p=0,005$ ) (Abb. 14).



**Abb. 15:** Luftverbrauch absolut. Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich. Vergleich der einzelnen Versuchsabschnitte. abg= abgedunkelte Maske, (1), (2), (3) erster, zweiter bzw. dritter 10 Minutenabschnitt des jeweiligen Versuchsabschnitts. Signifikante Unterschiede zwischen Anfängern und Fortgeschrittenen sind mit \* gekennzeichnet.

Vergleicht man den absoluten Luftverbrauch, so zeigt sich bei den bewegten Versuchsabschnitten bei Anfängern und Fortgeschrittenen ein signifikanter Mehrverbrauch als beim "Knien unter Wasser" (Abb. 15). Eine Einzelaufstellung der Signifikanz der einzelnen Versuchsabschnitte ist in Tabelle 4 dargestellt. Nachdem jeweils bei den Anfängern und Fortgeschrittenen 8 Versuchsabschnitte miteinander verglichen und beim Vergleich Anfänger mit Fortgeschrittenen 9 Versuchsabschnitte verglichen wurden, wurde das Signifikanz Niveau mit

Hilfe der Bonferoni Korrektur korrigiert. Somit wurde beim Vergleich der einzelnen Versuchsabschnitte innerhalb einer Gruppe ein  $p=0,0063$  als signifikant angesehen und beim Vergleich der einzelnen Versuchsabschnitte Anfänger vs. Fortgeschrittenen ein  $p=0,0056$ . Die Anfänger verbrauchten beim zweiten Abschnitt des Freiwassertauchgangs signifikant mehr Luft als die Fortgeschrittenen (siehe Tabelle 4).

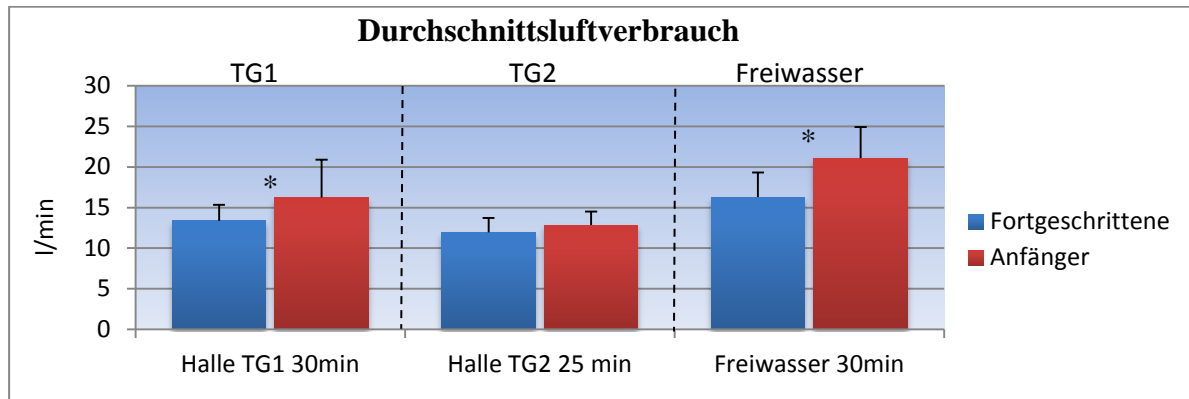
<b>Absoluter Luftverbrauch</b>					
	<b>Mittelwert Gruppe1 [l]</b>	<b>Mittelwert Gruppe2 [l]</b>	<b>p</b>	<b>Stdabw. Gruppe1 [l]</b>	<b>Stdabw. Gruppe2 [l]</b>
<b>10min Knien Fortgeschrittene vs. 10min Tauchen (1) Fortgeschrittene</b>	154	205	<b>0,0003*</b>	29	35
<b>10min Knien Fortgeschrittene vs. 10min Tauchen (2) Fortgeschrittene</b>	154	178	<b>0,0264(*)</b>	29	24
<b>10min Knien Anfänger vs. 10min Tauchen (1) Anfänger</b>	168	238	<b>0,0058*</b>	39	77
<b>10min Knien Anfänger vs. 10min Tauchen (2) Anfänger</b>	168	242	<b>0,0056*</b>	39	82
<b>10min Knien abgedunkelt Fortgeschrittene vs. 10min Tauchen abgedunkelt Fortgeschrittene</b>	138	173	<b>0,0017*</b>	27	27
<b>10min Knien abgedunkelt Anfänger vs. 10min Tauchen abgedunkelt Anfänger</b>	129	186	<b>&lt;0,001*</b>	24	33
<b>10min Tauchen (2) Anfänger vs. 10min Tauchen (2) Fortgeschrittene</b>	242	178	<b>0,0104(*)</b>	82	24
<b>Freiwasser 10min (1) Anfänger vs. Freiwasser 10min (1) Fortgeschrittene</b>	550	445	<b>0,0141(*)</b>	98	99
<b>Freiwasser 10min (2) Anfänger vs. Freiwasser 10min (2) Fortgeschrittene</b>	444	330	<b>0,0016*</b>	97	52
<b>Freiwasser 10min (3) Anfänger vs. Freiwasser 10min (3) Fortgeschrittene</b>	364	296	<b>0,0438(*)</b>	75	84

**Tabelle 4:** Signifikanzen des absoluten Luftverbrauchs der einzelnen Versuchsabschnitte. Mittelwerte in l, Stdabw. = Standardabweichung in l, , (1), (2), (3) erster, zweiter bzw. dritter 10 Minutenabschnitt.

\*signifikant nach Bonferoni Korrektur; (\*) nach Bonferoni Korrektur nicht mehr signifikant.

### 3.2.3.2. Durchschnittlicher Luftverbrauch/ Atemminutenvolumen

Der Durchschnittsluftverbrauch ist als durchschnittliches Atemminutenvolumen (AMV) angegeben. Die Werte wurden durch den jeweils herrschenden Umgebungsdruck dividiert und somit korrigiert.



**Abb. 16:** Durchschnittsluftverbrauch in Liter pro Minute. Umgebungsdruck korrigiert.

Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich. TG1: 1. Hallenbadtauchgang, TG2: 2. Hallenbadtauchgang, Freiwasser: Freiwassertauchgang. Signifikante Unterschiede zwischen Anfängern und Fortgeschrittenen sind mit \* gekennzeichnet.

Beim ersten Hallenbadtauchgang unterschied sich das druckkorrigierte AMV der Anfänger signifikant vom AMV der Fortgeschrittenen ( $p=0,043$ ). Die Anfänger hatten hier ein AMV von  $16,24 \pm 4,66$  l/min, die Fortgeschrittenen von  $13,36 \pm 1,99$  l/min.

Beim 2. Hallenbadtauchgang gab es zwischen Anfängern und Fortgeschrittenen keine nennenswerten Unterschiede. Die Anfänger hatten ein AMV von  $12,84 \pm 1,68$  l/min und die Fortgeschrittenen ein AMV von  $11,96 \pm 1,75$  l/min.

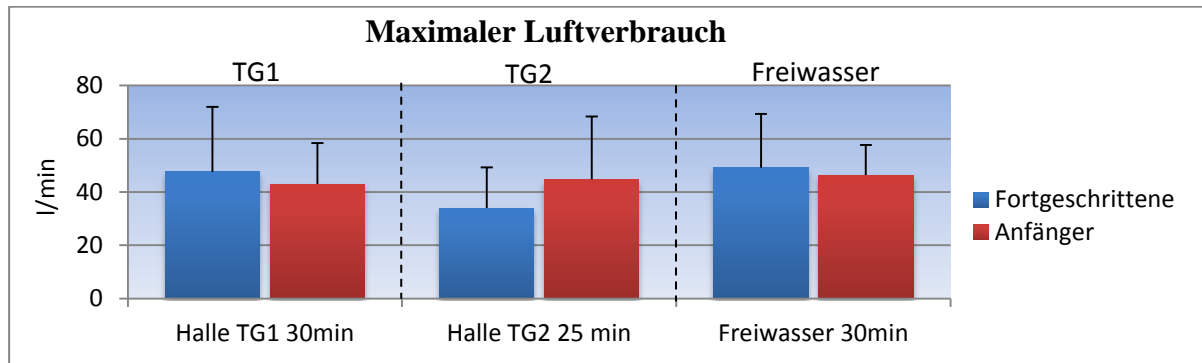
Beim Freiwassertauchgang verbrauchten die Anfänger  $21,09 \pm 3,82$  l/min, die Fortgeschrittenen hingegen nur  $16,28 \pm 3,02$  l/min. Dieser Unterschied ist ebenfalls statistisch signifikant ( $p=0,002$ ).

Beim Freiwassertauchgang hatten die Probanden ein signifikant höheres AMV als im Hallenbad. Das AMV der Anfänger war im Freiwasser im Vergleich zum 1. Hallenbadtauchgang ( $p=0,008$ ) und zum 2. Hallenbadtauchgang ( $p < 0,001$ ) signifikant höher. Bei den Fortgeschrittenen zeigte sich das gleiche Bild. Hier war auch das AMV im Freiwasser im Vergleich zum 1. Hallenbadtauchgang ( $p=0,007$ ) und zum 2. Hallenbadtauchgang ( $p < 0,001$ ) signifikant höher (Abb. 16).

### 3.2.3.2. Maximaler Luftverbrauch/ Atemminutenvolumen

Der maximale Luftverbrauch ist das größte (druckkorrigierte) AMV, welches während der jeweiligen Tauchgänge gemessen wurde.



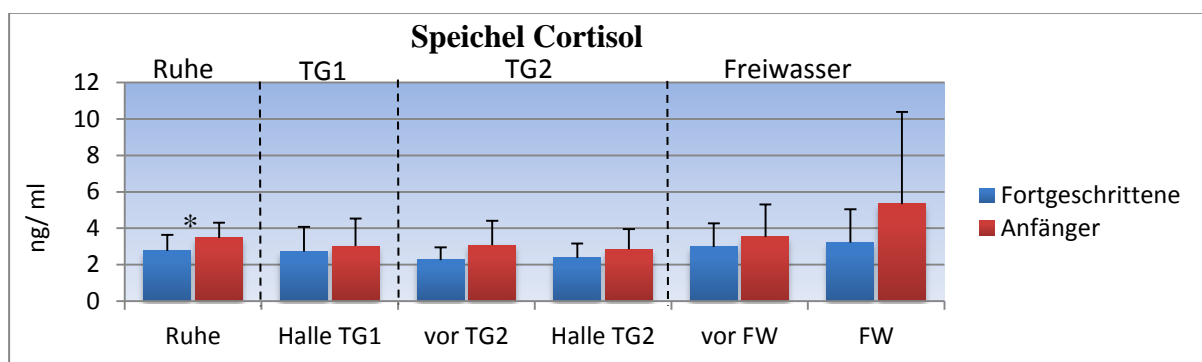


**Abb. 17:** Maximaler Luftverbrauch in Liter pro Minute. Umgebungsdruck korrigiert. Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich. TG1: 1. Hallenbadtauchgang, TG2: 2. Hallenbadtauchgang, Freiwasser: Freiwassertauchgang.

Beim maximalen Luftverbrauch zeigten sich zwischen den Anfängern und den Fortgeschrittenen keine relevanten Unterschiede. Die Anfänger hatten beim 1. Hallenbadtauchgang ein maximales AMV von  $42,96 \pm 15,47$  l/min, die Fortgeschrittenen von  $47,63 \pm 24,36$  l/min. Beim 2. Hallenbadtauchgang hatten die Anfänger ein maximales AMV von  $44,84 \pm 23,56$  l/min, die Fortgeschrittenen hatten ein maximales AMV von  $33,94 \pm 15,3$  l/min. Beim Freiwassertauchgang betrug das maximale AMV der Anfänger  $46,32 \pm 11,31$  l/min, das der Fortgeschrittenen  $49,09 \pm 20,28$  l/min (Abb. 17).

### 3.2.4. Cortisol im Mundspeichel

Die Speichelcortisolkonzentration wurde vor und nach jedem Tauchgang bestimmt.



**Abb. 18:** Speichelcortisol Konzentration. Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich.

Ruhe: Ruhewert, Halle TG1: nach 1. Hallenbadtauchgang, vor TG: vor dem 2. Hallenbadtauchgang, Halle TG2: nach 2. Hallenbadtauchgang, vor FW: vor Freiwassertauchgang, FW: nach Freiwassertauchgang. . Signifikante Unterschiede zwischen Anfängern und Fortgeschrittenen sind mit \* gekennzeichnet.

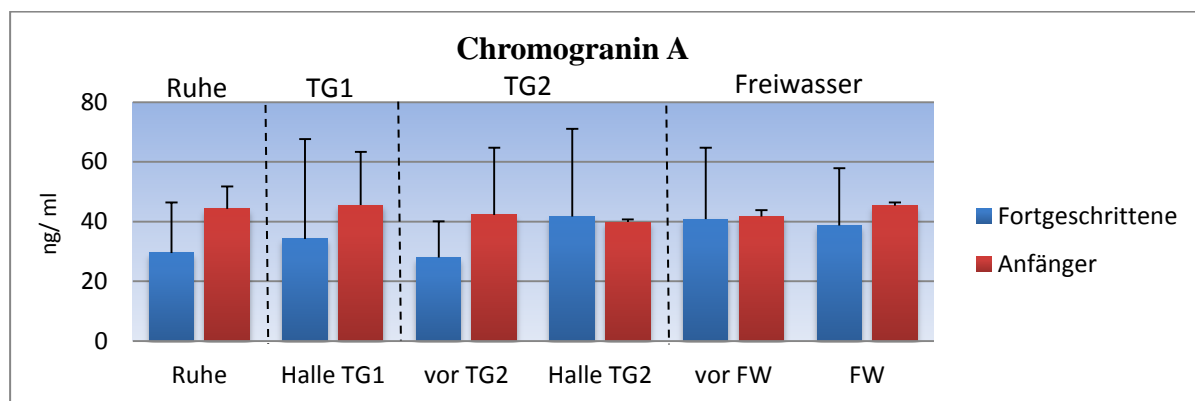
Bei den Speichelcortisolwerten zeigte sich sowohl bei den Anfängern (Hallenbadtauchgang 1:  $3,02 \pm 1,52$  ng/ml, Hallenbadtauchgang 2:  $3,07 \pm 1,33$  ng/ml) als auch bei den Fortgeschrittenen (Hallenbadtauchgang 1:  $2,73 \pm 1,34$  ng/ml, Hallenbadtauchgang 2:  $2,26 \pm 0,69$  ng/ml) ein Abfall des Cortisols bei beiden Hallenbadtauchgängen im Vergleich zum Ruhewert (Anfänger:  $3,46 \pm 0,85$  ng/ml, Fortgeschrittene:  $2,26 \pm 0,88$  ng/ml). Dieser Abfall war jedoch nicht signifikant.

Beim Freiwassertauchgang zeigte sich bei beiden Gruppen ein Anstieg des Speichelcortisolwertes (Anfänger:  $5,33 \pm 5,06$  ng/ml, Fortgeschrittene:  $3,21 \pm 1,84$  ng/ml). Dieser Anstieg war jedoch nicht signifikant.

Beim Vergleich Anfänger mit Fortgeschrittenen zeigten sich bei allen Speichelcortisolmessungen bei den Anfängern höhere Cortisolwerte als bei den Fortgeschrittenen. Der Cortisolwert vor dem 1. Hallenbadtauchgang (Ruhewert) war bei den Anfängern ( $3,46 \pm 0,85$  ng/ml) sogar signifikant höher ( $p=0,046$ ) als bei den Fortgeschrittenen ( $2,26 \pm 0,88$  ng/ml) (Abb. 18).

### 3.2.5. Chromogranin A im Mundspeichel

Die Chromogranin A Konzentration im Speichel wurde vor und nach jedem Tauchgang bestimmt.



**Abb. 19:** Chromogranin A Konzentration (Speichel). Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich.

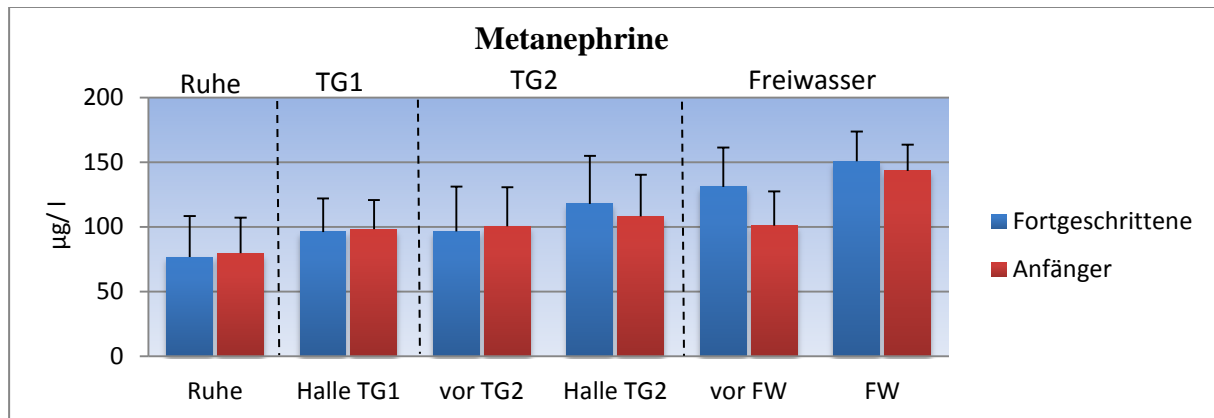
Ruhe: Ruhewert, Halle TG1: nach 1. Hallenbadtauchgang, vor TG: vor dem 2. Hallenbadtauchgang, Halle TG2: nach 2. Hallenbadtauchgang, vor FW: vor Freiwassertauchgang, FW: nach Freiwassertauchgang.

Die Chromogranin A Werte zeigten bei den Anfängern bei allen Tauchaktivitäten keine nennenswerten Änderungen. Bei den Fortgeschrittenen zeigte sich ein leichter Anstieg beim ersten und zweiten Hallenbadtauchgang (Hallenbadtauchgang 1:  $34,2 \pm 33,4$  ng/ml, Hallenbadtauchgang 2:  $41,7 \pm 29,4$  ng/ml) im Vergleich zum Ruhewert ( $29,5 \pm 16,9$  ng/ml).

Insgesamt waren die Chromogranin A Speichelwerte der Anfänger höher als die der Fortgeschrittenen (Abb. 19).

### 3.2.6. Metanephrine im Urin

Die Metanephrinwerte wurden aus Urin vor und nach jedem Tauchgang bestimmt.



**Abb. 20:** Metanephrin Konzentration (Urin). Anfänger und Fortgeschrittene im Vergleich.

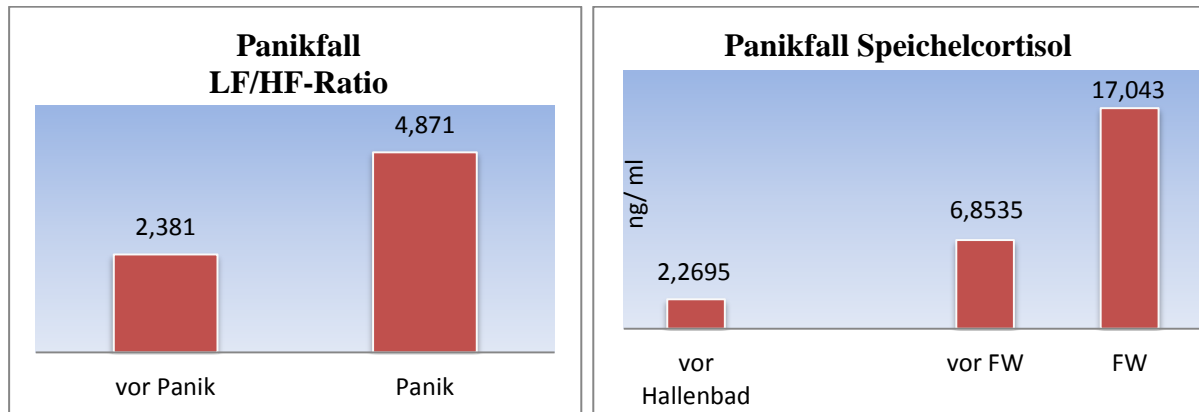
Ruhe: Ruhewert, Halle TG1: nach 1. Hallenbadtauchgang, vor TG: vor dem 2. Hallenbadtauchgang, Halle TG2: nach 2. Hallenbadtauchgang, vor FW: vor Freiwassertauchgang, FW: nach Freiwassertauchgang.

Die Metanephrinwerte der Anfänger unterschieden sich nicht wesentlich von denen der Fortgeschrittenen. Insgesamt zeigte sich bei Anfängern und Fortgeschrittenen nach den Tauchgängen ein etwas höherer Wert als in Ruhe. Der Ruhewert vor dem Freiwassertauchgang (Anfänger:  $143,3 \pm 26,5$  µg/l, Fortgeschrittene:  $150,6 \pm 30,3$  µg/l) war deutlich höher als der Ruhewert vor den Hallenbadtauchgängen (Anfänger:  $79,6 \pm 27,5$  µg/l, Fortgeschrittene:  $76,6 \pm 31,7$  µg/l). Dementsprechend waren die Metanephrinwerte nach dem Freiwassertauchgang ebenfalls höher als nach den Schwimmbadtauchgängen (Abb. 20).

### 3.3. Fallstudie: Einzelfall Panikaufstieg

Bei den Versuchen bekam ein Proband während des Freiwassertauchgangs Panik und stieg schnell auf. Der Notaufstieg konnte vom begleitenden Tauchlehrer kontrolliert werden, es bestand zu keinem Zeitpunkt Gefahr für den Probanden.

Da Panik mit vermehrtem Stress einhergeht, ist die Einzelauswertung der Daten dieses Probanden von besonderem Interesse für die Studie.



**Abb. 21:** Einzelfall: Panik.

LF/HF Ratio: 5 Minutenintervall vor Eintritt der Panik im Vergleich zum 5 Minutenintervall während der Panik. Speichelcortisolkonzentration des Probanden mit Panik: Vor Hallenbadtauchgang, vor dem Freiwassertauchgang (vor FW) und nach dem Freiwassertauchgang (FW).

Im HRV 5 Minutenintervall während des Freiwassertauchgangs direkt vor der Panik lag die LF/HF Ratio bei 2,38, während des 5 Minutenintervalls, in dem die Panik auftrat, erhöhte sich der LF/HF Wert auf 4,87 (Abb. 21).

Das gleiche Bild zeigte sich beim Speichelcortisol. Vor dem Hallenbadtauchgang lag der Cortisolwert bei 2,27 ng/ml, vor dem Freiwassertauchgang war dieser Wert bereits erhöht (6,85 ng/ml). Während des Freiwassertauchgangs stieg der Cortisolwert nochmals deutlich an, so lag der unmittelbar nach dem Freiwassertauchgang gewonnene Wert bei 17,04 ng/ml (Abb. 21).

Die Herzfrequenz lag während des Tauchgangs, bevor die Panik auftrat, zwischen 103 und 112 Schlägen/ min. Während der Panikreaktion lag die Herzfrequenz zwischen 139 und 159 Schlägen/ min. Der Luftverbrauch ließ sich während des Panikaufstieges nicht messen (Funkkontaktfehler). Die Bestimmung von Chromogranin A und Metanephrinen war ebenfalls nicht möglich, da der Proband nach dem Tauchgang kein Wasser lassen konnte und die Speichelproduktion nur für ein Probenröhrchen ausreichte. Vor dem Freiwassertauchgang lagen die Metanephrine mit 254 µg/ l deutlich über dem Durchschnittswert der Tauchanfänger von 130±66 µg/ l.

## 4. Diskussion

Beim Gerätetauchen kommt es den vorliegenden Daten zufolge sowohl bei Tauchanfängern als auch bei Fortgeschrittenen zu einer Aktivitätszunahme sowohl des Sympathikus-assoziierten LF-Bereiches als auch des Parasympathikus-assoziierten HF-Bereiches in der Analyse der Herzfrequenzvariabilität. Diese Zunahme ist beim Parasympathikus jedoch deutlich ausgeprägter als beim Sympathikus. In der LF/HF-Ratio ergibt sich daraus durch die Abnahme des Quotienten ein Shift in Richtung eines Überwiegens des Parasympathikus in beiden Tauchergruppen.

Neben dieser Gemeinsamkeit beider untersuchten Gruppen und dem generell zu erwartenden mäßig erhöhten Herzfrequenzprofil sowie Luftverbrauch beim körperlich aktiven Tauchen, wiesen die beiden untersuchten Gruppen ebenso wie die Hallen- und Freiwassertauchgänge relevante Unterschiede und scheinbare Widersprüchlichkeiten auf, die im Folgenden zu diskutieren sind.

### 4.1. Herzfrequenz

#### 4.1.1. Änderung der Herzfrequenz bei den fortgeschrittenen Tauchern

Das Absinken der Herzfrequenz beim Knien unter Wasser lässt sich am ehesten durch den Taucherreflex (4) (26) erklären. Paul Bert beobachtete 1870 erstmals eine Herzfrequenzabsenkung bei tauchenden Vögeln. Schagatay und Andersson beschrieben 1998 bei Apnoetauchern eine Herzfrequenzabnahme im Sinne einer „Sauerstoffsparmaßnahme“. Da dieser Effekt beim "Knien mit abgedunkelter Maske" am ausgeprägtesten war, scheint Dunkelheit/visuelle Entkopplung für den Taucherreflex hier einen zusätzlichen Beitrag zu leisten.

Der leichte Herzfrequenzanstieg beim Tauchen im Kreis ist auf die Bewegung zurückzuführen, da bei körperlicher Aktivität ein erhöhter Sauerstoffbedarf besteht und so kompensatorisch das Herzzeitvolumen, unter anderem mittels Herzfrequenzanstieg, zunimmt.

Die anfänglich erhöhte Herzfrequenz beim Freiwassertauchgang in der Abtauchphase könnte durch Aufregung bzw. psychische Anspannung bedingt sein. In dieser Phase durchschreitet der Taucher die Sprungschicht, die Wassertemperatur fällt von ca. 18°C auf 10°C ab, und es wird zunehmend dunkler. In der restlichen Zeit des Freiwassertauchgangs liegen die Herzfrequenzen wieder auf dem Niveau der bewegten Phasen der Hallenbadtauchgänge und sind wiederum am ehesten durch die körperliche Aktivität bedingt.

#### 4.1.2. Änderung der Herzfrequenz bei den Anfängern

Bei den Anfängern war beim 1. Tauchgang kein Absinken, sondern vielmehr eine Zunahme der Herzfrequenz zu verzeichnen. Die Zunahme der Herzfrequenz lässt sich am ehesten durch psychische Anspannung erklären.

Beim Freiwassertauchgang zeigt sich bei den Anfängern ebenfalls ein Herzfrequenzanstieg, auch in dieser Gruppe, besonders in der Abtauchphase.

#### 4.1.3. Vergleich der Herzfrequenzprofile Fortgeschrittene mit Anfängern

In Ruhe unterschieden sich die Herzfrequenzen der Anfänger und Fortgeschrittenen, wie erwartet, kaum. Die bei allen Tauchaktivitäten höheren Herzfrequenzen der Anfänger lassen auf eine höhere psychische Anspannung im Vergleich zu den Fortgeschrittenen schließen. Bei den dynamischen Tauchaktivitäten (Tauchen im Kreis und Freiwassertauchgang) ist die Herzfrequenzzunahme bei den Anfängern nochmals deutlich höher als bei den Fortgeschrittenen. Diese Zunahme lässt sich dadurch erklären, dass die fortgeschrittenen Taucher aufgrund ihrer Taucherfahrung gelernt haben, sich unter Wasser effizienter zu bewegen. Die Tarierung war deutlich besser als diejenige der Anfänger, zudem „ruderten“ die meisten Anfänger während der dynamischen Tauchphasen mit den Armen, um eine mangelhafte Tarierung auszugleichen. Daher ist davon auszugehen, dass die Tauchgänge für Anfänger körperlich anstrengender waren als für die Fortgeschrittenen. Somit hatten die Anfänger einen höheren Sauerstoffbedarf (siehe Kapitel 3.2.3 Luftverbrauch), welcher wiederum mit einer Erhöhung des Herzzeitvolumens und der Herzfrequenz einhergeht.

### 4.2. Herzfrequenzvariabilität

#### 4.2.1. Time Domain Werte

##### 4.2.1.1. Mittlere NN-Werte

Die NN-Abstände stellen die Zeit zwischen den jeweils benachbarten R-Zacken dar. Bei einer Steigerung der Herzfrequenz verkürzen sich somit die NN-Abstände, die signifikanten Änderungen sind somit analog zu den Änderungen der Herzfrequenz zu betrachten.

##### 4.2.1.2. pNN50%

In Ruhe unterschieden sich die wenigsten NN-Intervalle um mehr als 50ms. Dies spricht für die Validität und Kontinuität des Ruhewertes, da bei gleich bleibender Aktivität und in Ruhe

die Herzfrequenz sich außer im Rahmen der physiologischen Schwankungen kaum ändern sollte.

Die Änderungen der pNN50% Werte bei den anderen Aktivitäten bilden die jeweilige aktuelle Herzfrequenzvariabilität ab, wobei Abnahmen der Herzfrequenz vorzugsweise mit einer Erhöhung der pNN50% einhergehen (11). Hohe Pulsfrequenzen gehen mit einer verminderten Schwankungsfähigkeit der RR-Abstände und somit einer Abnahme der pNN50% einher (27) (28), wie es sich besonders deutlich bei den Anfängern im Vergleich zu den Fortgeschrittenen im Freiwasser zeigte.

#### 4.2.1.3. RMSSD

Der RMSSD Wert gilt als Indikator für die Parasympathikusaktivität, höhere RMSSD-Werte sprechen für eine erhöhte Parasympathikusaktivität (29).

Sowohl bei den Anfängern, als auch bei den Fortgeschrittenen zeigte sich beim RMSSD-Wert eine signifikante Zunahme beim "Knien mit abgedunkelter Maske". Somit scheint Dunkelheit beim Tauchen einen parasympathischen Reiz auszulösen. Bei den Fortgeschrittenen zeigte sich zudem eine signifikante Zunahme des RMSSD-Wertes beim "Tauchen ohne Maske", bei den Anfängern zeigt sich hier auch eine deutliche, jedoch nicht signifikante Zunahme.

Somit scheint auch das Tauchen ohne Maske ein parasympathischer Reiz zu sein. Die Aktivitätszunahme des Parasympathikus wurde wahrscheinlich durch den Taucherreflex ausgelöst.

Der Tauchreflex stellt einen parasympathischen Reiz dar (7) (30) und wird unter anderem durch die Aktivierung über Wasserkontakt von afferenten sensorischen Nervenfasern des Nervus trigeminus auf der Stirn, in der Augenregion, auf den Lippen und in der Nasenhöhle (31) (32) (33) ausgelöst. Eine besondere Rolle scheint hierbei der Nervus ethmoidalis anterior zu spielen (34). Die signifikante Zunahme der parasympathischen Aktivität beim „Tauchen ohne Maske“ lässt sich somit durch den Wasserkontakt der Rezeptoren im Bereich der Nase erklären, welche beim Tauchen mit Maske zuvor keinen direkten Wasserkontakt hatten.

#### 4.2.1.4. Standardabweichung der NN-Abstände

Auch bei der Standardabweichung der NN-Abstände zeigte sich das gleiche Bild wie bei den anderen Time Domain Werten. Eine signifikante Zunahme bestand bei beiden Versuchsgruppen beim "Knien mit abgedunkelter Maske".

#### 4.2.2. Frequency Domain Werte

##### 4.2.2.1. Physiologische Korrelate der Frequency-Domain-Komponenten

Das vegetative Nervensystem beeinflusst und kontrolliert die Herzfrequenz (35).

Der parasympathische Stimulus auf die Herzfrequenz erfolgt durch Ausschüttung von Acetylcholin durch den Nervus Vagus. Acetylcholin erhöht über muskarinische Acetylcholinrezeptoren den Einstrom von Kalium in die kardialen Schrittmacherzellen, was zu einer Verlangsamung der Herzfrequenz führt (36) (11).

Der Sympathikus beeinflusst die Herzfrequenz durch die Ausschüttung von Adrenalin und Noradrenalin. Durch die Aktivierung von  $\beta$ -adrenergen Rezeptoren werden Membranproteine in den If-Kanälen cAMP-abhängig phosphoryliert, was wiederum zu einer Beschleunigung der Depolarisation und damit zu einer Zunahme der Herzfrequenz führt (37) (11).

Die sympathischen und parasympathischen Einflüsse modulieren auf diese Weise die Herzfrequenz. Die so entstandenen Veränderungen der Herzfrequenz werden mittels Herzfrequenzvariabilitätsanalyse untersucht.

Bei der Frequency Domain Analyse der HRV unterscheidet man zwischen einer LF und einer HF Komponente.

Die HF Komponente symbolisiert die vagalen Einflüsse auf die Herzfrequenz. Dies konnte in diversen Studien gezeigt werden. Bei bewusstlosen Hunden wurde die muscarinerge parasympathische Übertragung mittels selektiv wirkendem Glykopyrrolat ausgeschaltet. Diese selektive Blockade führte zu einem Verschwinden der HF-Komponente (13). Beim Menschen zeigte eine Blockade des Parasympathikus durch Atropin nahezu ein Verschwinden der HF-Komponente (14).

Die LF-Komponente symbolisiert vor allem sympathische Einflüsse aber sie enthält auch parasympathische Einflüsse.

Bei bewusstlosen Hunden wurden die sympathischen  $\beta$ -adrenergen Rezeptoren mittels Propranolol blockiert. Dieser Block reduzierte die LF-Komponente, jedoch verkleinerte sich diese ebenfalls, wenn auch weniger stark ausgeprägt, auch bei Gabe des parasympatholytischen Glykopyrrolat (13). Auch beim Menschen führte eine Propranololgabe zu einer Reduktion der LF-Komponente, wobei auch hier eine Atropingabe ebenfalls die LF-Komponente reduzierte (14).

Aufgrund der vagalen Einflüsse auch auf die LF-Komponente liefert die LF/HF Ratio die wohl aussagekräftigste Information zur sympatho/-vagalen Balance (11).



#### 4.2.2.2. Interpretation der LF/HF Ratio

Die Tatsache, dass bei Registrierung des Ruhe EKGs die LF/HF Ratio der Fortgeschrittenen höher als bei den Anfängern lag, was für einen erhöhten Sympathikotonus spricht, könnte mit der Umgebung zusammen hängen. Die Anfänger kannten das Hallenbad und die Wärmebank, da sie ihre Tauchausbildung in dieser Schwimmhalle absolvierten. Bei den Fortgeschrittenen lag die Tauchausbildung schon länger zurück, sie waren teilweise zum ersten Mal in der Universitätsschwimmhalle in Kiel. Ein weiterer Stressor bei den Fortgeschrittenen könnte gewesen sein, dass sie den Eindruck hatten, ihre Tauchfähigkeiten „beweisen“ zu müssen bzw. sich wie in einer Prüfungssituation vorkamen.

Bei Anfängern und Fortgeschrittenen fiel die LF/HF Ratio beim "Knien unter Wasser" ab. Bei den Anfängern war dieser Effekt jedoch signifikant deutlich ausgeprägter als bei den Fortgeschrittenen.

Der fast durchgehend in beiden Gruppen und sowohl im Hallenbad als auch im Freiwasser zu beobachtende Abfall der LF/HF Ratio symbolisiert einen Shift des Vegetativen Nervensystems in Richtung Parasympathikus, der mit hoher Wahrscheinlichkeit durch eine Aktivierung des Tauchreflexes zumindest mitbedingt ist.

Die Tatsache, dass die Verschiebung des vegetativen Gleichgewichtes in Richtung Parasympathikus bei den Anfängern trotz möglichen erhöhten Stresses teilweise signifikant ausgeprägter als bei den Fortgeschrittenen war, deutet an, dass Anfänger einen (noch) deutlich ausgeprägteren Taucherreflex als Fortgeschrittene haben könnten. Fortgeschrittene Taucher könnten somit zunehmend eine Habituation an den Taucherreflex aufweisen. Bei Enten führte ein sehr häufiges repetitives Untertauchen auf Dauer zu einer Habituation und Abschwächung des Taucherreflexes (38).

Diese Hypothese wird durch weitere Ergebnisse der LF/HF Ratio einerseits gestützt, andererseits aber auch der direkte und konkurrierende Einfluss körperlicher Belastung auf das Vegetativum aufgezeigt: Beim "Tauchen im Kreis" war die LF/HF Ratio der Anfänger und Fortgeschrittenen fast gleich. Da die Fortgeschrittenen eine höhere LF/HF Ratio in Ruhe hatten, ist deren Abfall hier prozentual größer als derjenige der Anfänger. Da eine stärkere körperliche Belastung mit einem höheren Sympathikotonus und somit mit einem Anstieg der LF/HF Ratio (39) einhergeht, spricht der prozentual geringere Abfall der Anfänger genau wie das Herzfrequenzprofil dafür, dass sie sich bei den dynamischen Versuchsabschnitten schlichtweg ineffizienter unter Wasser bewegen (Tarierung, „Rudern“ mit den Armen).

Beim "Tauchen ohne Maske" hingegen zeigte sich der größte und in beiden Versuchsgruppen signifikante Abfall der LF/HF Ratio, wobei die Anfänger sich durch eine besonders erniedrigte LF/HF Ratio noch einmal erheblich von den Fortgeschrittenen unterschieden.

Untersuchungen von Apnoetauchern haben gezeigt, dass die Apnoedauer durch Gesichtsimmersion deutlich verlängert werden kann und dass eine Korrelation zwischen Herzfrequenzreduktion und dem Blutfluss in den Gesichtshautkapillaren besteht (26). Eine weitere Studie zeigte eine niedrigere LF/HF Ratio der HRV beim Untertauchen des gesamten Körpers in Wasser im Vergleich zum Eintauchen des Körpers ohne ein Untertauchen des Kopfes (3).

Die Tatsache, dass in der vorgelegten Studie beim "Tauchen ohne Maske" ein signifikanter Abfall der LF/HF Ratio zu beobachten war, spricht wie die Ergebnisse der genannten Studien dafür, dass die Gesichtsimmersion und insbesondere die Abkühlung der Nasenregion nach Absetzen der Maske für den Taucherreflex mitverantwortlich ist.

Die zweite Beobachtung nach Absetzen der Maske, dass die LF/HF Ratio der Anfänger signifikant niedriger als diejenige der Fortgeschrittenen lag, spricht erneut für einen noch ausgeprägter vorhandenen Taucherreflex der Anfänger beziehungsweise einen höheren Shift in Richtung Parasympathikus in dieser Gruppe.

Der im Freiwasser beobachtete signifikante Abfall der LF/HF Ratio bei Anfängern und Fortgeschrittenen spricht auch hier für eine deutliche Steigerung der parasympathischen Aktivität. Im Freiwasser scheint die Aktivierung des Parasympathikus im Vergleich zum Schwimmbadtauchgang nochmals deutlich ausgeprägter zu sein.

Als Erklärung bietet sich hier an, dass sich der Freiwassertauchgang wesentlich vom „Tauchen im Kreis“ im Hallenbad durch die deutlich niedrigere Wassertemperatur (10°C vs. 26°C), Dunkelheit (dämmrig unter der Sprungschicht) und erhöhtem Umgebungsdruck (bis zu 2,5 bar vs. 1,5 bar), sowie dem Partialdruck der Atemgase ( $O_2=0,525$  bar vs. 0,21bar,  $N_2=1,95$  bar vs. 0,78 bar) unterschied.

In einer Druckkammerstudie ist gezeigt worden, dass es bei Pressluftatmung mit 2,5 bar Gasdruck zu keiner signifikanten Zunahme oder Abnahme der LF/HF Ratio kam (40), eine signifikante Abnahme der LF/HF Ratio konnte dort nur bei der Atmung von reinem Sauerstoff gezeigt werden. Eine weitere Druckkammerstudie zeigte zwar eine Zunahme der HRV bei höheren Umgebungsdrücken, aber keine signifikante Änderung der HF- oder LF-Komponente bei Umgebungsdrücken von unter 3-4 bar (41).

Somit scheinen der Umgebungsdruck und die Atemgaspartialdrücke, zumindest bei moderaten Tiefen, wie sie in der vorgelegten Studie herrschten, keine signifikante Auswirkung auf die LF/HF Ratio zu haben.

Zu diskutieren bleibt der Einfluss der Umgebungstemperatur und der Dunkelheit auf die LF/HF Ratio. Dunkelheit scheint hierbei einen Einfluss zu haben, da beim Versuchsabschnitt „Tauchen im Kreis mit abgedunkelter Maske“ ebenfalls ein im Vergleich zum „Tauchen im Kreis“ niedrigerer LF/HF Wert zu verzeichnen war.

Beim Apnoetauchen führt kaltes Wasser zu einer Verlangsamung der Herzfrequenz und somit zu einem synergistischen Einfluss auf die messbaren Effekte des Taucherreflexes (42). Ein ähnlicher Effekt ist auch beim Gerätetauchen zu erwarten. Somit scheinen Dunkelheit und Kälte beim Tauchen parasymphatische Reize darzustellen. Bei den Anfängern lag die LF/HF Ratio im Freiwasser signifikant niedriger als bei den Fortgeschrittenen und deutet darauf hin, dass bei den Anfängern die Aktivierung des Parasympathikus deutlich ausgeprägter war als bei Fortgeschrittenen. Dies könnte, wie oben erwähnt, durch eine Habituation der Fortgeschrittenen an den Taucherreflex verursacht sein.

Besonders zu erwähnen ist hier noch, dass die Anfänger im Freiwasser eine niedrigere LF/HF Ratio aufwiesen, obwohl Herzfrequenz und Luftverbrauch signifikant höher gemessen wurden als bei den Fortgeschrittenen. Dies deutet auf konkurrierende Prozesse in der vegetativen Steuerung hin.

#### 4.2.2.3. Interpretation der LF-Werte und HF-Werte

Der Anstieg des LF-Wertes beim ruhigen „Knien unter Wasser“ sowohl bei den Anfängern, als auch bei den Fortgeschrittenen mit teilweise signifikanten Änderungen beim „Knien mit abgedunkelter Maske“ spricht für eine Aktivierung des Sympathikus, der zeitgleiche Anstieg des HF-Wertes für eine parallele Parasympathikusaktivierung (13) (14). Somit scheinen beim „Knien unter Wasser“ sowohl der Sympathikus als auch der Parasympathikus aktiviert zu werden (3).

Bei Anfängern und Fortgeschrittenen steigt die LF weniger stark an als die HF. Somit scheint der Parasympathikus stärker als der Sympathikus aktiviert zu werden (3). Bei den Anfängern ist im Vergleich zu den Fortgeschrittenen der Anstieg der LF geringer ausgeprägt, der HF Anstieg ausgeprägter und die LF/HF Ratio niedriger.

Somit scheint bei den Anfängern der Parasympathikus stärker als bei den Fortgeschrittenen aktiviert zu werden.

Der beobachtete Abfall der LF beim „Tauchen im Kreis“ trotz Bewegung könnte auch mit der Abhängigkeit der HRV von der Körperlage (43) (44) und von der Herzfrequenz (27) (45,46) zusammenhängen.

Der Abfall der HF bei den Anfängern und Anstieg bei den Fortgeschrittenen beim „Tauchen im Kreis“ deutet auf eine niedrigere Parasympathikus-Aktivität bei den Anfängern aufgrund der unökonomischen Bewegungsweise unter Wasser hin. Allerdings muss hier erwähnt werden, dass diese Ergebnisse Tendenzen darstellen und keine Signifikanz erreicht haben.

Insgesamt zeigen die LF- und HF- Werte für sich, wie die LF/HF Ratio, bei den Anfängern ein Bild der stärkeren Parasympathikusaktivierung als bei den Fortgeschrittenen. Am deutlichsten ist dieser Effekt bei den Versuchsabschnitten, in denen starke Reize für den Taucherreflex bestehen, wie „abgedunkelte Maske“, „Tauchen ohne Maske“ sowie Kälte und Dunkelheit beim Freiwassertauchgang.

In diversen Studien wurde bei akuter körperlicher Belastung eine Abnahme der absoluten Werte der LF und HF beobachtet (27) (28) (45,46) (47). Eine solche Abnahme zeigte sich ebenfalls in der vorgelegten Studie bei den pre-dive LF- und HF-Werten im Vergleich zum Ruhewert. Das pre-dive-EKG wurde während des Anlegens der ca. 25kg schweren Tauchausrüstung sowie während des Laufens mit kompletter Tauchausrüstung zum See abgeleitet.

#### 4.3. Luftverbrauchsanalyse

Beim absoluten Luftverbrauch zeigten sich jeweils bei beiden Versuchsgruppen signifikante Änderungen zwischen den knienden und den bewegten Versuchsabschnitten. Dies ist dem allgemein erhöhten Luftbedarf bei Bewegung zuzuschreiben. Der signifikante Mehrverbrauch an Luft beim Freiwassertauchgang ist auf den erhöhten Umgebungsdruck zurückzuführen, da hier ein Umgebungsdruck von bis zu 2,5 bar (in 15m Tiefe), im Schwimmbad hingegen ein Umgebungsdruck von ca. 1,4 bar (4m Tiefe) herrschte. Das Drucklufttauchgerät liefert dem Taucher stets an den Umgebungsdruck adaptierte Atemluft. Der Luftverbrauch war also zeitweise druckbedingt im Freiwasser (bei 15m Tiefe) gegenüber dem Schwimmbad (4m Tiefe) um 78% erhöht.

Die signifikante Änderung des absoluten Luftverbrauchs der einzelnen Tauchgänge ist durch die unterschiedliche Dauer der einzelnen Tauchgänge bzw. die höhere Tiefe beim Freiwasser zurückzuführen. Somit ist ein Vergleich des absoluten Luftverbrauchs der einzelnen Abschnitte nicht sinnvoll. Bei der Analyse des absoluten Luftverbrauchs ist es daher nur sinnvoll, die Werte der Anfänger mit denen der Fortgeschrittenen zu vergleichen.

Die fortgeschrittenen Taucher verbrauchten beim „Tauchen im Kreis“ weniger Luft als die Anfänger. In der zweiten Hälfte dieses Versuchsabschnitts war dieser Unterschied signifikant. Wie die HR und HRV Werte spiegelt der niedrigere Luftverbrauch im bewegten Versuchsabschnitt die effizientere Bewegungsweise der Fortgeschrittenen wider, da weniger Anstrengung mit weniger Luftbedarf einhergeht.

Da die Anfänger beim Versuchsabschnitt „Tauchen mit abgedunkelter Maske“ nicht mehr Luft verbrauchten als die Fortgeschrittenen, könnte sich die bei den HRV-Werten erörterte Parasympathikusaktivierung auch im Luftverbrauch widerspiegelt haben. Der erhöhte Luftverbrauch der Anfänger im Freiwasser scheint zum einen wie beim „Tauchen im Kreis“ daran zu liegen, dass sie schlecht tariert waren und sich ineffizienter bewegten. Ein weiterer Grund für den höheren Luftverbrauch könnte sein, dass die Anfänger sich noch nicht so gut an die Atmung durch den Atemregler gewöhnt hatten und dadurch öfter Luft holten. Ferner könnte auch ein sogenanntes CO<sub>2</sub> Retainment der Fortgeschrittenen für den geringeren Luftverbrauch mitverantwortlich gewesen sein. Hierbei handelt es sich um eine Gewöhnung an erhöhte CO<sub>2</sub> Partialdrücke im Blut. Der durch den erhöhten CO<sub>2</sub> Partialdruck ausgelöste Atemreiz (48) setzt erst später ein, somit kann der erhöhte O<sub>2</sub> Partialdruck genutzt werden und die Atmung verlangsamt sich (49) (50).

Eine differenziertere Betrachtung erlaubt der Vergleich der Durchschnittsluftverbrauchswerte, da diese umgebungsdruckkorrigierte Atemminutenvolumina (AMV) sind und somit unabhängig von der Tauchgangsdauer und -tiefe.

Die Anfänger wiesen beim 2. Hallenbadtauchgang ein signifikant niedrigeres Durchschnitts-AMV auf als beim 1. Tauchgang. Bei den Fortgeschrittenen ist hier kein signifikanter Unterschied zu verzeichnen. Beim 2. Hallenbadtauchgang wurde mit „abgedunkelter Maske“ und „ohne Maske“ getaucht, außerdem war die Versuchssituation bereits vertraut. Hier zeigte sich bei der Atmung der gleiche Trend wie bei der HRV, und auch das niedrigere AMV deutet besonders bei den Anfängern auf eine erhöhte Aktivität des Parasympathikus hin.

Im Freiwasser wiesen sowohl die Anfänger als auch die Fortgeschrittenen ein deutlich höheres AMV als im Hallenbad auf. Von einer wesentlich erhöhten körperlichen Anstrengung ist beim Freiwassertauchgang nicht auszugehen, da im Plöner See keine Strömung herrschte und die Tauchgeschwindigkeit nicht höher war als diejenige beim Tauchen im Kreis in der Halle. Aber Dunkelheit und Kälte im Freiwasser, sowie insbesondere psychischer Stress bei den Anfängern kommen als Erklärung hier in Frage.

Beim maximalen AMV (maxAMV) gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen Anfängern und Fortgeschrittenen. Hier bestanden interindividuell große Unterschiede, wobei das größte gemessene maxAMV bei 95 l/min, das niedrigste bei 19 l/min lag.

#### 4.4. Interpretation der Cortisol-Werte

Speichelcortisol ist ein wissenschaftlich etablierter Wert zur Stresserforschung (18), emotionaler Stress und/ oder Angst führt zu einer Erhöhung des Speichelcortisolwerts (19).

Eine Druckkammerstudie zeigte keine signifikante Abhängigkeit der Cortisolausschüttung vom Umgebungsdruck (51).

Der leichte Abfall der Speichel-Cortisolwerte bei den Hallentauchgängen spricht eher gegen ein Vorhandensein von Stress. Auch das Tauchen mit abgedunkelter Maske bzw. ohne Maske führte zu keiner Erhöhung der Cortisolwerte.

Der beim Freiwassertauchgang beobachtete Anstieg der Cortisolwerte bei den Anfängern könnte einen weiteren Hinweis für psychischen Stress bei diesem Versuchsabschnitt darstellen. Auf Grund der starken individuellen Schwankungen der Messwerte erreichten die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen jedoch kein Signifikanzniveau.

#### 4.5. Interpretation der Chromogranin-A Werte

Chromogranin A wird im Körper in postganglionischen sympathischen Neuronen und adrenalen chromaffinen Zellen zusammen mit Katecholaminen gespeichert und bei der Exozytose von Katecholaminen als Nebenprodukt mit ausgeschüttet (52).

Die Plasma Chromogranin A Konzentration korreliert mit der Noradrenalinausschüttung der Nebenniere (53). Chromogranin A ist auch im Speichel nachweisbar (54) und ist bei Stress erhöht. Ng, Koh et al (22) und Kanamaru et al (20) zeigten einen Anstieg des Speichel Chromogranin A bei Prüfungsstress. Auch bei lärminduziertem Stress ist vermehrt Chromogranin A im Speichel nachweisbar (21). Eine Druckkammerstudie zeigte keine signifikante Abhängigkeit der Chromogranin A Konzentration vom Umgebungsdruck (51).

In der vorgelegten Studie zeigten die Anfänger etwas höhere Werte als die Fortgeschrittenen. Da bereits die Ruhewerte bei den Anfängern höher lagen, kann man davon ausgehen, dass die Anfänger eine etwas höhere psychische Gesamtanspannung aufwiesen. Die Werte der Anfänger veränderten sich im gesamten Versuchsablauf kaum. Bei den Tauchgängen in Dunkelheit, mit direktem Wasser Gesichtskontakt und im Freiwasser lagen die Werte der Anfänger auf annähernd gleichem Niveau wie die der Fortgeschrittenen. Diese Annäherung der Werte kann

man wiederum mit dem bei Anfängern stärker ausgeprägten Taucherreflex diskutieren. Demnach wurde durch den Taucherreflex bei den Anfängern der Sympathikus besonders bei den oben erwähnten Versuchsabschnitten stärker supprimiert, sodass im Verhältnis weniger Adrenalin/ Noradrenalin und somit weniger Chromogranin A ausgeschüttet wurde. Bei den Fortgeschrittenen zeigte sich ein anderes Bild, hier stiegen die Werte bei den Hallenbadtauchgängen an. Dies deutet auf eine geringere Dominanz des Parasympathikus und damit auf einen weniger ausgeprägten Taucherreflex hin, auch wenn die Ergebnisse insgesamt kein Signifikanzniveau erreichten und damit nur Tendenzen aufzeigen konnten.

#### 4.6. Interpretation der Metanephrin Werte

Das bei Stress ausgeschüttete Adrenalin/ Noradrenalin wird vom Körper durch die catechol-o-methyl-transferase (COMT) und die Monoaminoxidase (MAO) inaktiviert und letztendlich zu Metanephrinen und Normetanephrinen metabolisiert. (55).

In diversen Studien zeigte sich eine erhöhte Metanephrin-/ Normetanephrinkonzentration im Urin nach der Exposition von Stress. So zeigten Sakuma et al. (23) eine erhöhte Urin Metanephrin- und Normetanephrinkonzentration bei Kindern nach einem Zahnarztbesuch, Sancini et al. (56) eine erhöhte Metanephrin- und Normetanephrinkonzentration im Urin bei Verkehrspolizisten, die beruflich Großstadtstressoren ausgesetzt waren.

In der vorgelegten Studie ergaben sich bei den Metanephrinen keine nennenswerten Unterschiede zwischen Anfängern und Fortgeschrittenen. Bei beiden Versuchsgruppen zeigte sich kein signifikanter Anstieg bei den Hallenbadtauchgängen. Der Ruhewert lag vor dem Freiwassertauchgang bei Anfängern und Fortgeschrittenen höher als vor den Hallenbadtauchgängen, und stieg auch während des Freiwassertauchganges tendenziell weiter an. Dies lässt sich durch eine erhöhte psychische Grundanspannung vor dem Freiwassertauchgang und durch erhöhte Belastung durch Tragen der Ausrüstung und eine niedrigere Wassertemperatur erklären.

#### 4.7. Fallstudie Panikreaktion

Der Einzelfall, in dem ein Proband in Panik geriet, gibt einen Hinweis auf die Validität der Methodik der vorgelegten Studie.

Der Proband war bereits vor dem Tauchgang aufgeregt. Diese Aufregung spiegelte sich im Speichelcortisol wider. Hier lag der Wert des Probanden deutlich höher als der Durchschnitt der anderen Probanden. Direkt nach dem Tauchgang, im Anschluss an die Panikreaktion,

zeigte sich das Cortisol noch deutlicher erhöht. Die LF/HF Ratio als Indikator für die Sympathikusaktivierung stieg zum Zeitpunkt der Panikreaktion ebenfalls deutlich an.

Durch die in diesem Einzelfall gemessenen Werte lässt sich der vom Versuchsleiter direkt beobachtete erhebliche Stress einer Panikreaktion unter Wasser durch einen Anstieg der LF/HF Ratio im Sinne einer Sympathikusaktivierung und durch einen Anstieg des Speichelcortisols abbilden. Der Herzfrequenzverlauf bestätigt diesen Befund.

Der Anstieg der Stressmarker LF/HF Ratio und Cortisol in diesem extremen Einzelfall lässt sich somit als Indiz für die Aussagekraft dieser Parameter bei der vorgestellten Studie interpretieren.

#### 4.8. Methodenkritik

Die Qualität des EKG-Signals war während der Versuche meist recht gut, die Herzfrequenz des EKGs stimmte mit der Herzfrequenz, welche durch den Galileo Sol<sup>®</sup> Tauchcomputer parallel registriert wurde, überein.

Da bei den verschiedenen Tauchgängen die HF und die LF Komponente gleichzeitig zu- oder abnahmen, scheint die LF/HF Ratio der aussagekräftigste Wert zur Aktivierung des vegetativen Nervensystems beim Tauchen zu sein.

Das Probandenkollektiv war heterogen in Alter, Geschlecht, BMI und Fitnesslevel. Die Anfänger waren jünger als die Fortgeschrittenen. Die HRV könnte durch die Heterogenität des Probandenkollektivs beeinflusst worden sein. Die Rekrutierung der Probanden in der untersuchten Menge stellte sich jedoch als äußerst schwierig dar; es war nicht möglich, ein homogenes Probandenkollektiv in der untersuchten Größe zu finden, welches zudem in Anfänger und Fortgeschrittene unterteilbar gewesen wäre.

Die Atmung der Probanden könnte einen Einfluss auf die HRV gehabt haben. In Studien wurde gezeigt, dass es bei einer Verlangsamung der Atemfrequenz zu einem Shift von Teilen der HF Komponente in LF Komponente kommen kann (3), (11). Somit wäre eine Kontrolle der Atemfrequenz für eine genaue Analyse der HRV sinnvoll gewesen, war aber für reale Presslufttauchgänge und insbesondere Freiwassertauchgänge nicht realisierbar.



#### 4.9. Fazit

Der Taucherreflex hat einen starken Einfluss auf den Taucher und scheint mit einer Parasympathikusaktivierung einherzugehen. Obwohl beim Tauchen sowohl Sympathikus, als auch Parasympathikus aktiviert werden, scheint der Parasympathikus beim Tauchen zu dominieren. Besonders ausgeprägt ist dieses Phänomen bei den Tauchanfängern. Dies legt den Verdacht einer Habituation der Fortgeschrittenen an den Taucherreflex nahe.

Die stärkste parasympathische Aktivität zeigte sich beim „Tauchen mit abgedunkelter Maske“, beim „Tauchen ohne Maske“ und beim Freiwassertauchgang und spiegelte sich in nahezu allen HRV-Werten und im Luftverbrauch wider. Somit scheinen direkter Wasserkontakt mit der Gesichtshaut, Dunkelheit und kaltes Wasser starke parasympathische Reize darzustellen.

Sicher durchgeführtes Gerätetauchen insgesamt, sowie die zunächst als Stressoren angenommenen Versuchsabschnitte „Tauchen im Freiwasser“, „Tauchen mit abgedunkelter Maske“ und „Tauchen ohne Maske“ scheint weder beim Anfänger, noch beim Fortgeschrittenen über die normale moderate körperliche Belastung hinaus relevanten Stress auszulösen, solange keine Panik auftritt. Stattdessen scheint zumindest in der Analyse der Herzfrequenzvariabilität der Einfluss des Parasympathikus gegenüber dem Sympathikus zu dominieren, was für eine besonders bei Anfängern erhebliche Rolle des Tauchreflexes spricht. Interessant bleibt hier die teilweise Diskrepanz zwischen Herzfrequenzprofil, Aktivierung der Atmung und Anstieg auch der Cortisolwerte sowie den beobachteten Änderungen der LF/HF Ratio, was auf eine sehr komplexe Steuerung des Vegetativen Nervensystems hinweist.

Aus tauchmedizinischer Sicht könnte die erhöhte parasympathische Aktivität beim Tauchen bei Personen mit Hypotonie, orthostatischer Dysregulation, synkopaler Neigung oder Bradykardie unter Umständen zuzüglich zur bereits vorhandenen Risikokonstellation einen weiteren Risikofaktor darstellen und zu Komplikationen wie Benommenheit oder gar kritischem Bewusstseinsverlust beitragen.

Ein besonderes Risiko für diese Komplikationen könnte nach den vorliegenden Ergebnissen bei Tauchanfängern mit diesen Risikofaktoren bei dunklen Kaltwassertauchgängen unterhalb der Sprungschicht vorliegen. Ein Verlust der Tauchermaske, wie es bei Gruppentauchgängen z.B. durch ein „Abschlagen“ wegen Unachtsamkeit des Voraustauchenden kommen kann, könnte dann über den zusätzlichen Kältereiz im Gesicht den Auslöser einer Komplikation darstellen.

## 5. Zusammenfassung

Sporttauchen gewinnt zunehmend an Popularität. Es hat sich von einer Nischensportart zu einer Breitensportart aller möglicher Altersklassen entwickelt. Die vorgelegte Studie untersuchte die Sympathikus-/ Parasympathikusaktivierung beim Presslufttauchen. Durch die Untersuchung der Aktivität des vegetativen Nervensystems sollten der Taucherreflex, sowie der Stress beim Tauchen untersucht werden. In der Studie wurden Tauchanfänger mit fortgeschrittenen Tauchern verglichen. Die Probanden absolvierten zwei Hallenbadtauchgänge in der Universitätsschwimmhalle in Kiel und einen Freiwassertauchgang im Plöner See. Der erste Hallenbadtauchgang bestand aus „Knien unter Wasser“ und „Tauchen im Kreis“. Der zweite Hallenbadtauchgang bestand aus „Knien unter Wasser mit abgedunkelter Maske“, „Tauchen im Kreis mit abgedunkelter Maske“ und „Tauchen im Kreis ohne Maske“. Der Freiwassertauchgang fand im Plöner See auf 15m Tiefe bei 10°C Wassertemperatur statt. Tauchen mit „abgedunkelter Maske“ und „ohne Maske“ wurde als Stressor angenommen.

Während aller Tauchgänge wurde ein Langzeit EKG aufgezeichnet, aus welchem die Aktivität des Sympathikus und Parasympathikus mittels Herzfrequenzvariabilitätsanalyse (HRV) ermittelt wurde. Bei der HRV unterscheidet man eine hochfrequente (HF) von einer niederfrequenten (LF) Komponente, wobei die HF eher den Parasympathikus und die LF eher den Sympathikus abbildet. Die LF/HF Ratio ist somit ein Indikator für den Shift in Richtung Sympathikus bzw. Parasympathikus. Als Vergleichswert wurde vor den Hallenbadtauchgängen ein Ruhe EKG im Sitzen mit HRV-Analyse abgeleitet. Des Weiteren wurden vor und nach den Tauchgängen Urin- und Speichelproben zur Bestimmung der Stressmarker Cortisol, Chromogranin A und Metanephrine abgegeben.

Beim „Knien unter Wasser“ zeigte sich bei beiden Versuchsgruppen ein Anstieg der LF und noch ausgeprägter der HF. Bei den Anfängern lag die LF/HF Ratio signifikant niedriger als bei den Fortgeschrittenen. Somit scheinen beim Tauchen sowohl der Sympathikus als auch der Parasympathikus aktiviert zu werden, wobei der Parasympathikus dominiert. Letzterer wird wahrscheinlich durch den Taucherreflex aktiviert.

Beim „Tauchen mit abgedunkelter Maske“, „Tauchen ohne Maske“ und im Freiwassertauchgang zeigten sich die niedrigsten LF/HF Werte, und auch die Cortisol-, Chromogranin-A- und Metanephrinwerte änderten sich im Vergleich zum Ruhewert nicht signifikant. Somit stellten diese Tauchabschnitte entgegen den Erwartungen keinen wesentlichen messbaren Stress dar. Stattdessen scheinen Dunkelheit, direkter Kontakt der Gesichtshaut mit Wasser und Kälte

parasympathische Reize darzustellen, die die physiologische Sympathikusaktivierung überlagern und Teil des Taucherreflexes sind.

Bei den Anfängern lagen bei den Abschnitten mit starken parasympathischen Reizen die LF/HF Werte signifikant niedriger als die der Fortgeschrittenen. Somit scheint die parasympathische Aktivierung bei den Anfängern deutlich ausgeprägter als bei den Fortgeschrittenen zu sein. Dies lässt vermuten, dass mit zunehmender Taucherfahrung eine Habituation an den Taucherreflex eintritt.

## 6. Literaturverzeichnis

1. Bennett P. DAN, sport diving accidents and death in the USA. *Acta Anaesth Italica*. 1991;(42):129–99.
2. Biersner RJ, Larocco JM. Personality and demographic variables related to individual responsiveness to diving stress. *Undersea Biomed Res*. 1987 Jan;14(1):67–73.
3. Schipke JD, Pelzer M. Effect of immersion, submersion, and scuba diving on heart rate variability. *Br J Sports Med*. 2001 Jun;35(3):174–80.
4. Bert P. *Lecons sur la Physiologie*. 1870;544.
5. Schagatay E, Andersson J. Diving response and apneic time in humans. 1998;25(1): 13–9.
6. Hong SK, Moore TO, Seto G, Park HK, Hiatt WR, Bernauer EM. Lung volumes and apneic bradycardia in divers. *J Appl Physiol*. 1970 Aug;29(2):172–6.
7. Moore TO, Lin YC, Lally DA, Hong SK. Effects of temperature, immersion, and ambient pressure on human apneic bradycardia. *J Appl Physiol*. 1972 Jul;33(1):36–41.
8. Malliani A, Pagani M, Lombardi F, Cerutti S. Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain. *Circulation*. 1991 Aug;84(2):482–92.
9. Aaslid R, Brubakk AO. [Dynamic pressure-flow states in the human aorta]. *Verh Dtsch Ges Kreislaufforsch*. 1974;40:154–8.
10. Stauss HM, Persson PB. Cardiovascular variability and the autonomic nervous system. *J Hypertens*. 2006 Sep;24(9):1902–5.
11. Malik M, Bigger JT, Camm AJ, Kleiger RE, Malliani A, Moss AJ, et al. Heart rate variability. *European Heart Journal*. 1996 März;17(3):354 –381.
12. Højgaard MV, Holstein-Rathlou NH, Agner E, Kanters JK. Dynamics of spectral components of heart rate variability during changes in autonomic balance. *Am J Physiol*. 1998 Jul;275(1 Pt 2):H213–219.
13. Akselrod S, Gordon D, Ubel FA, Shannon DC, Berger AC, Cohen RJ. Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control. *Science*. 1981 Jul 10;213(4504):220–2.
14. Pomeranz B, Macaulay RJ, Caudill MA, Kutz I, Adam D, Gordon D, et al. Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis. *Am J Physiol*. 1985 Jan;248(1 Pt 2):H151–153.
15. Kamath MV, Fallen EL. Power spectral analysis of heart rate variability: a noninvasive signature of cardiac autonomic function. *Crit Rev Biomed Eng*. 1993;21(3):245–311.

16. Montano N, Ruscone TG, Porta A, Lombardi F, Pagani M, Malliani A. Power spectrum analysis of heart rate variability to assess the changes in sympathovagal balance during graded orthostatic tilt. *Circulation*. 1994 Oct;90(4):1826–31.
17. Appel ML, Berger RD, Saul JP, Smith JM, Cohen RJ. Beat to beat variability in cardiovascular variables: noise or music? *J Am Coll Cardiol*. 1989 Nov 1;14(5):1139–48.
18. Hellhammer DH, Wüst S, Kudielka BM. Salivary cortisol as a biomarker in stress research. *Psychoneuroendocrinology*. 2009 Feb;34(2):163–71.
19. Hubert W, de Jong-Meyer R. Emotional stress and saliva cortisol response. *J Clin Chem Clin Biochem*. 1989 Apr;27(4):235–7.
20. Kanamaru Y, Kikukawa A, Shimamura K. Salivary chromogranin-A as a marker of psychological stress during a cognitive test battery in humans. *Stress*. 2006 Sep;9(3):127–31.
21. Miyakawa M, Matsui T, Kishikawa H, Murayama R, Uchiyama I, Itoh T, et al. Salivary chromogranin A as a measure of stress response to noise. *Noise Health*. 2006 Sep;8(32):108–13.
22. Ng V, Koh D, Mok BYY, Chia S-E, Lim L-P. Salivary biomarkers associated with academic assessment stress among dental undergraduates. *J Dent Educ*. 2003 Oct;67(10):1091–4.
23. Sakuma N, Nagasaka N. Changes in urinary excretion of catecholamines and their metabolites in pediatric dental patients. *ASDC J Dent Child*. 1996 Apr;63(2):118–22.
24. Roberts N, Higgins G, Sargazi M. A study on stability of urinary free catecholamines and free methyl-derivatives at different pH, temperature and time of storage. *Clin Chem Lab Med*. 2010;48(1): 81–7.
25. Hamming R. Coding and information theory. 5th ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall; 1980.
26. Schagatay E, Andersson J. Diving response and apneic time in humans. 1998;25(1): 13–9.
27. Arai Y, Saul JP, Albrecht P, Hartley LH, Lilly LS, Cohen RJ, et al. Modulation of cardiac autonomic activity during and immediately after exercise. *Am J Physiol*. 1989 Jan;256(1 Pt 2):H132–141.
28. Cottin F, Papelier Y, Escourrou P. Effects of exercise load and breathing frequency on heart rate and blood pressure variability during dynamic exercise. *Int J Sports Med*. 1999 May;20(4):232–8.
29. Goldberger JJ, Le FK, Lahiri M, Kannankeril PJ, Ng J, Kadish AH. Assessment of parasympathetic reactivation after exercise. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2006 Jun;290(6):H2446–2452.
30. Gooden BA. Mechanism of the human diving response. *Integr Physiol Behav Sci*. 1994 Mar;29(1):6–16.

31. Dutschmann M, Paton JFR. Influence of nasotrigeminal afferents on medullary respiratory neurones and upper airway patency in the rat. *Pflugers Arch.* 2002 May;444(1-2):227–35.
32. Lin YC. Autonomic nervous control of cardiovascular response during diving in the rat. *Am J Physiol.* 1974 Sep;227(3):601–5.
33. Panneton WM, Gan Q, Juric R. The rat: a laboratory model for studies of the diving response. *J Appl Physiol.* 2010 Apr;108(4):811–20.
34. Rybka EJ, McCulloch PF. The anterior ethmoidal nerve is necessary for the initiation of the nasopharyngeal response in the rat. *Brain Res.* 2006 Feb 23;1075(1):122–32.
35. Jalife J, Michaels D. Neural control of sinoatrial pacemaker activity. In: Levy MN, Schwartz PJ, eds. *Vagal Control of the Heart: Experimental Basis and Clinical Implications.* 1994;173–205.
36. Sakmann B, Noma A, Trautwein W. Acetylcholine activation of single muscarinic K<sup>+</sup> channels in isolated pacemaker cells of mammalian heart. 1983;303: 250–3.
37. Brown HF, DiFrancesco D, Noble SJ. How does adrenaline accelerate the heart? *Nature.* 1979 Jul 19;280(5719):235–6.
38. Gabbott GR, Jones DR. Habituation of the cardiac response to involuntary diving in diving and dabbling ducks. *J Exp Biol.* 1987 Sep;131:403–15.
39. Ikeda N, Yasu T, Tsuboi K, Sugawara Y, Kubo N, Umemoto T, et al. Effects of submaximal exercise on blood rheology and sympathetic nerve activity. *Circ J.* 2010 Apr;74(4):730–4.
40. Lund V, Kentala E, Scheinin H, Klossner J, Sariola-Heinonen K, Jalonen J. Hyperbaric oxygen increases parasympathetic activity in professional divers. 2000 Sep;170(1): 39–44.
41. Barbosa E, García-Manso JM, Martín-González JM, Sarmiento S, Calderón FJ, Da Silva-Grigoletto ME. Effect of hyperbaric pressure during scuba diving on autonomic modulation of the cardiac response: application of the continuous wavelet transform to the analysis of heart rate variability. *Mil Med.* 2010 Jan;175(1):61–4.
42. Kawakami Y, Natelson BH, DuBois AR. Cardiovascular effects of face immersion and factors affecting diving reflex in man. *J Appl Physiol.* 1967 Dec;23(6):964–70.
43. Hahn A, Scholz G, Grothe C, Schulze S. Herzfrequenzverhalten und Herzfrequenzvariabilität während der Immersion. 2009;288–92.
44. Perini R, Veicsteinas A. Heart rate variability and autonomic activity at rest and during exercise in various physiological conditions. *Eur J Appl Physiol.* 2003 Oct;90(3-4):317–25.
45. Shin K, Minamitani H, Onishi S, Yamazaki H, Lee M. The power spectral analysis of heart rate variability in athletes during dynamic exercise--Part I. *Clin Cardiol.* 1995 Oct;18(10):583–6.

46. Shin K, Minamitani H, Onishi S, Yamazaki H, Lee M. The power spectral analysis of heart rate variability in athletes during dynamic exercise--Part II. *Clin Cardiol.* 1995 Nov;18(11):664–8.
47. Bartels MN, Jelic S, Ngai P, Gates G, Newandee D, Reisman SS, et al. The effect of ventilation on spectral analysis of heart rate and blood pressure variability during exercise. *Respir Physiol Neurobiol.* 2004 Nov 30;144(1):91–8.
48. Bussotti M, Magrì D, Previtali E, Farina S, Torri A, Maturri M, et al. End-tidal pressure of CO<sub>2</sub> and exercise performance in healthy subjects. *Eur J Appl Physiol.* 2008 Aug;103(6):727–32.
49. Koch AE, Koch I, Kowalski J, Schipke JD, Winkler BE, Deuschl G, et al. Physical exercise might influence the risk of oxygen-induced acute neurotoxicity. *Undersea Hyperb Med.* 2013 Apr;40(2):155–63.
50. Moon RE, Cherry AD, Stolp BW, Camporesi EM. Pulmonary gas exchange in diving. *J Appl Physiol.* 2009 Feb;106(2):668–77.
51. Hirayanagi K, Nakabayashi K, Okonogi K, Ohiwa H. Autonomic nervous activity and stress hormones induced by hyperbaric saturation diving. *Undersea & Hyperbaric Medicine: Journal of the Undersea and Hyperbaric Medical Society, Inc.* 2003;(30):47–55.
52. Takiyuddin M, Brown M, Dinh T, Cervenka J, Braun S, Parmer R, et al. Sympathoadrenal secretion in humans: factors governing catecholamin and storage vesicle peptide co-release. *J Auton Pharmacol.* 1994 Jun;14(3): 187–200.
53. Dimsdale JE, O'Connor DT, Ziegler M, Mills P. Chromogranin A correlates with norepinephrine release rate. *Life Sci.* 1992;51(7):519–25.
54. Nagasawa S, Nishikawa Y, Li J, Futai Y, Kanno T, Iguchi K. Simple enzyme immunoassay for the measurement of immunoreactive chromogranin A in human plasma, urine and saliva. *Biomed Res.* 1998;(19):407–10.
55. Goldstein DS, Eisenhofer G, Kopin IJ. Sources and significance of plasma levels of catechols and their metabolites in humans. *J Pharmacol Exp Ther.* 2003 Jun;305(3):800–11.
56. Sancini A, Tomei G, Ciarrocca M, Pimpinella B, Samperi I, Fiaschetti M, et al. Professional exposure to urban stressors and effects on urinary metanephrines. *Toxicol Ind Health.* 2011 May;27(4):349–55.

## 7. Anhang

### I. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: DES (discrete event series) .....	11
Abb. 2: Spektrogramm .....	12
Abb. 3: Herzfrequenzprofil .....	20
Abb. 4: Herzfrequenzabweichung vom Ruhewert .....	21
Abb. 5: Mittlere NN .....	22
Abb. 6: pNN50% .....	23
Abb. 7: RMSSD .....	24
Abb. 8: Standardabweichung der NN-Abstände .....	25
Abb. 9: LF/HF Ratio .....	26
Abb. 10: LF/HF Abweichung vom Ruhewert .....	27
Abb. 11: LF/HF Abweichung Freiwassertauchgang vom pre dive-Wert .....	28
Abb. 12: LF .....	28
Abb. 13: HF .....	30
Abb. 14: Luftverbrauch absolut .....	31
Abb. 15: Absoluter Luftverbrauch der einzelnen Versuchsabschnitte .....	32
Abb. 16: Durchschnittsluftverbrauch .....	34
Abb. 17: Maximaler Luftverbrauch .....	35
Abb. 18: Speichelcortisol .....	35
Abb. 19: Chromogranin A .....	36
Abb. 20: Metanephrine .....	37
Abb. 21: Einzelfall: Panik .....	38

### II. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Mittlere NN Abweichung vom Ruhewert .....	22
Tab. 2: Abweichung der LF vom Ruhewert .....	29
Tab. 3: Abweichung der HF vom Ruhewert .....	30
Tab. 4: Absoluter Luftverbrauch .....	33

### III. Bilderverzeichnis

Bild 1: Taucher mit Langzeit EKG .....	7
Bild 2: Plöner See .....	9



#### IV. Verwendete Chemikalien

- $\beta$ -hCG-Teststreifen (Firma Diagnostik Nord, Deutschland)
- Chromogranin A ELISA KIT (Firma Blue Gene, China)
- Cortisol ELISA KIT (Firma DRG Diagnostics, USA)
- Essigsäure  $C_2H_4O_2$  (Firma Merck, Deutschland)
- HPLC Komplett KIT ClinRep<sup>®</sup> (Firma Recipe, Deutschland)
- Natriumhydroxid NaOH (Firma Merck, Deutschland)

## Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn PD Dr. med. Andreas Koch für die freundliche Überlassung des Themas bedanken. Darüber hinaus möchte ich mich bei ihm für die hilfreiche Unterstützung, bei Planung und Durchführung der Arbeit und für seine Bereitschaft jederzeit bei Fragen mit seiner kompetenten Beratung zur Verfügung zu stehen, bedanken.

Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Dr. rer. nat. Wataru Kähler. Ihm sei gedankt für die Zurverfügungstellung des Labors und für seinen wertvollen kompetenten Rat. Vielen Dank für seine Unterstützung, mit der er jederzeit, auch an Wochenenden, zur Seite stand.

Weiter sei Frau Anke Gruschwitz gedankt, die mich mit ihrer großen Erfahrung bei der Laborarbeit unterstützte. Besonderer Dank gilt ihrer Bereitschaft, mich bei der Laborarbeit außerhalb ihrer Dienstzeiten, spät abends oder an Wochenenden, zu unterstützen.

Vielen Dank auch an Herrn Hubert Kraus und der Tauchsportgruppe der sportwissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel für die freundliche Zurverfügungstellung der Tauchausrüstung und der Universitätsschwimmhalle. Besonders gedankt sei Herrn Hubert Kraus für die Hilfe bei der Probandensuche.

Bedanken möchte ich mich nicht zuletzt auch bei allen Probanden für die Teilnahme an der Studie.

# Curriculum vitae

## Persönliche Daten

Name: Florian Rehner  
Geburtsdaten: 12.02.1982 in Pegnitz

## Schulbildung

1988 – 1992 Grundschule Heinersreuth/ Altenplos  
1992 – 2001 Graf Münster Gymnasium Bayreuth  
2001 Abitur

## Zivildienst

2001 – 2002 Behindertenfahrdienst BRK-Bayreuth

## Berufsausbildung und Berufstätigkeit

2002 – 2003 ASB Rettungsdienstfachschiule Lauf a.d. Pegnitz  
2003 – 2004 Praktischer Ausbildungsabschnitt zum Rettungs-  
assistent BRK-Bayreuth  
2004 Abschluss als Rettungsassistent  
2004 – 2005 Ausbildung zum Tauchlehrer Phuket/ Thailand  
2005 Arbeit als Tauchlehrer Phuket/ Thailand  
Seit Januar 2013 Assistenzarzt in Weiterbildung zum FA für  
Allgemeinmedizin/ Klinikum Bayreuth

## Studium

2006 – 2008 Vorklinik Universität zu Kiel  
2008 1. Staatsexamen  
2008 – 2011 Klinischer Studienabschnitt Universitätsklinikum Kiel  
2011 – 2012 Praktisches Jahr  
1. Tertial Chirurgie Städtisches Krankenhaus Kiel  
2. Tertial Innere Medizin UKSH Kiel  
3. Tertial Orthopädie Helios Ostseeklinik Damp  
Oktober 2012 2. Staatsexamen und Approbation als Arzt  
2009 – 2013 Doktorand am Schiffahrtsmedizinischen Institut Kiel

Ergebnisse der Arbeit wurden auf folgenden Kongressen vorgestellt:

HEARTRATE VARIABILITY (HRV) DURING SCUBA DIVING WITH COMPRESSED AIR.  
A COMPARISON BETWEEN SWIMMING POOL AND OPEN WATER DIVING.

*Rehner F., Kähler W., Koch I., Schipke J., Kowalski J., Koch A.*

Posterpräsentation: EUBS (European Underwater and Baromedical Society)

Jahrestagung 2011; Gdansk, Polen

HERZFREQUENZVARIABILITÄT (HRV) BEIM TAUCHEN MIT PRESSLUFT.  
EIN VERGLEICH ZWISCHEN SCHWIMMBADBEDINGUNGEN UND REALEN FREIWA-  
SERBEDINGUNGEN:

F. Rehner, W. Kähler, I. Koch, T. Wunderlich, J. Kowalski, S. Röttger, A. Koch

Posterpräsentation: 42. Deutscher Sportärztekongress 2011;

Frankfurt am Main, Deutschland