

Aus der Augenklinik Herzog Carl Theodor

Vorstand: Prof. Dr. Christos Haritoglou

**Tonometrie und Pachymetrie  
zur Erfassung der Augeninnendruckschwankungen  
beim SCUBA-Tauchen**

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin

an der Medizinischen Fakultät der

Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von

Hanne Huber,  
geb. Doblanzki

aus Göttingen

2021

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. Christos Haritoglou

Mitberichterstatter: Prof. Dr. Stylianos Michalakis

Mitbetreuung durch die  
promovierte Mitarbeiterin: Dr. Anne-Kathrin Brebeck

Dekan: Prof. Dr. med. dent. Reinhard HICKEL

Tag der mündlichen Prüfung: 15.07.2021

# Eidesstaatliche Versicherung

Hanne Huber, geb. Doblanki

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

**Tonometrie und Pachymetrie  
zur Erfassung der Augeninnendruckschwankungen  
beim SCUBA-Tauchen**

selbstständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

*Erding, 02.08.2021*.....

Ort, Datum

*Hanne Huber*.....

Hanne Huber

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Glaukom .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Definition .....	1
1.1.2 Intraokularer Druck.....	3
1.1.3 Einteilung des Glaukoms.....	5
1.1.3.1 Primäre Glaukome .....	6
1.1.3.2 Sekundäre Glaukome .....	8
1.1.4 Glaukom als Volkskrankheit .....	9
<b>1.2 Tauchen mit Gerät .....</b>	<b>13</b>
1.2.1 Kurzer Überblick über die Geschichte des Tauchens.....	13
1.2.2 Physik und Physiologie des Tauchens .....	14
1.2.2.1 Hydrostatischer Druck.....	14
1.2.2.2 Gasgesetze.....	14
1.2.2.2.1 Gesetz von Boyle und Mariotte.....	14
1.2.2.2.2 Gesetz von Dalton.....	15
1.2.2.2.3 Gesetz von Henry.....	16
1.2.3 Atemgasbedingte Komplikationen beim Tauchen .....	17
1.2.3.1 Komplikationen durch Stickstoff .....	18
1.2.3.1.1 Tiefenrausch .....	18
1.2.3.1.2 Dekompressionskrankheit .....	20
1.2.3.1.3 Dekompressionskrankheit des Auges.....	22
1.2.3.2 Komplikationen durch Sauerstoff .....	23
1.2.3.3 Komplikationen durch Kohlenstoffdioxid .....	24
1.2.4 Druckbedingte Komplikationen .....	25

---

1.2.4.1	Dekompressionsbedingtes Barotrauma (Überdruckbarotrauma)	25
1.2.4.2	Kompressionsbedingtes Barotrauma (Unterdruckbarotrauma)	26
1.2.4.3	Barotrauma des Auges	27
<b>1.3</b>	<b>Ziel der Studie</b>	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>Teilnehmer, Material und Methoden</b>	<b>30</b>
<b>2.1</b>	<b>Teilnehmer</b>	<b>30</b>
2.1.1	Rekrutierung	30
2.1.2	Ein- und Ausschlusskriterien	31
2.1.3	Tauchgänge	31
<b>2.2</b>	<b>Ophthalmologische Messungen</b>	<b>32</b>
2.2.1	Messung der Hornhautdicke (Pachymetrie)	32
2.2.2	Messung des Augeninnendrucks (Tonometrie)	33
2.2.3	Messungen des linken Auges	36
<b>2.3</b>	<b>Datenerfassung</b>	<b>36</b>
2.3.1	Soziodemographische Daten	36
2.3.2	Pseudonymisierung der Daten	37
<b>2.4</b>	<b>Statistik</b>	<b>38</b>
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Allgemeine deskriptive Analyse</b>	<b>39</b>
3.1.1	Geschlechter- und Altersverteilung der Teilnehmer	39
3.1.2	Anamnesebogen	39
3.1.3	Tageszeiten der Tauchgänge	40
3.1.4	Interindividuelle Schwankungen des Augeninnendrucks	42
3.1.5	Intraindividuelle Schwankungen des Augeninnendrucks	44
<b>3.2</b>	<b>Vergleich des Augeninnendrucks vor und nach dem Tauchen</b>	<b>46</b>
3.2.1	Deskriptive Analyse	47
3.2.2	Nicht-parametrische Tests	50
<b>3.3</b>	<b>Überprüfen weiterer Einflussfaktoren</b>	<b>52</b>

---

3.3.1	Deskriptive Analyse .....	52
3.3.2	Korrelationen .....	56
3.3.2.1	Korrelation mit verschiedenen Einflussfaktoren .....	57
3.3.2.2	Subgruppenanalyse: Korrelation mit Tauchdauer und -tiefe .....	59
<b>3.4</b>	<b>Linkes Auge .....</b>	<b>60</b>
<b>4</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>62</b>
<b>4.1</b>	<b>Repräsentativität der Studie .....</b>	<b>62</b>
4.1.1	Studienpopulation.....	62
4.1.2	Pachymetrie .....	62
4.1.3	Rebound-Tonometrie.....	62
<b>4.2</b>	<b>Limitationen der Studie .....</b>	<b>63</b>
4.2.1	Stichprobengröße.....	63
4.2.2	Zeitpunkte der Messungen des Augeninnendrucks.....	63
4.2.3	Tageszeitliche Schwankungen .....	64
4.2.4	Einschränkung der signifikanten Korrelationen .....	64
<b>4.3</b>	<b>Aktuelle Studienlage.....</b>	<b>65</b>
4.3.1	Effekt von Schwimmbrillen oder Tauchermasken.....	69
4.3.2	Effekt des erhöhten Sauerstoffpartialdrucks.....	70
4.3.3	Effekt von Herzfrequenz, Blutdruck und körperlicher Belastung.....	71
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>76</b>
<b>7</b>	<b>Danksagung .....</b>	<b>87</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Normales Gesichtsfeld.....	2
Abbildung 2:	Eingeschränktes Gesichtsfeld im frühen Glaukomstadium .....	2
Abbildung 3:	Sehr stark eingeschränktes Gesichtsfeld im fortgeschrittenen Glaukomstadium.....	2
Abbildung 4:	Abfluss des Kammerwassers.....	3
Abbildung 5:	Tagesdruckkurve beider Augen eines Glaukom-Patienten .....	6
Abbildung 6:	Volumenveränderungen nach dem Boyle-Mariotte-Gesetz.....	15
Abbildung 7:	Gasgesetz von Henry .....	17
Abbildung 8:	Auf- und Entsättigung verschiedener Körperkompartimente bei einem 25-m-Tauchgang mit einer Grundzeit von 25 min.....	21
Abbildung 9:	Toxizität von hyperbarem Sauerstoff auf ZNS und Lunge in Ab- hängigkeit von $pO_2$ und Expositionszeit.....	24
Abbildung 10:	Folgen der Überdehnung der Lunge im Rahmen der Dekom- pressionskrankheit.....	26
Abbildung 11:	Schematische Darstellung eines Unterdruckbarotraumas.....	27
Abbildung 12:	Hyposphagma.....	28
Abbildung 13:	Schematische Darstellung eines Tauchprofils mit den wichtigsten Veränderungen und jeweiligen Leiterkrankungen und Unfall- mechanismen .....	29
Abbildung 14	Durchführung der Tonometrie auf dem Tauch-Boot („Diving Dony“) .....	35
Abbildung 15:	Häufigkeit der unterschiedlichen Tageszeiten aller Tauchgänge.....	41
Abbildung 16:	Punktdiagramm der Verteilung des Augeninnendrucks vor und nach dem Tauchgang .....	42
Abbildung 17:	Boxplot zur Darstellung des Augeninnendrucks vor und nach den einzelnen Tauchgängen.....	49
Abbildung 18:	Entwicklung des Augeninnendrucks vor und nach den einzelnen Tauchgängen.....	49
Abbildung 19:	Gewichtsverteilung nach BMI.....	53
Abbildung 20:	Häufigkeitsverteilung der Hornhautdicke des rechten Auges .....	53
Abbildung 21:	Häufigkeitsverteilung der Anzahl der Tauchgänge.....	54
Abbildung 22:	Häufigkeitsverteilung der Anzahl der Tauchjahre.....	55

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Glaukomformen.....	9
Tabelle 2:	Projektionen für Disability Adjusted Life Years (DALYs) in Europa 2008-2030 für verschiedene Krankheiten .....	12
Tabelle 3:	Partialdruck von Stickstoff und Sauerstoff in einem Luftgemisch in Abhängigkeit von der Wassertiefe .....	16
Tabelle 4:	Relative narkotische Potenz der wichtigsten Atemgase beim Tauchen ..	18
Tabelle 5:	Symptome einer Stickstoff-Intoxikation abhängig von Tauchtiefe und Partialdruck .....	20
Tabelle 6:	Häufigkeit der unterschiedlichen Tageszeiten bezogen auf die einzelnen Tauchgänge .....	41
Tabelle 7:	Interindividuelle Schwankungen des Augeninnendrucks vor und nach dem Tauchen.....	43
Tabelle 8:	Intraindividuelle Schwankungen des Augeninnendrucks vor und nach dem Tauchen.....	45
Tabelle 9:	Augeninnendruck vor dem Tauchen .....	47
Tabelle 10:	Augeninnendruck nach dem Tauchen .....	48
Tabelle 11:	Verhältnis der Augeninnendrucke vor dem Tauchgang sowie 10, 30 und 60 min nach dem Tauchgang .....	50
Tabelle 12:	Wilcoxon-Vorzeichen-Test zum Vergleich des Augeninnendrucks vor und nach einem Tauchgang .....	51
Tabelle 13:	Zusammenstellung der Einflussfaktoren Größe, Gewicht, BMI und Hornhautdicke des rechten Auges.....	52
Tabelle 14:	Einflussfaktor „Taucherfahrung“: Anzahl der bisher durchgeführten Tauchgänge, Anzahl der Tauchjahre und daraus resultierende durchschnittliche Anzahl der Tauchgänge pro Tauchjahr .....	54
Tabelle 15:	Tauchtiefe der einzelnen Tauchgänge in Meter .....	55
Tabelle 16:	Dauer der einzelnen Tauchgänge in Minuten .....	56
Tabelle 17:	Differenz des Augeninnendrucks vor und nach dem Tauchen.....	57
Tabelle 18:	Korrelation von „Differenz gesamt“ mit Größe, Gewicht, BMI und Hornhautdicke .....	58
Tabelle 19:	Korrelation von „Differenz gesamt“ mit Faktoren der Taucherfahrung ...	58
Tabelle 20:	Korrelation der Differenz des Augeninnendrucks vor und nach dem Tauchen mit Tauchtiefe und -dauer .....	60

---

Tabelle 21: Vergleich aller Mittelwerte zwischen rechtem und linkem Auge.....	61
Tabelle 22: Anzahl der Suchergebnisse bestimmter Begriffe in PubMed.....	66

## Abkürzungsverzeichnis

AGE	arterielle Gasembolie
AMD	altersabhängige Makuladegeneration
BMI	Body Mass Index
°C	Grad Celsius
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DALYs	Disability Adjusted Life Years
DCS	Decompression sickness
dpt	Dioptrie
et al.	et alii
GAT	Applanationstonometrie nach Goldmann
He	Helium
IOD	intraokularer Druck
kg	Kilogramm
kPa	Kilopascal
M.	Musculus
m	Meter
Max	Maximum
mg	Milligramm
MHz	Megahertz
min	Minute(n)
Min	Minimum
mm	Millimeter
mmHg	Millimeter Quecksilbersäule

---

N.	Nervus
N <sub>2</sub>	Stickstoff
N <sub>2</sub> O	Stickstoffmonoxid
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
OHTS	Ocular Hypertension Treatment Study
PADI	Professional Association of Diving Instructors
PBT	pulmonales Barotrauma
RT	Rebound-Tonometrie
SCUBA	Self-Contained Underwater Breathing Apparatus
SD	Standardabweichung
SW	Spannweite
TD	Tauchdauer
TG	Tauchgang
TJ	Tauchjahre
TT	Tauchtiefe
Z.n.	Zustand nach
ZNS	zentrales Nervensystem
µm	Mikrometer

# 1 Einleitung

Gemäß dem demografischen Wandel und der damit steigenden Lebenserwartung nimmt die Häufigkeit von Sehbeeinträchtigungen und Sehbehinderungen in Deutschland zu. Nach den heutigen Erkenntnissen des Berufsverbandes der Augenärzte beträgt die Anzahl sehbehinderter Menschen 1.066.000 und die Anzahl blinder Menschen ca. 164.000 [1].

Augeninnendruckschwankungen führen bei Glaukom-Patienten zu einem Fortschreiten des Nervenfaserverlustes im Bereich des Sehnervenkopfes und damit zu Seh- und Gesichtsfeldverlusten. Das Glaukom wiederum ist die zweithäufigste Ursache einer Erblindung oder einer starken Sehbehinderung in Deutschland [2].

Durch diese Studie soll das Risiko von Glaukom-Patienten mit dem Wunsch zu Tauchen besser einschätzbar werden. Derzeit ist noch nicht sicher geklärt, ob das Tauchen mit *Self-Contained Underwater Breathing Apparatus* (SCUBA) mit einer Progression des Glaukoms vergesellschaftet ist, und ob Glaukom-Patienten durch fortgesetztes Tauchen die Schadensentwicklung forcieren. Diese Studie befasst sich mit dem Einfluss des Tauchens auf den Augeninnendruck bei ophthalmologisch gesunden Menschen. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass im Rahmen des Sporttauchens kein Glaukom entsteht oder eine Progression induziert wird.

## 1.1 Glaukom

### 1.1.1 Definition

Bei einem Glaukom, das umgangssprachlich auch „Grüner Star“ genannt wird, handelt es sich um eine chronische, über Jahre langsam fortschreitende Erkrankung des Auges, bei welcher es zu einem Faserverlust des Sehnervs (*N. opticus*) kommt. Dabei entsteht ein in der Fundoskopie (Spiegelung des Augenhintergrundes) sichtbares pathognomonisches Bild an der Austrittsstelle des *N. opticus*: Es kommt zur Ausbuchtung (*Exkavation*) der Sehnervpapille (*Papilla nervi optici*), der sowohl eine mechanische Reizung, als auch eine Minderversorgung der Papille zugrunde liegt.

Der Untergang von Nervenfasern, die Optikusatrophie, äußert sich in klassischerweise außerhalb des Fixierpunktes liegenden Gesichtsfeldausfällen, die anfangs von

den Patienten selbst nicht wahrgenommen werden, jedoch ein erstes Zeichen der irreversiblen, zunächst nur teilweisen Erblindung darstellen. Zu einem Verlust der zentralen Sehschärfe und der damit einhergehenden vollständigen Erblindung des Auges kommt es bei einem Glaukom erst im Endstadium. Durch die Perimetrie (Gesichtsfelduntersuchung) können die Gesichtsfeldausfälle objektiviert und quantifiziert werden (Abb. 1-3) [3].



**Abbildung 1:**  
*Normales Gesichtsfeld [4]*



**Abbildung 2:**  
*Eingeschränktes Gesichtsfeld im frühen Glaukomstadium [4]*

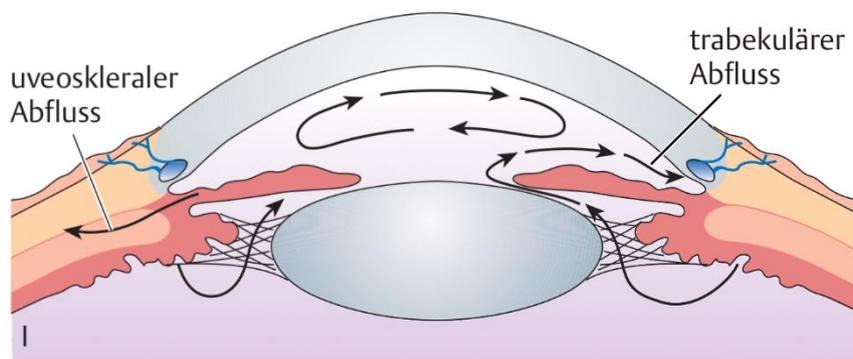


**Abbildung 3:**  
*Sehr stark eingeschränktes Gesichtsfeld im fortgeschrittenen Glaukomstadium [4]*

Das Glaukom ist mit 15,4% nach der altersabhängigen Makuladegeneration, kurz AMD (40,7%), und vor der diabetischen Retinopathie (9,7%) die zweithäufigste Ursache für eine Erblindung oder eine irreversible Sehbehinderung in Deutschland [5].

### 1.1.2 Intraokularer Druck

Der intraokulare Druck (IOD) entsteht durch die Produktion, den Fluss und den Abflusswiderstand des Kammerwassers (Abb. 4). Dieses wiederum wird von Epithelzellen des Ziliarkörpers (*Corpus ciliare*) gebildet und unterliegt einem stetigen Fluss von der Hinterkammer (Bereich hinter der Regenbogenhaut (*Iris*)) durch die Pupille in die Vorderkammer (Bereich zwischen Iris und Hornhaut (*Cornea*)) des Auges. Von dort fließt die seröse Flüssigkeit zu 85% durch das schwammartig aufgebaute Trabekelwerk im Kammerwinkel zum sogenannten Schlemm-Kanal, der das Kammerwasser zu Sammelkanälchen leitet, die in den episkleralen Venen münden (*trabekulärer Abfluss*). Die restlichen 15% des Kammerwassers gelangen über Venen der Gefäßhaut (*Uvea*) und Lederhaut (*Sklera*) direkt in den systemischen Kreislauf (*uveoskleraler Abfluss*) [3].



**Abbildung 4:** Abfluss des Kammerwassers (modifiziert nach [6])

Das Kammerwasser muss dabei zwei physiologische Widerstände überwinden. Der erste Widerstand entsteht durch das Aufliegen der Iris auf der Vorderfläche der Linse. Der IOD muss also groß genug sein, um die Iris von der Linse abzuheben, damit das Kammerwasser durch die Pupille in die Vorderkammer fließen kann und sich nicht in der Hinterkammer des Auges staut. Der zweite physiologische Widerstand, welcher beim Offenwinkelglaukom erhöht ist, befindet sich im Trabekelwerk. Ist der Abfluss des Kammerwassers behindert, kommt es zu einem Anstieg des IOD. Dies kann verschiedene Ursachen haben, auf die bei der Beschreibung der einzelnen Glaukomformen genauer eingegangen wird [7]. Grundsätzlich gilt demnach, dass der IOD einerseits hoch genug sein muss, um einen ungehinderten Kammerwasserfluss zu gewähr-

leisten, andererseits müssen pathologisch hohe Werte verhindert werden, um druckbedingte Schäden der Strukturen des Auges zu vermeiden.

In der augengesunden Bevölkerung beträgt der Mittelwert des IODs 15,5 mmHg. Der Normbereich, der sich durch Addition und Subtraktion der doppelten Standardabweichung (hier  $\pm 5,5$  mmHg) ergibt, liegt somit zwischen 10 und 21 mmHg. Dabei treten im Tagesverlauf physiologische Schwankungen von 3-5 mmHg auf [3,8–11], während die Differenz zwischen beiden Augen 3 mmHg [8,12] bis maximal 5 mmHg [11,13] beträgt. Des Weiteren stellen sich nachts bis zu 3 mmHg höhere Werte ein als tagsüber. Ein nächtlicher Anstieg von mehr als 3 mmHg wird als pathologisch gewertet [3].

Grundsätzlich gilt es jedoch zu bedenken, dass keine einheitlichen Tagesdruckprofile des intraokularen Drucks vorliegen. Im Jahre 1925 wurden die ersten 24-Stunden-Augendruck-Messungen von Thiel [14] durchgeführt, der die Maximalwerte in einem Zeitraum von 3 bis 7 Uhr beschrieb, während die niedrigsten Werte von ihm morgens gemessen wurden. Da zunächst keine vergleichbaren Studien vorlagen, setzte sich dieser Druckverlauf als Standard durch. Erst einige Jahre später dementierte Weiss [15] diesen Maßstab, nachdem nur ein Drittel seiner Glaukom-Patienten eine ähnliche Druckkurve aufwies, die restlichen zwei Drittel jedoch Maximalwerte zu anderen Tageszeitpunkten zeigten. Daraufhin wurden zur besseren Übersicht von Langley und Swanljung (1951) [16] und von Hager (1958) [17] einige Augendruck-Typen definiert:

- *Tag-Typ* (mit 49% der häufigste Typ, der nochmal in den Vormittags-Typ mit Maxima zwischen 7 und 9 Uhr und den Nachmittagstyp mit Maxima zwischen 17 und 21 Uhr unterteilt wurde),
- *Nacht-Typ* (Maximalwerte zwischen 0 und 4 Uhr),
- *Flach-Typ* (insgesamt eher hohes Druckniveau ohne Druckspitzen),
- *variierender Typ* (wechselnde Maximalwerte),
- *Spitzen-Typ* (insgesamt eher niedriges Druckniveau mit einzelnen sehr hohen Maximalwerten) [18].

Letztlich ergänzte man diese Ergebnisse, indem Unterschiede in der Häufigkeit der einzelnen Typen bezogen auf die verschiedenen Glaukomformen verifiziert wurden. So lässt sich beispielsweise beim primären Offenwinkelglaukom überwiegend der Vormittags-Typ feststellen, wohingegen beim Normaldruckglaukom der Flach-Typ die häufigste Variante ist [18,19]. In einer 2017 von Norbert Pfeiffer veröffentlichten Studie

zu „Messungen des IODs mit einer Kontaktlinse“ wurde erneut aufgezeigt, dass in der Mehrzahl der Fälle die höchsten Werte nachts in einer Zeitspanne von 23 bis 7 Uhr auftreten [20].

Fälschlicherweise wird das Glaukom häufig mit einer Erhöhung des IODs gleichgesetzt. Zwar ist ein erhöhter intraokularer Druck der größte Risikofaktor der Erkrankung, jedoch kann der IOD auch pathologisch erhöht sein, ohne dass Veränderungen der Papille des N. opticus vorliegen, die ein Glaukom definieren würden. Bei wiederholt oberhalb des Grenzwertes von 21 mmHg gemessenen Werten des IOD spricht man von einer *okularen Hypertension*, die dann einer regelmäßigen Kontrolle und bei Vorliegen von Risikofaktoren auch einer drucksenkenden Therapie bedarf, um einen langfristigen Übergang in ein manifestes Glaukom zu verhindern [21]. Nach einer amerikanischen Studie („The Ocular Hypertension Treatment Study“, OHTS) liegt das individuelle Risiko, mit dem eine okuläre Hypertension in ein Glaukom übergeht, bei ca. 10% in 5 Jahren. Durch eine adäquate Therapie des erhöhten IODs über 5 Jahre hinweg konnte der Übergang in ein Glaukom von 9,0% auf 4,4% gesenkt werden [22]. Nach Chihara (2008) führt eine Reduktion des IOD um nur 1,0 mmHg zu einer 10%-igen Risikoreduktion hinsichtlich einer Verschlechterung der Gesichtsfeld-einschränkung und zu einer Verbesserung des Outcomes von Patienten mit okularen Hypertension um 10% [23]. Ebenso können für das Glaukom typische Schädigungen des Sehnervs bei normalen Werten des IODs vorhanden sein. Dies entspricht einem *Normaldruckglaukom* [21]. Man beachte hierzu, dass ein erhöhter IOD nur bei etwa 50% der Glaukom-Patienten vorliegt [24].

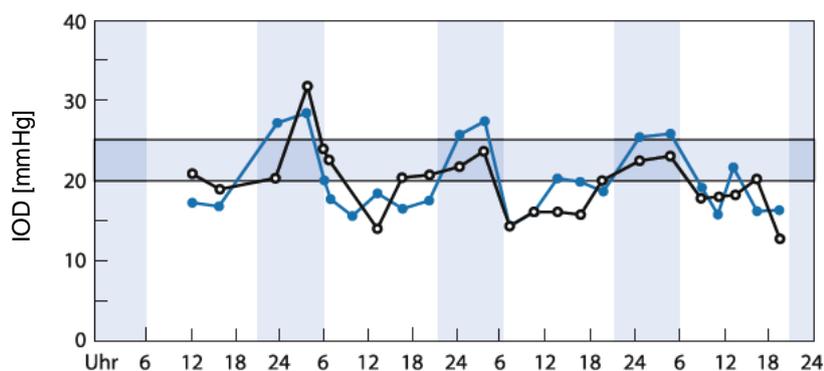
### 1.1.3 Einteilung des Glaukoms

Es existieren verschiedene Entitäten des Glaukoms, wobei grundsätzlich zwischen primären und sekundären Glaukomformen unterschieden wird. Primär bedeutet, dass das Glaukom nicht durch eine andere Erkrankung des Auges bedingt ist, das heißt es entsteht spontan. Ein sekundäres Glaukom tritt als Folge einer bestehenden oder vorangegangenen Erkrankung, als Folge einer traumatischen Schädigung des Auges, nach iatrogenen Eingriffen oder als Folge von Medikamentennebenwirkungen auf.

Bezogen auf den Kammerwinkel und dessen Zustand unterteilt man die primären und sekundären Formen weiter in primäre/sekundäre Offenwinkelglaukome und primäre/sekundäre Winkelblockglaukome [3].

### 1.1.3.1 Primäre Glaukome

Beim chronisch verlaufenden *primären Offenwinkelglaukom*, welches mit über 90% die häufigste Glaukomform ist [25], kommt es zu einer Abflussbehinderung des Kammerwassers, die durch eine altersbedingte Sklerosierung des Trabekelwerks verursacht wird. Der Kammerwinkel selbst bleibt dabei unverändert, jedoch resultiert aus dem steigenden IOD (25-40 mmHg) eine Minderdurchblutung und im weiteren Verlauf eine Atrophie der Papille des N. opticus. Die Erkrankung betrifft meist beide Augen, beginnt aber oft zunächst einseitig. Typisch für das Offenwinkelglaukom ist, wie unter 1.1.1 erwähnt, dass die Patienten über Jahre hinweg keine subjektiven Beschwerden wie Gesichtsfeldeinschränkungen, Sehstörungen oder Schmerzen bemerken, der IOD jedoch bei 70% der Erkrankten bereits erhöht ist und die Papille des N. opticus pathognomonische Veränderungen aufweist. Fertigt man über 24 Stunden ein Tagesdruckprofil an, bei welchem der IOD alle drei Stunden gemessen wird, fallen pathologische Schwankungen von mehr als 5 mmHg und bis zu 10 mmHg [8,26–28] auf, die häufig nachts besonders ausgeprägt sind (Abb. 5). Die Seitendifferenz zwischen rechtem und linkem Auge beträgt meist mehr als 5 mmHg [8,10,13].



**Abbildung 5:** Tagesdruckkurve beider Augen eines Glaukom-Patienten [3]

Erst in fortgeschrittenen Stadien, wenn durch den unbemerkten zunehmenden Nervenfaserverlust auch die zentrale Sehschärfe beeinträchtigt ist, wird die Erkrankung

von den Betroffenen wahrgenommen. Da die schleichend entstandenen Schäden irreversibel sind, ist eine Erblindung durch das chronische Offenwinkelglaukom dann oft nicht mehr aufzuhalten [3,6].

Das *Winkelblockglaukom* kann akut oder chronisch auftreten. In beiden Fällen kommt es zu einem Verschluss des Kammerwinkels. Man spricht von einem *akuten Winkelblockglaukom* oder auch „*Glaukomanfall*“, wenn es zu einem meist einseitigen, plötzlichen, kompletten Verschluss der Abflusswege kommt, der mit starken, als dumpf und tief liegend beschriebenen Schmerzen und Sehstörungen in dem betroffenen Auge einhergeht. Prädisponierend für ein akutes Glaukom sind:

- eine flache Vorderkammer (z.B. bei Hypermetropie),
- ein enger Kammerwinkel (z.B. bei Hypermetropie),
- Hypermetropie/Weitsichtigkeit (entspricht einem zu kurzen Augapfel),
- eine relativ zum Auge zu große Linse („Alterslinse“ v.a. bei älteren Frauen),
- eine dicke vorgewölbte Iris [3].

Häufigste Ursache des akuten Winkelblocks ist eine Verlegung des Kammerwinkels durch die Irisbasis bei einer plötzlichen Weitstellung der Pupille (*Pupillarblock*). Physiologisch ist diese bei Dunkelheit oder Angstzuständen zu beobachten. Dies kann jedoch auch iatrogen z.B. durch Applikation von pupillenerweiternden Medikamenten, wie es teilweise für eine ophthalmologische Untersuchung nötig ist, hervorgerufen werden. Bei einem akuten Winkelblock lassen sich extrem hohe IOD-Werte von 50-80 mmHg messen, die sich bereits durch Palpation des Bulbus erkennen lassen, der im Vergleich zur Gegenseite enorm verhärtet imponiert. Ein Glaukomanfall zählt zu den augenärztlichen Notfällen und erfordert sofortiges Handeln um eine Erblindung zu verhindern. Außerdem können sich Verklebungen, sogenannte Synechien, zwischen Iris und Linse (hintere Synechien), als auch zwischen Iris und Trabekelwerk (vordere Synechien) ausbilden, die in der Gonioskopie (= Untersuchung des Kammerwinkels mit speziellen Linsen) sichtbar sind. Im Verlauf können diese Synechien zu einem *chronischen Winkelblockglaukom* (*Glaucoma chronicum congestivum*) mit für das Glaukom typischer Papillenexkavation, Optikusatrophie und daraus resultierender Einschränkung des Gesichtsfeldes führen [3,6].

Zusätzlich ist das *intermittierende Winkelblockglaukom* zu erwähnen, das gewissermaßen eine Vorstufe des akuten Winkelblocks darstellt. Es kommt dabei aufgrund

eines Verschlusses des Kammerwinkels zu einem zeitweise erhöhten IOD, der jedoch spontan wieder verschwindet [3].

Bei einem *kongenitalen Glaukom*, einer angeborenen Sonderform des Glaukoms, das etwa 1% aller Glaukome ausmacht, liegt der Grund der Abflussbehinderung in einer Fehlentwicklung des Trabekelwerks [3,6].

### 1.1.3.2 Sekundäre Glaukome

Die Genese sekundärer Glaukome ist sehr unterschiedlich. Zum einen kann der Kammerwinkel durch Narben, Synechien oder Membranen verlegt sein, die das Resultat von Verletzungen wie z.B. Verbrennungen oder Verätzungen oder von operativen Eingriffen sind oder aufgrund von entzündlichen Prozessen am Auge auftreten. Zum anderen können Gefäßneubildungen, die sich als Folge einer Ischämie der Retina bilden (häufig bei Zentralvenenverschluss oder arteriosklerosebedingt im Rahmen eines Diabetes mellitus), den Abfluss über den Kammerwinkel blockieren. Man spricht dann von einem *Neovaskularisationsglaukom*. Des Weiteren können Eiweiße der Linse (z.B. als Folge einer Linsenkapselruptur → *Phakolytisches Glaukom*), Blut (z.B. im Rahmen von intraokularen Blutungen → *Hämolytisches Glaukom*) oder Pigment, das von der Iris abgerieben wird (*Pigmentdispersionsglaukom*), den Kammerwinkel oder das Trabekelwerk verstopfen. Bei einem *Entzündlichen Glaukom* kann der Abfluss einerseits durch ein Ödem, andererseits durch Entzündungszellen, die die Maschen des Trabekelwerks verstopfen, gestört sein. Neben einer Behinderung des Kammerwasserabflusses im Bereich des Kammerwinkels oder des Trabekelwerks kann auch der Durchfluss von der hinteren in die vordere Augenkammer entzündungsbedingt (z.B. nach einer Iritis) gestört sein. Diese Abflussbehinderung entsteht, wenn postinflammatorisch die Vorderfläche der Linse mit der Rückfläche der Iris, also dem Rand der Pupille, verwächst. Ein Glaukom, das als Nebenwirkung von Medikamenten auftritt, ist das *Kortisonglaukom*. Es tritt vorrangig nach lokaler Anwendung von Kortikosteroiden auf, da diese die Synthese von Proteoglykanen im Kammerwinkel induzieren, welche sich im Trabekelwerk ablagern und den Durchfluss erschweren. Dadurch steigt der IOD [3,6].

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Entitäten des Glaukoms:

	Häufigkeit	Kammerwinkel	Abflussbehinderung
<b>Offenwinkel- glaukom</b> <i>primär</i>	über 90%	offen/unverändert	im Trabekelwerk (idiopathisch)
<i>sekundär</i>	2-4%	offen/unverändert	Verlegung des Trabekelwerks z.B. durch Erythrozyten, Pigment und/oder Entzündungszellen
<b>Winkelblock- glaukom</b> <i>primär</i>	ca.5%	blockiert	mechanische Verlegung des Kammerwinkels durch Irisgewebe
<i>sekundär</i>	2-4%	blockiert	mechanische Verlegung des Kammerwinkels durch vordere Synechien, Narben oder neugebildete Gefäße aufgrund okularer Vorerkrankungen
<b>Kindliches Glaukom</b>	1%	nicht ausdifferenziert	Kammerwinkel nicht voll ausdifferenziert und/oder durch persistierendes embryonales Gewebe verlegt

**Tabelle 1:** Glaukomformen (modifiziert nach [25])

#### 1.1.4 Glaukom als Volkskrankheit

*Volkskrankheiten* sind „nichtepidemische Krankheiten, die aufgrund ihrer Verbreitung und ihrer wirtschaftlichen Auswirkungen (Behandlungskosten, Anspruch auf Lohnausgleich bei Arbeitsunfähigkeit, Frühberentung) sozial ins Gewicht fallen“ [29]. Die klassischen Beispiele für Volkskrankheiten der Industrienationen sind Diabetes mellitus Typ 2 und Arthrose als Folge der Überernährung als auch Herz-Kreislauf-Erkrankungen als Folge von arteriellem Hypertonus [29].

Die Studienlage in Deutschland zur Epidemiologie häufiger ophthalmologischer Erkrankungen ist derzeit leider noch unzureichend. Projiziert man epidemiologische Daten aus Erhebungen anderer Länder auf Deutschland, lässt sich die Prävalenz von Augenerkrankungen jedoch abschätzen. Nach dem „Weißbuch zur Situation der ophthalmologischen Versorgung in Deutschland“, das im September 2012 von der DOG (*Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft*) herausgegeben wurde, waren im Jahr 2012 ca. 972.000 Menschen an einem Glaukom erkrankt, während Glaukom-Frühstadien bei etwa 1.269.000 diagnostiziert wurden. Hochrechnungen dieser Zahlen

auf das Jahr 2030, die den demographischen Wandel der nächsten Jahre berücksichtigen, ergaben 1.176.000 Glaukom-Patienten und 1.626.000 Betroffene in Frühstadien der Erkrankung [30]. Demnach litten im Jahre 2012 1-2% der Gesamtbevölkerung an einem eindeutig diagnostiziertem Glaukom (Gesamtbevölkerung Deutschlands im Jahre 2012: 80.523.700 [31]), wovon 10% schwere Sehstörungen oder eine komplette Blindheit aufwiesen [21].

Anderen fundierten Schätzungen zufolge, die sich auf das Jahr 2020 beziehen und die Prävalenz der ganzen Welt angeben, wird es 2020 weltweit 79,6 Millionen Glaukom-Patienten mit Gesichtsfeldeinschränkungen geben und 11,2 Millionen Menschen werden aufgrund eines Glaukoms erblindet sein [32].

Dabei ist zu beachten, dass bei Weitem nicht alle Glaukome erkannt werden, das heißt es liegt eine hohe Dunkelziffer vor, die in Deutschland und anderen Industrienationen auf ca. 50% geschätzt wird [21,33]. Dies bedeutet, dass Vorsorgeuntersuchungen, durch welche die schleichend progressive Glaukom-Erkrankung rechtzeitig in frühen Stadien entdeckt und therapiert werden kann, weiter forciert werden müssen, um die Dunkelziffer und damit die Anzahl der zu spät diagnostizierten Glaukome zu senken. Ein großes Problem stellt hierbei die freiwillige Inanspruchnahme von kostenpflichtigen Vorsorgeuntersuchungen beim Augenarzt dar, die von den Krankenkassen selbst bei familiärer Prädisposition nicht getragen werden. In der Folge ließe sich hierdurch nicht nur die Anzahl an blinden oder sehbehinderten Patienten reduzieren, sondern es könnten auch schwierige Therapieverläufe verhindert und Behandlungskosten gesenkt werden [34]. Interessant hierzu ist eine Studie, die von der Firma *Bausch + Lomb* über das Gesundheitsverhalten normaler Verbraucher 2012 veröffentlicht wurde. Demnach gaben 70% der Teilnehmer an, dass sie lieber eine Gliedmaße oder zehn Jahre ihres Lebens verlieren würden, als nicht mehr sehen zu können. Außerdem wären 75% der Befragten eher bereit, nur mit der Hälfte ihres Verdienstes zu leben, anstatt mit einer 50%-igen Einschränkung des Sehvermögens. Widersprüchlich hierzu waren die Ergebnisse zur Frage nach ophthalmologischen Kontrolluntersuchungen: nur 21% konsultierten in den vorhergegangenen fünf Jahren einen Ophthalmologen. Von denjenigen, die keinen Augenarztbesuch angaben, begründeten dies 65% mit dem Fehlen von subjektiven Beschwerden [30,35]. Dies spiegelt exakt das Problem der zunächst unbemerkten und symptomlosen Erkrankung wider, das die hohe Dunkelziffer mitverursacht.

Um verschiedene Krankheiten bezüglich ihrer Relevanz für die Gesellschaft miteinander vergleichbar zu machen, wurde das Konzept der *DALYs (Disability Adjusted Life Years)* entwickelt. Die Kriterien, die dabei erfasst werden, sind die Mortalität und die Beeinträchtigung des beschwerdefreien Lebens durch eine Erkrankung. Damit werden einerseits die verlorenen Jahre aufgrund des durch die Erkrankung hervorgerufenen im Vergleich zur Standard-Lebenserwartung eines Landes vorzeitigen Todes (Mortalität) und andererseits die Anzahl der mit Beeinträchtigung gelebten Jahre bis zur Genesung oder zum Tod (Lebensqualität) ausgedrückt. Die Berechnung der DALYs lautet wie folgt:

$$\mathbf{DALY = YLL + YLD}$$

*YLL = years of life lost (verlorene Lebensjahre)*

*YLD = years lived with disability/disease (Lebensjahre mit Behinderung/Krankheit)*

So kann die Belastung, die durch eine Erkrankung entsteht, quantifiziert werden, wobei ein DALY ein Jahr „verlorene“ Gesundheit beschreibt [36,37].

Die WHO stellte 2008 eine Übersicht zusammen, in der die DALYs verschiedener Krankheiten in Europa im Verlauf von 2008 bis 2030 miteinander verglichen wurden (Tab. 2):

	2008	2015	2030	Entwicklung 2008 bis 2030
<i>Parkinson</i>	466	466	463	-0,6%
<i>Multiple Sklerose</i>	289	274	241	-16,6%
<i>Epilepsie</i>	578	533	454	-21,5%
<i>Mammakarzinom</i>	1.718	1.737	1.648	-4,1%
<i>Ovarialtumore</i>	477	477	449	-5,9%
<i>Leukämie</i>	716	691	634	-11,5%
<i>Rheumatoide Arthritis</i>	1.046	1.037	982	-6,1%
<i>Asthma</i>	1.294	1.250	1.166	-9,9%
<i>Verkehrsunfälle</i>	3.406	2.978	2.299	-32,5%
<b>Glaukom</b>	<b>472</b>	<b>493</b>	<b>534</b>	<b>+13,1%</b>
<b>AMD</b>	<b>1.221</b>	<b>1.283</b>	<b>1.391</b>	<b>+13,9%</b>

**Tabelle 2:** Projektionen für Disability Adjusted Life Years (DALYs) in Europa 2008-2030 für verschiedene Krankheiten, alle Angaben in Tsd. (modifiziert nach [38])

Aus der Zusammenstellung wird ersichtlich, dass ophthalmologische Erkrankungen wie das Glaukom oder die altersbedingte Makuladegeneration (AMD), im Vergleich zu vielen anderen häufigen Erkrankungen, eine steigende Tendenz aufweisen und somit zunehmende Relevanz für die Gesundheit der Gesellschaft haben werden [30]. Aufgrund der Prävalenz, der Inzidenz und der wachsenden Bedeutung des Glaukoms für die Bevölkerung wird das Glaukom von Ophthalmologen als Volkskrankheit bezeichnet.

## 1.2 Tauchen mit Gerät

### 1.2.1 Kurzer Überblick über die Geschichte des Tauchens

Der Franzose Jaques-Yves Cousteau (1910-1997), ein aufgrund seiner Dokumentarfilme weltweit bekannter Meeresforscher und ambitionierter Taucher, sagte einmal: „Die beste Weise, Fische zu beobachten, besteht darin, selber zum Fisch zu werden“ [39].

1943 entwickelte Cousteau zusammen mit Emile Gagnan, einem französischen Ingenieur, einen Atemregler, durch welchen der Taucher bei leichter Inspiration automatisch Druckluft erhielt. Bis dato gab es lediglich Tauchgeräte, die die Luft ununterbrochen zuströmen ließen oder bei welchen der Taucher ein Ventil ständig öffnen und schließen musste. Durch die Erfindung des auch als „Aqualung“ bezeichneten Gagnan-Cousteau-Reglers, auf welchem die heutigen Atemregler basieren, wurde das Tauchen als Freizeitsport zunehmend populär. Immer mehr Menschen schienen dem Leitsatz von Jaques-Yves Cousteau folgen zu wollen, wodurch sich der Tauchsport zunehmend vom Schnorcheln in Richtung Gerätetauchen entwickelte und die ersten Tauchgeschäfte eröffneten.

Einige Jahre später wurden aufgrund steigender Zahlen von Tauchunfällen die ersten Organisationen gegründet, die es sich zum Ziel machten, eine gute Ausbildung von Tauchern zu gewährleisten, um das Risiko derartiger Zwischenfälle zu minimieren.

So entstand im Jahre 1959 in Monaco die Confédération Mondiale des Activités Subaquatiques (CMAS) als ein weltweit agierender Dachverband für Sporttaucher [40]. Sieben Jahre später wurde der heute weltweit größte Tauchsportverband PADI (*Professional Association of Diving Instructors*) gegründet, der bereits nach einem Jahr 3226 Taucher ausgebildet hatte [41]. 2017 veröffentlichte PADI eine Statistik, nach welcher während der letzten 20 Jahre jährlich im Durchschnitt 900.000 Tauchscheine durch die Organisation ausgestellt wurden [42]. Schätzungen zufolge gibt es heute weltweit mehr als sieben Millionen qualifizierte SCUBA-Taucher [43–45]. Dies macht den stetigen Zuwachs an Tauchinteressierten deutlich.

## 1.2.2 Physik und Physiologie des Tauchens

### 1.2.2.1 Hydrostatischer Druck

Der menschliche Organismus ist normalerweise an den atmosphärischen Druck auf Meereshöhe von ca. 1 bar (100 kPa) adaptiert. Auf einem Taucher lastet zusätzlich der Druck, der durch die Gewichtskraft der über ihm liegenden Wassersäule festgelegt wird. Der Umgebungsdruck unter Wasser setzt sich also aus dem über der Wasseroberfläche bestehenden Luftdruck und dem hydrostatischen Druck zusammen. Beim Tauchen steigt der Umgebungsdruck pro Meter Wassertiefe (entsprechend 1 m Wassersäule) linear um 0,1 bar (10 kPa) an. Das bedeutet, dass sich der auf den Körper lastende Druck bereits in einer Tiefe von 10 m auf 2 bar (200 kPa) verdoppelt hat. Taucht man weitere 10 m ab, herrscht ein Druck von 3 bar (300 kPa), usw. [46]. Geringer ausgeprägte Effekte des Wasserdrucks, sogenannte Immersionseffekte (Immersion: lat. *immergere* = „Eintauchen“ [47]), entstehen bereits beim Schwimmen oder Schnorcheln an der Wasseroberfläche. Hierbei kommt es durch die Verschiebung des Blutvolumens zu hämodynamischen Veränderungen, da der hydrostatische Druck des Wassers dem hydrostatischen Druck der Blutsäule entgegen wirkt [48]. Wird beim Tauchen auch der Kopf eingetaucht, spricht man von einer Submersion (lat. *submergere* = untertauchen) [49].

### 1.2.2.2 Gasgesetze

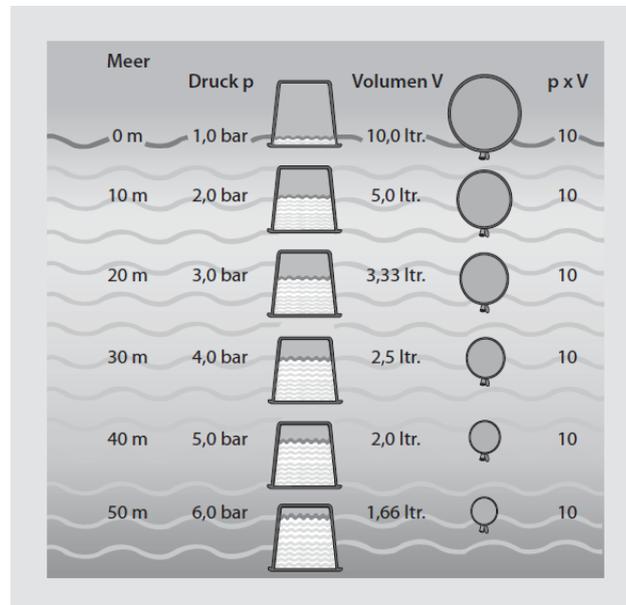
#### 1.2.2.2.1 Gesetz von Boyle und Mariotte

Das Gesetz von Boyle (1627-1691) und Mariotte (1620-1684) [50] besagt, dass sich bei gleichbleibender Temperatur das Volumen ( $V$ ) eines Gases umgekehrt proportional zum Druck ( $p$ ) innerhalb des Gases verhält, das heißt das Produkt aus Volumen und Druck ist konstant [51]:

$$p = \frac{1}{V} \quad \text{oder} \quad p \cdot V = \textit{konstant}.$$

Für die Praxis bedeutet dies, dass sich das Gasvolumen in luftgefüllten Hohlräumen des Körpers (beispielsweise in der Lunge, den Nasennebenhöhlen oder im Mittelohr) bei steigendem Druck während des Abtauchens verkleinert und bei sinkendem Druck während des Auftauchens wieder vergrößert (Abb. 6). Die größte Veränderung geschieht dabei während der ersten 10 m des Abtauchens, da sich hier der

Umgebungsdruck von 1 auf 2 bar verdoppelt, wodurch sich das Volumen halbiert. Ein Taucher merkt dies daran, dass im Bereich zwischen 0 und 10 m häufigere Druckausgleichsmanöver nötig sind [48,51].



**Abbildung 6:** Volumenveränderungen nach dem Boyle-Mariotte-Gesetz [51]. (m = Meter, ltr. = Liter)

#### 1.2.2.2 Gesetz von Dalton

Der Gesamtdruck eines Gasgemisches setzt sich aus der Summe der Partialdrücke der einzelnen in dem Gemisch enthaltenen Komponenten zusammen. Nach Dalton (1766-1844) [50] berechnet sich der Partialdruck ( $P_x$ ) eines Gases aus dem Produkt von Gesamtdruck des Gemisches ( $P_{ges.}$ ) und der Fraktion des Gases ( $F_x$ ) [51]:

$$P_x = P_{ges.} \cdot F_x.$$

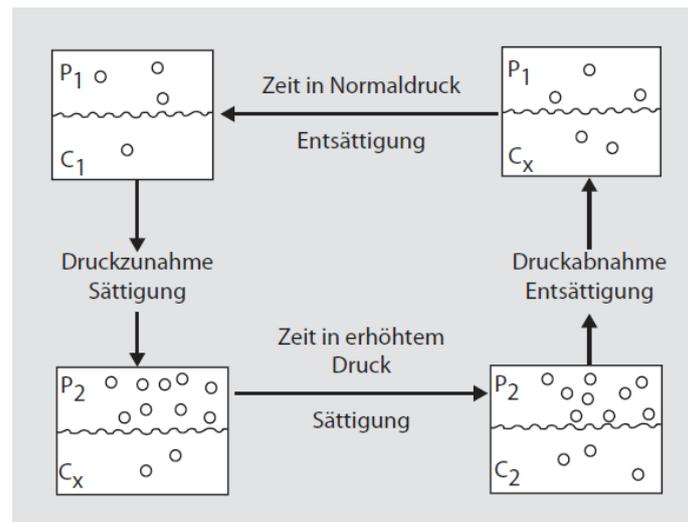
Durch die Erhöhung des Umgebungsdrucks unter Wasser steigen analog dazu auch die Partialdrücke der Atemgase an. Verdoppelt sich der Umgebungsdruck in einer Tiefe von 10 m (vgl. Kapitel 1.2.2.1), verdoppeln sich auch die Partialdrücke. 20 m unter der Wasseroberfläche hat sich der Umgebungsdruck verdreifacht, das heißt auch die Partialdrücke verdreifachen sich. Abhängig von der Tauchtiefe erreichen die Partialdrücke Werte, die bei einem Taucher Vergiftungssymptome auslösen können. Dies gilt vor allem für Stickstoff und Sauerstoff [48,51]. Tabelle 3 zeigt die Abhängigkeit des Stickstoff- und Sauerstoffpartialdrucks von der Tauchtiefe:

Tauchtiefe [m]	Partialdruck von Stickstoff			Partialdruck von Sauerstoff		
		%N <sub>2</sub> in der Inspirationsluft	bar N <sub>2</sub>		%O <sub>2</sub> in der Inspirationsluft	bar O <sub>2</sub>
<b>0</b>	1 x	0,7808	= 0,78	1 x	0,2095	= 0,21
<b>10</b>	2 x	0,7808	= 1,56	2 x	0,2095	= 0,42
<b>20</b>	3 x	0,7808	= 2,34	3 x	0,2095	= 0,63
<b>40</b>	5 x	0,7808	= 3,90	5 x	0,2095	= 1,05
<b>60</b>	7 x	0,7808	= 5,47	7 x	0,2095	= 1,47
<b>70</b>	8 x	0,7808	= 6,25	8 x	0,2095	= 1,68

**Tabelle 3:** Partialdruck von Stickstoff und Sauerstoff in einem Luftgemisch in Abhängigkeit von der Wassertiefe [50]

#### 1.2.2.2.3 Gesetz von Henry

Das Gesetz von Henry (1774-1836) [50] beschreibt die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten: „Bei konstanter Temperatur ist die in einer Flüssigkeit gelöste Gasmenge direkt proportional zum Partialdruck des Gases und abhängig vom Löslichkeitskoeffizienten des Gases für die jeweilige Flüssigkeit“ [48]. Erhöht sich beim Tauchen der Umgebungsdruck und damit auch der Partialdruck des Inertgases in der Atemluft, so löst sich das Gas vermehrt in Körperflüssigkeiten wie z.B. im Blut, sowie in der interstitiellen oder intrazellulären Flüssigkeit. Das bedeutet, die Gasmoleküle diffundieren so lange in die Flüssigkeit, bis ein neuer Gleichgewichtszustand erreicht wird. Die Sättigung der Flüssigkeit mit Inertgas nimmt zu (Abb. 7). Selbiges geschieht während des Auftauchens in umgekehrter Richtung: der Umgebungsdruck lässt nach, wodurch Körperflüssigkeiten und -gewebe entsättigt werden. Die Menge und die Geschwindigkeit, mit der sich ein Gas in einer Flüssigkeit löst, sind dabei für jedes Gas und auch für jede Flüssigkeit spezifisch [51].



**Abbildung 7:** Gasgesetz von Henry. [51]

( $P$  = Partialdruck;  $C$  = Konzentration)

### 1.2.3 Atemgasbedingte Komplikationen beim Tauchen

Die Erhöhung des Wasserdrucks und das Boyle-Mariotte-Gesetz spielen bei jeder Form des Tauchens, also bereits beim Schnorcheln, eine Rolle. Die weiteren Gesetzmäßigkeiten (nach Dalton und Henry) werden vor allem beim Tauchen mit Atemgeräten bedeutsam. Das Atemgas aus der Druckluftflasche wird dem Taucher über einen Atemregler zur Verfügung gestellt, der nach einem zweistufigen Prinzip funktioniert. Die als Druckminderer bezeichnete erste Stufe reduziert den Druck in der Druckluftflasche, der zwischen 200 und 300 bar beträgt, je nach Hersteller auf einen Mitteldruck von ca. 8-15 bar über dem Umgebungsdruck. Im zweiten Schritt wird der Mitteldruck dem abhängig von der Tauchtiefe herrschenden Umgebungsdruck angepasst. Dies erlaubt eine leichtgängige angenehme Atmung [48].

Die meisten Gerätetaucher verwenden heutzutage Druckluftflaschen, die mit Luft oder einem Gasgemisch namens *Nitrox* befüllt sind. Normale Luft besitzt ca. 21% Sauerstoff und einen sehr hohen Anteil an Stickstoff (ca. 78%). Stickstoff ist ein Inertgas, das zu diversen Problemen beim Tauchen führen kann. Um das Risiko für stickstoffassoziierte Komplikationen zu reduzieren, wurde *Nitrox* entwickelt, dessen Bezeichnung sich aus den englischen Begriffen „Nitrogen“ (Stickstoff) und „Oxygen“ (Sauerstoff) zusammensetzt. Hier ist der Stickstoffanteil zugunsten des Sauerstoffanteils reduziert, der je nach Mischverhältnis von 23 bis 60% [48] variiert, in Regel aber zwischen 32% und 40% liegt [52]. Selten und insbesondere für große Tauchtiefen kommen heliumhaltige Gasgemische (z.B. Trimix, Heliox) zum Einsatz, bei welchen der

Stickstoff teilweise bzw. vollständig durch das Inertgas Helium ersetzt wird, da dessen narkotisierende Wirkung vergleichsweise gering ist (Tab. 4).

Atemgasbedingte Komplikationen treten hauptsächlich dann auf, wenn der Taucher eine gewisse Tauchtiefe erreicht hat und dort verweilt. Während dieser Isopressionsphase wirken die tiefenabhängigen Partialdrücke über längere Zeit (Expositionszeit) auf den Taucher [48]. Grundsätzlich kann jedoch jedes inerte Atemgas durch die Wirkung auf das zentrale Nervensystem bei hohen Partialdrücken narkoseähnliche Zustände hervorrufen. Dabei gelten nach der Meyer-Overtone-Regel dieselben Grundsätze wie bei der Anwendung von Anästhetika in der Anästhesie: je lipophiler ein Stoff, desto höher seine narkotisierende Wirkung [43,53–55]. In Tabelle 4 sind die für dieses Kapitel wichtigen Atemgase bezüglich ihrer Löslichkeit in Wasser und Fett und der daraus resultierenden narkotischen Wirkstärke aufgeführt:

	Löslichkeit der Gase bei 37 °C [mg/ml]		Relative narkotische Potenz
	in Wasser	in Fett	
<b>Sauerstoff (O<sub>2</sub>)</b>	0,022	0,11	1,7
<b>Stickstoff (N<sub>2</sub>)</b>	0,013	0,067	1,0
<b>Helium (He)</b>	0,009	0,015	0,2
<b>Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)</b>	0,838	1,34	20,0

**Tabelle 4:** Relative narkotische Potenz der wichtigsten Atemgase beim Tauchen (modifiziert nach [43] aus [56,57])

### 1.2.3.1 Komplikationen durch Stickstoff

Stickstoff (N<sub>2</sub>), als physiologisch inertes Gas, verursacht zwei bedeutsame Probleme beim Tauchen: den Tiefenrausch, der insbesondere während der Isopressionsphase auftritt und dekompressionsbedingte Schädigungen beim Auftauchen [48].

#### 1.2.3.1.1 Tiefenrausch

Der „Tiefenrausch“ ist die Folge einer Stickstoffvergiftung, bei welcher der zu 78% (entsprechend 0,78 bar auf Meereshöhe) in der Druckluft enthaltene Stickstoff aufgrund des steigenden inspiratorischen Partialdrucks unter Wasser toxisch auf das zentrale Nervensystem (ZNS) wirkt. Hierdurch kann ein Narkose-ähnlicher Zustand

hervorgerufen werden (Inertgasnarkose). Dies lässt sich mit der Inhalation von Lachgas (= Distickstoffmonoxid,  $N_2O$ ) vergleichen, das früher in der Anästhesie zur Narkoseeinleitung verwendet wurde und ebenfalls einen mit einem Alkoholrausch vergleichbaren Zustand induziert. Einer der ersten Berichte über eine Inertgasnarkose stammt von dem Franzosen Colladon, der im Jahre 1826 seine Erfahrungen während eines Tauchgangs in 20 m Tiefe als „...a state of excitement as if I had drunk some alcoholic liquor...“ [56] beschrieb. Die auftretenden Symptome sind zunächst sehr milde ausgeprägt und werden daher meist nicht bemerkt. Taucht man tiefer hinab, treten euphorische oder auch dysphorische Stimmungszustände auf (vergleichbar mit einem Rausch durch Alkohol), das Kurzzeitgedächtnis und die Konzentration sowie das logische Denken lassen nach. Bei weiter zunehmendem Stickstoff-Partialdruck kommt es zu Halluzinationen und letztlich zur Bewusstlosigkeit. Tödliche Verläufe einer Stickstoffvergiftung resultieren entweder aus der Bewusstlosigkeit, die zum Ertrinken führen kann oder durch unsachgemäßes und gefährliches Verhalten des Tauchers, der „im Rausch“ seine Selbstkontrolle verliert oder sich aufgrund eines übersteigerten Selbstbewusstseins zu riskant verhält. Die Symptome werden leichter und verschwinden beim Aufstieg in geringere Tiefen, wenn die Atemgase wieder mit niedrigerem Partialdruck zugeführt werden [43,48,51]

Der genaue Grenzwert, ab welcher der Stickstoff toxisch wirkt, variiert von Mensch zu Mensch und ist auch bezogen auf den einzelnen Taucher abhängig von dessen Tagesform, vom aktuellen Gesundheitszustand und der körperlichen Belastung während des Tauchgangs. Besondere Vorsicht ist bei (Rest-) Alkohol und der Einnahme von zentral wirksamen Medikamenten, wie z.B. Dimenhydrinat (bei Seekrankheit) oder Antidepressiva geboten, da diese die narkotisierende Wirkung von Stickstoff verstärken können. Zur Orientierung gilt, dass Vergiftungserscheinungen ab einem Stickstoff-Partialdruck von 3,2-3,9 bar auftreten können, was einer Wassertiefe von 30-40 m entspricht (Tab. 3) [43,51,58,59]. Als offizielle Empfehlung für Sporttaucher mit normaler Druckluft gilt daher, eine Tauchtiefe von 40 m nicht zu überschreiten, da ab dieser Tiefe mit systemischen Komplikationen zu rechnen ist [60].

Tabelle 5 gibt einen Überblick über mögliche Symptome einer Stickstoffintoxikation abhängig von der Tauchtiefe und dem dort herrschenden Partialdruck:

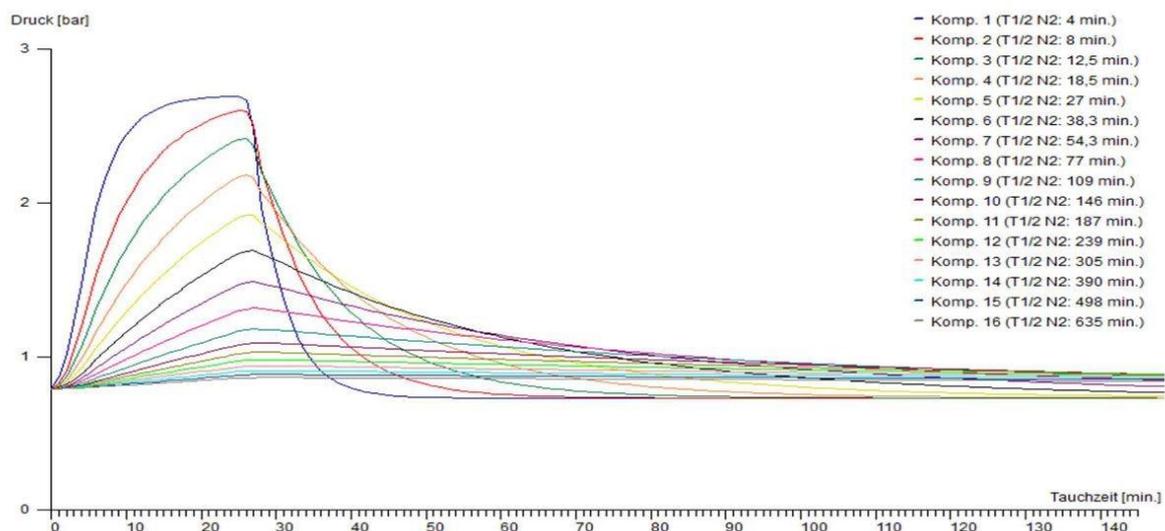
Tauchtiefe [m]	Umgebungsdruck [bar]		Stickstoff- Partialdruck [bar]	Symptome der Intoxikation
0-10	1-2		0,78 – 1,56	Symptome bleiben noch unbemerkt
10-30	>2-4		>1,56 – 3,12	leichte Beeinträchtigung des logischen Denkens
30-50	>4-6		>3,12 – 4,69	verzögerte Antwort auf visuelle und auditive Reize leichte Amnesie übermäßiges Selbstvertrauen Euphorie
50-70	>6-8		>4,69 – 6,25	Verwirrung Beeinträchtigung des Urteilsvermögens Halluzinationen verzögerte Reaktion auf Anweisungen Panikreaktionen
70-90	>8-10		>6,25 – 7,81	zunehmende Verwirrtheit Gedächtnisverlust Verlust des Urteilsvermögens
>90	>10		>7,81	gesteigerte Halluzinationen Bewusstlosigkeit Tod

**Tabelle 5:** Symptome einer Stickstoff-Intoxikation abhängig von Tauchtiefe und Partialdruck (modifiziert nach [43] aus [44,61])

### 1.2.3.1.2 Dekompressionskrankheit

Die zweite wichtige, durch Inertgase wie Stickstoff verursachte Komplikation, ist die Dekompressionskrankheit (*DCS = decompression sickness*), die zu den tauchmedizinischen Notfällen gehört und während der Auftauchphase (= Dekompressionsphase) eine Rolle spielt. Durch den Anstieg des Partialdrucks beim Abtauchen löst sich nach dem Gesetz von Henry immer mehr Stickstoff im Blut, wodurch die Differenz zwischen gelöstem N<sub>2</sub> im Blut und gelöstem N<sub>2</sub> im umliegenden Gewebe zunimmt. Dieser

Konzentrationsgradient bewirkt eine vermehrte Diffusion von Stickstoff aus dem Blut ins Gewebe, das nach und nach mit dem gelösten Gas aufgesättigt wird. Je höher dabei der Partialdruck (abhängig von der Tauchtiefe) und je länger die Zeit, in der Stickstoff mit erhöhtem Druck inspiriert wird, desto größer die Anreicherung in den verschiedenen Körperkompartimenten. Weitere wesentliche Einflussfaktoren auf das Ausmaß der Sättigung ist die Durchblutung der verschiedenen Gewebe [48,62]. So reichert sich der Stickstoff in gut durchbluteten Geweben, wie beispielsweise der Muskulatur, sehr schnell an und wird auch rasch wieder ins Blut abgegeben. Im Gegensatz hierzu wird das Fettgewebe nur sehr langsam mit Stickstoff angereichert. Aufgrund der schlechteren Durchblutung kommt es zu einer verzögerten Elimination des Stickstoffes über die Lunge [63]. Insgesamt variiert dadurch die Sättigungshalbwertszeit der verschiedenen Körpergewebe enorm von nur 1-18 min für das zentrale Nervensystem bis hin zu 305-635 min für Knochen und Gelenke [64] (Abb. 8).



**Abbildung 8:** Auf- und Entsättigung verschiedener Körperkompartimente bei einem 25-m-Tauchgang mit einer Grundzeit von 25 min. Rechts: Halbwertszeiten der einzelnen Kompartimente [65]

Beim Auftauchen reduzieren sich der Umgebungsdruck und folglich auch der inspiratorische Partialdruck des Stickstoffs, wodurch nun ein entgegengesetzter Diffusionsgradient entsteht. Es liegt eine relative Übersättigung der Körpergewebe im Vergleich zum Blut vor. Befolgt der Taucher die empfohlenen Dekompressionspausen während des Aufstiegs im Sinne sogenannter „*deep stops*“ [66] oder „*shallow stops*“ [67], taucht er also mit langsamer Geschwindigkeit über einen längeren Zeitraum auf, kann das Inertgas entlang des Konzentrationsgefälles zurück ins Blut diffundieren und zur Lunge

transportiert werden, wo es regelhaft abgeatmet werden kann (Entsättigung). Erfolgt die Druckentlastung zu schnell, entsteht eine Stickstoff-Übersättigung im Gewebe.

Da die Löslichkeit des Gases während der Druckreduktion immer weiter abnimmt, perlt das Gas aus, und es kann zur Blasenbildung in Blut und Gewebe kommen. Umso höher hierbei der Unterschied zwischen Umgebungsdruck und Partialdruck im Körper ist, umso größer ist die Übersättigung und desto mehr Gasblasen bilden sich. Die Gasblasen entstehen auf der venösen Seite und werden mit dem Blut zur Lunge transportiert und dort ausgefiltert. Bei einer großen Blasenlast kann das zu einem Anstieg des pulmonalarteriellen Druckes führen [68]. Gelangen Gasblasen in das arterielle Gefäßsystem (= *arterielle Gasembolie, AGE*), kann ein Gefäßverschluss mit konsekutiver Minderversorgung und daraus resultierendem Infarkt des nachfolgenden Gewebes die Folge sein (Myokardinfarkt, Hirninfarkt). Es wird jedoch erwähnt, dass der hier beschriebene Pathomechanismus nur in sehr seltenen Fällen ursächlich für eine arterielle Gasembolie beim Tauchen ist. Vielmehr entsteht die arterielle Gasembolie durch ein Barotrauma der Lunge, bei welchem nach einer alveolären Ruptur Luft in das pulmonalvenöse System übertritt (genauere Erläuterung im Kapitel 1.2.4.1). Bei embolischen Verschlüssen im Bereich des Rückenmarks kann es zu Lähmungserscheinungen und Parästhesien kommen. Durch Gasblasen in Körpergeweben wie Muskeln oder Gelenken, entstehen Schmerzen, die vermutlich durch mechanische Reizung und Verdrängung des Gewebes bedingt sind. Zudem kann ein Juckreiz der Haut auftreten, welcher auch unter dem Synonym „Taucherflöhe“ [51] bekannt ist [48,62,69].

#### 1.2.3.1.3 Dekompressionskrankheit des Auges

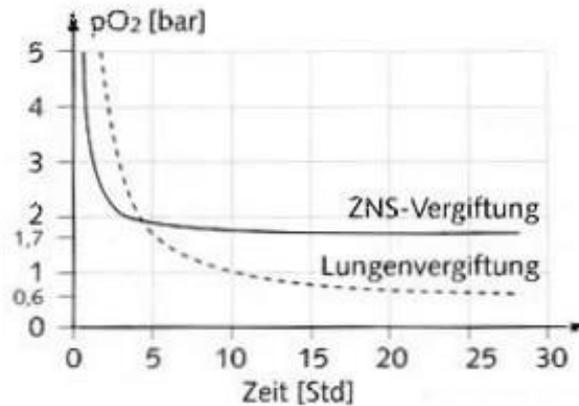
Im Jahr 1670 beschrieb Sir Robert Boyle, einer der Begründer des Boyle-Mariotte-Gesetzes, das Auftreten von Gasbläschen in der Vorderkammer der Augen einer Viper, nachdem er die Schlange unter experimentellen Bedingungen einem erhöhten Druck aussetzte [70]. Damit wurde erstmals eine okuläre Manifestation der DCS beschrieben. 1964 und 1968 wurde je eine Studie veröffentlicht, die Tauchunfälle genauer analysierten. Ihnen zufolge lag die Inzidenz einer Augenbeteiligung der untersuchten Taucher, die eine DCS erlitten, zwischen 7 und 12% [71,72]. Dabei auftretende Symptome waren Nystagmus, Diplopie, Gesichtsfeldausfälle (*Skotome*), homonyme Hemianopsie, Schmerzen im Bereich des *M. orbicularis oculi*, Insuffizienz

der Konvergenz, Zentralarterienverschluss oder eine ischämische Optikusneuropathie [73]. Einer Studie zufolge, welche die DCS bezogen auf zu schnelle Druckreduktion durch Anstieg in große Höhen untersuchte, wurden ophthalmologische Manifestationen sogar als häufigstes neurologisches Symptom der DCS beobachtet [74].

### 1.2.3.2 Komplikationen durch Sauerstoff

Sauerstoff ( $O_2$ ) ist in der Umgebungsluft zu 21% (0,21 bar auf Meereshöhe) enthalten. Ab einem bestimmten Partialdruck entwickelt auch der Sauerstoff eine toxische Wirkung. Dies geschieht jedoch erst in Tiefen jenseits der für Sporttaucher empfohlenen Maximaltiefe von 40 m. Hier gilt für den  $pO_2$  ein Grenzwert von 1,4-1,6 bar, den man in Wassertiefen von ca. 60-70 m erreichen würde. Zusätzlich zum Partialdruck spielt erneut die Expositionszeit eine wichtige Rolle [75]. Würde man reinen Sauerstoff (100%  $O_2$ ) einatmen, wäre der Partialdruck von 1,4-1,6 bar schon in 4-6 m unter der Oberfläche erreicht. Folglich ist auch bei der Benutzung von Nitrox-Gemischen die maximale, risikofreie Tauchtiefe verringert. Ein Partialdruck von 1,4 bar wird beispielsweise mit *Nitrox 32* (entspricht 32%  $O_2$ ) schon in 34 m Tiefe erreicht [51].

Hyperbarer Sauerstoff schädigt grundsätzlich jedes Gewebe, jedoch sind die Lungen sowie das zentrale Nervensystem besonders anfällig. Während das ZNS bereits nach kurzer Expositionsdauer auf oxidativen Stress reagiert ( $pO_2$  von mindestens 1,4 bar nötig), wird die Lunge schon bei niedrigerem  $pO_2$  (ab 0,6 bar), allerdings erst nach langer, beim Freizeittauchen unüblicher Expositionszeit (Stunden bis Tage), geschädigt (Abb. 9). Für Sporttaucher ist daher nur die akute ZNS-Intoxikation durch  $O_2$ , auch als *Paul-Bert-Effekt* bekannt, relevant. Eine derartige Sauerstoffvergiftung äußert sich meist ohne vorherige Früh- oder Warnzeichen als generalisierter Krampfanfall. In der Folge treten Bewusstlosigkeit und Atemstillstand auf, die im schlimmsten Fall, besonders bei Solotauchern, zum Tod durch Ertrinken führen können [51,76]. Eine  $O_2$ -Intoxikation ab  $pO_2$ -Werten  $\geq 1,4$  bar wird durch eine Hyperkapnie, Hypoglykämie und Kälte begünstigt [48].



**Abbildung 9:** Toxizität von hyperbarem Sauerstoff auf ZNS und Lunge in Abhängigkeit von pO<sub>2</sub> und Expositionszeit [77]

### 1.2.3.3 Komplikationen durch Kohlenstoffdioxid

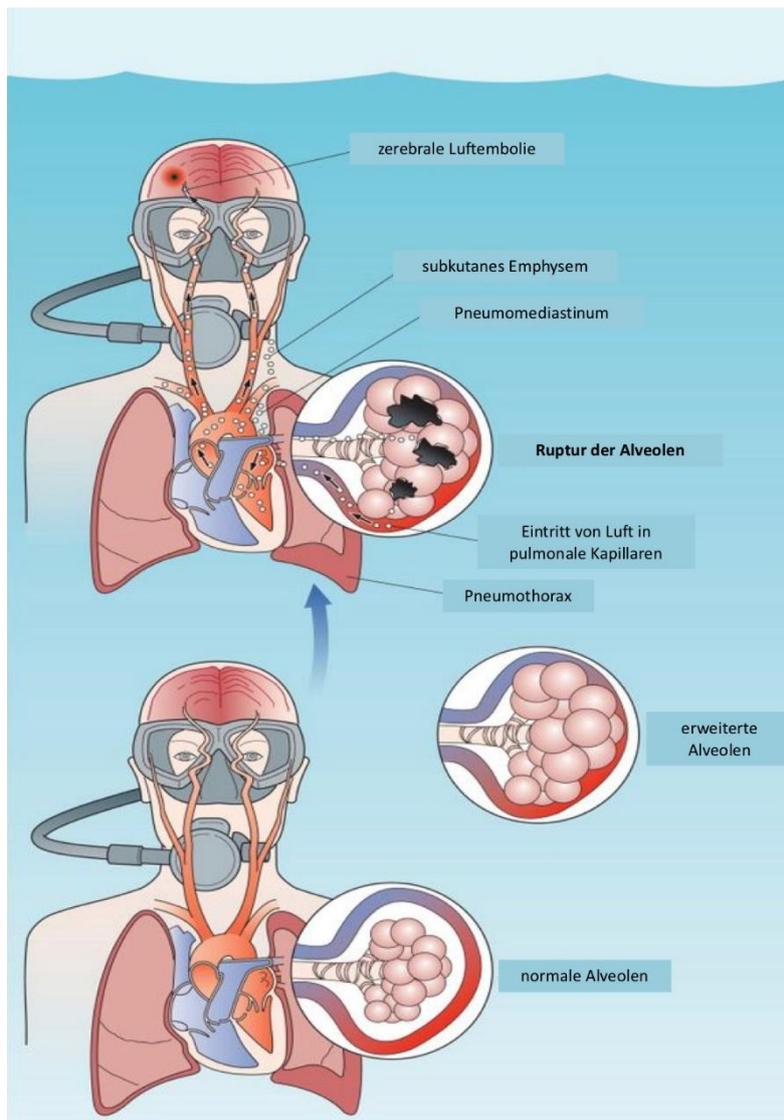
Die Probleme, die durch vermehrtes Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) (=Hyperkapnie) hervorgerufen werden, entstehen meist durch ein Fehlverhalten des Tauchers. Nach einer weit verbreiteten Meinung ist ein geringer Luftverbrauch während eines Tauchgangs ein Zeichen für große Taucherfahrung. Dieser Irrglaube weckt bei vielen Tauchern den Wunsch, den Atemgasverbrauch so gering wie möglich zu halten. Dies verleitet zu der Annahme, dass unter Wasser spezielle luftsparende Atemtechniken angewendet werden müssen. Folglich kommt es zu einer mangelnden Ventilation und einer damit einhergehenden inadäquaten Abatmung des anfallenden CO<sub>2</sub>, das somit unzureichend eliminiert wird und oft noch während des Tauchgangs einen dumpfen anhaltenden Kopfschmerz induziert, der schlecht auf Medikamente anspricht, jedoch selbstlimitierend ist. Im schlimmsten Fall kann es zu Übelkeit und Erbrechen kommen während sich der Taucher noch unter Wasser befindet, was zu unkontrollierten Panikreaktionen führen kann [48]. Zudem können äußere Faktoren einen Anstieg des CO<sub>2</sub> bedingen. Hierzu zählen beispielsweise ein enger Tauchanzug, ein zu schwerer Bleigürtel, starke Strömung, Kälte und die erhöhte Gasdichte in der Tiefe. All diese Umstände können in einer vermehrten körperlichen Belastung und/oder einer verstärkten Atemarbeit mit konsekutiver Ermüdung der Atemmuskulatur resultieren. Die Konsequenz des erhöhten Atemwiderstands ist eine zunehmend flache Atmung mit erhöhter Atemfrequenz, die zu einer Hyperkapnie führt [78].

## 1.2.4 Druckbedingte Komplikationen

Ein Barotrauma ( $\beta\alpha\rho\sigma$ : Druck und  $\tau\rho\alpha\nu\mu\alpha$ : Schaden) kann immer dann auftreten, wenn es zu Druckdifferenzen zwischen dem Umgebungsdruck und dem aktuell im Körper herrschenden Druck kommt. Beim Tauchen ist dies während des Abtauchens (*Kompressionsphase*) und des Auftauchens (*Dekompressionsphase*) der Fall. Bei der Entstehung derartiger Schädigungen spielt das Gesetz von Boyle und Mariotte die Hauptrolle [48].

### 1.2.4.1 Dekompressionsbedingtes Barotrauma (Überdruckbarotrauma)

Bei einem Überdruckbarotrauma kommt insbesondere die Lunge zu Schaden (*pulmonales Barotrauma, PBT*). In der Auftauchphase dehnt sich die Luft in der Lunge nach dem Boyle-Mariotte'schen Gesetz aus (Abb. 6), was im Regelfall zu keinen Komplikationen führt, wenn beim Auftauchen kontinuierlich normal abgeatmet wird. Im Falle eines Notaufstiegs, bei dem bewusst oder unbewusst die Luft angehalten wird oder bei Auftreten eines Laryngospasmus, der beispielsweise durch die ungewollte Aspiration von Wasser(tropfen) verursacht wird, können die sich ausdehnenden Atemgase nicht entweichen. Das Resultat ist eine Überblähung der Lunge, die zu Rissen im alveolären Gewebe führt. Pleuranahe Risse des Lungenparenchyms können einen (Spannungs-)Pneumothorax verursachen, der potentiell lebensbedrohlich ist. Rupturiert das Alveolargewebe nahe dem Lungenhilus, ist die Folge ein Mediastinalemphysem und/ oder ein subkutanes Emphysem. Außerdem besteht bei zeitgleicher Ruptur von Pulmonalvenen die Gefahr des Übertritts von Gas in das Gefäßsystem, wodurch Luft in das linke Herz gelangt und von dort in die Peripherie verschleppt wird. Die Konsequenz ist eine arterielle Gasembolie mit konsekutiven Infarkten, wie sie seltener auch durch Inertgas-Bläschen im Rahmen der Dekompressionskrankheit vorkommt. Grundsätzlich kann jede der genannten Folgen der Überdehnung der Lunge separat oder in Kombination auftreten [48,79].



**Abbildung 10:**  
Folgen der Überdehnung  
der Lunge im Rahmen der  
Dekompressionskrankheit  
(modifiziert nach [80])

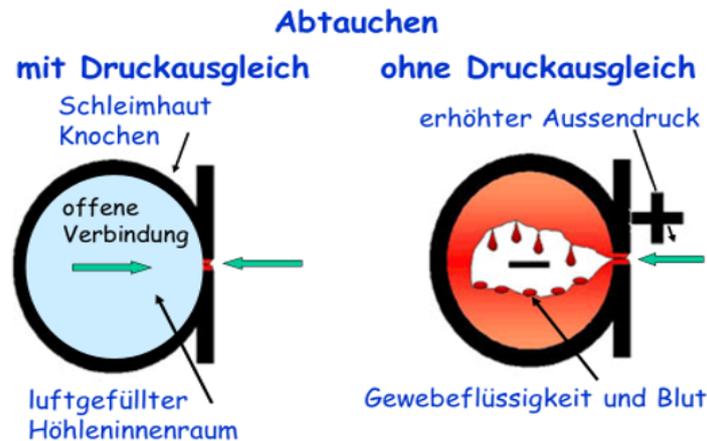
Es wird darauf aufmerksam gemacht, dass das pulmonale Barotrauma unabhängig von der Tauchtiefe auftreten kann. Bei falscher Atmung oder beim Luftanhalten besteht das Risiko für ein PBT bereits beim Auftauchen aus 1-2 m Tiefe [51]. Unter experimentellen Bedingungen kam es bereits ab einer intrapulmonalen Druckerhöhung von etwa 0,1 bar zu Gewebsrupturen der Lunge [81].

#### 1.2.4.2 Kompressionsbedingtes Barotrauma (Unterdruckbarotrauma)

Unterdruckbarotraumata betreffen luftgefüllte Hohlräume des Körpers, insbesondere die Nasennebenhöhlen und das Mittelohr, wobei auch Zähne mit beschädigter Füllung betroffen sein können. Vor allem innerhalb der ersten 10 m des Tauchgangs, wenn

sich der Umgebungsdruck verdoppelt und sich damit das Volumen luftgefüllter Räume halbiert, entsteht in den gasgefüllten Körperhöhlen ein relativer Unterdruck.

Der Druckausgleich in den Nasennebenhöhlen geschieht im Normalfall automatisch, da sie eine offene knöcherne Verbindung zur Nasenhöhle haben. Hier kommt es nur dann zu Problemen, wenn diese Ostien beispielsweise wegen einer Sinusitis oder Polypen verschlossen sind. Beim Mittelohr muss der Taucher für einen aktiven Druckausgleich sorgen, indem er entweder das Valsalva-Manöver durchführt (Druckerhöhung im Nasenrachenraum) oder die Gaumenmuskulatur durch Schlucken oder Gähnen anspannt. Beide Vorgehensweisen führen zur Öffnung der Eustachischen Röhre, worüber der Druck ausgeglichen wird. Aus einem Verschluss der Ostien zur Nase oder der Eustachischen Röhre oder aus einem nicht rechtzeitig oder gar nicht durchgeführten aktiven Druckausgleich resultiert zunächst ein Schleimhautödem. In der Folge kommt es zu einem blutig-serösen Erguss im betroffenen Hohlraum. Hierdurch wird eine Volumenverkleinerung des Hohlraumes geschaffen, die den fehlenden Druckausgleich ersetzen soll (Abb. 11) [48,82]. Dieses pathomorphologische Erscheinungsbild wird als Barotrauma der Kompressionsphase bezeichnet [48,51].



**Abbildung 11:** Schematische Darstellung eines Unterdruckbarotraumas [83] (modifiziert nach Prof. Schipke)

### 1.2.4.3 Barotrauma des Auges

Eine Sonderform des Unterdruckbarotraumas ist das Barotrauma des Auges und der umgebenden Gesichtshaut. Es wird durch den fehlenden Druckausgleich zwischen der luftgefüllten Tauchermaske und der Umgebung hervorgerufen. Der alleinige Anstieg

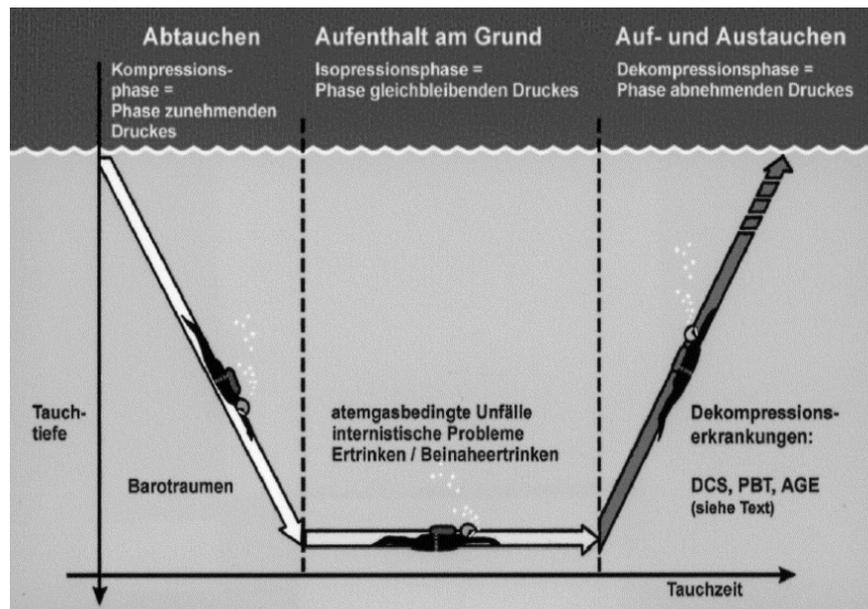
des Umgebungsdrucks sollte allerdings auf ein gesundes Auge als flüssigkeitsgefülltes und daher inkompressibles Organ keinen Einfluss haben. Durch den lokal wirkenden Unterdruck kommt es aber zu flächenhaften Einblutungen in die Bindehaut (= *Hyposphagma*) und subkutanen periokulären Blutungen (Abb.12). Dieses klinische Bild, das oft sehr beeindruckend erscheint, jedoch unbedenklich ist und auch ohne Therapie folgenlos abheilt, bezeichnet man als „mask squeeze“ [84]. In sehr ausgeprägten Fällen kann es zu subperiostalen Einblutung der Orbita kommen [85–87]. Entsprechend der Literatur [88–91] sind von einem solchen Zwischenfall, der durch einfache Anweisungen leicht zu vermeiden ist, hauptsächlich Tauchanfänger betroffen [92].



**Abbildung 12:** *Hyposphagma* [93]

Außerdem ist Vorsicht vor allem beim Tauchen mit einer Schwimmbrille geboten, da bei dieser aufgrund einer fehlenden Verbindung zur Nase kein Druckausgleich möglich ist. Gänzlich zu vermeiden wäre ein okulares Barotrauma, indem keine Tauchermaske oder Schwimmbrille verwendet wird. Da aufgrund des unterschiedlichen Brechungsindex von Wasser und Luft unter Wasser nur verschwommen gesehen werden kann, wurden spezielle Unterwasserkontaktlinsen entwickelt, die eine Stärke von -230 Dioptrien (dpt) besitzen und scharfes Sehen im Wasser ermöglichen. Tests, die mit Prototypen dieser Linsen von Extrem-Apnoetauchern durchgeführt wurden, waren zunächst erfolgreich, wobei der Entwickler dieser Kontaktlinse, Rainer Holland, selbst sagte: „Es ist mit Sicherheit keine Linse, die die Tauchmaske ersetzen wird“ [94]. Inzwischen wurde die Produktion wieder eingestellt [92,94].

Abschließend fasst Abbildung 13 die verschiedenen Phasen eines Tauchgangs zusammen und führt die phasenabhängigen typischen Veränderungen mit ihren Leiterkrankungen und Unfallmechanismen auf.



**Abbildung 13:** Schematische Darstellung eines Tauchprofils mit den wichtigsten Veränderungen und jeweiligen Leiterkrankungen und Unfallmechanismen. (modifiziert nach [95] aus [79])  
(DCS = decompression sickness; PBT = pulmonales Barotrauma; AGE = arterielle Gasembolie).

### 1.3 Ziel der Studie

In der augengesunden Bevölkerung werden IOD-Schwankungen bis zu  $\pm 5,5$  mmHg als normaler Schwankungsbereich angesehen. Darüber hinausgehende Schwankungen gelten als pathologisch und sind bei gleichzeitig bestehendem Glaukom ein Risikofaktor für die Progression der Erkrankung.

Ziel der Studie war es, den IOD im Rahmen von SCUBA-Tauchgängen bei ophthalmologisch gesunden Personen zu erfassen, um eine Einschätzung des Gefährdungspotentials von Glaukom-Patienten zu erhalten, die diese Sportart ausüben möchten. Es bestand die Hypothese, dass Urlaubstauchgänge nicht zu nennenswerten Erhöhungen oder Schwankungen des IODs führen.

## 2 Teilnehmer, Material und Methoden

### 2.1 Teilnehmer

Ziel war es, 15-30 Urlaubstaucherinnen und -taucher im Alter zwischen 18 und 75 Jahren, welche sich im Januar 2014 auf dem Tauchschiiff „Amba“ im indischen Ozean (Malediven) befanden, für die Studie zu rekrutieren. Von 17 freiwilligen Teilnehmern konnten letztlich Daten von 16 Personen in vollem Umfang ausgewertet werden. Alle Teilnehmer stammten aus dem deutschsprachigen Raum (Deutschland und Österreich). Zudem handelte es sich ausschließlich um erfahrene Taucher, die mindestens die Tauchscheinklassen (Brevetierung) *open water* oder *advanced open water* (nach PADI) vorweisen konnten.

Das Risiko einer Verletzung oder eines Verunfallens während des Tauchganges trug alleine der Urlaubsgast, da dieser selbst entschied, ob und wann er einen Tauchgang durchführen wollte. Eine Haftung bei Verunfallen konnte nicht übernommen werden, da die Tauchgänge primär nicht wegen der Studie erfolgten. Jeder Urlaubsgast, der einen Tauchgang durchführte, konnte jedoch seinen Augeninnendruck (IOD) vor und nach dem Tauchgang bestimmen lassen. Das Vorhaben wurde von der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der *Julius-Maximilians-Universität Würzburg* genehmigt.

#### 2.1.1 Rekrutierung

Die Rekrutierung der Urlaubstaucher erfolgte direkt und ausschließlich auf dem Tauchschiiff „Amba“ im Rahmen einer Präsentation des Studienprojekts zu Beginn der Tauchsafari. Bei Interesse an der Teilnahme wurden die Einverständniserklärung, die Patienteninformation und ein Fragebogen zur ophthalmologischen, allgemeinmedizinischen und tauchspezifischen Tauglichkeit ausgehändigt. Ungeklärte Fragen konnten im persönlichen Gespräch geklärt werden.

Die Teilnahme an der Studie war freiwillig. Die Einwilligung konnte jederzeit, ohne Angabe von Gründen und ohne Nachteil für die Probanden widerrufen werden. Bei einem Widerruf wurden alle elektronischen Daten gelöscht und die schriftlichen Dokumente vernichtet, jedoch nicht an die Teilnehmer übergeben. Die personen-

bezogenen Daten sowie die ophthalmologischen Daten wurden auf dem eigenen Laptop gespeichert.

### **2.1.2 Ein- und Ausschlusskriterien**

Alle Taucher, die sich im Januar 2014 innerhalb eines zweiwöchigen Aufenthaltes der Studienleiterin (Dr. med. Anne-Kathrin Brebeck) auf dem Tauchschiff „Amba“ auf den Malediven befanden und mit der Teilnahme an den Untersuchungen einverstanden waren, konnten an der Studie teilnehmen. Weitere Voraussetzungen waren eine gültige tauchsportärztliche Untersuchung, Volljährigkeit und eine leere Glaukom-Anamnese.

Personen, die das 18. Lebensjahr noch nicht erreicht hatten und alle Urlaubsgäste des Tauchschiffes, welche keine Tauchgänge durchführten, konnten nicht an der Studie teilnehmen. Weiter ausgeschlossen wurden Personen mit Glaukom. Bei Personen mit anderen ophthalmologischen Vorerkrankungen musste in der Einzelfallprüfung die Teilnahmefähigkeit bestimmt werden. 15 der 16 Studienteilnehmer waren, abgesehen von einer eventuellen Fehlsichtigkeit, weder ophthalmologisch vorerkrankt noch voroperiert und damit augengesund. Ein Proband konnte nach genauer Untersuchung des Auges trotz Voroperation aufgrund einer Amblyopie auch in die Studie eingeschlossen werden, da keine Auswirkungen auf die geplanten Messungen zu erwarten waren.

### **2.1.3 Tauchgänge**

Das Tauchschiff „Amba“ kreuzt im Nord-Malé-Atoll der Malediven im Indischen Ozean (4° 25' N, 73°30' O). Während der Zeit des Projekts (Januar 2014) herrschten im Nord-Malé-Atoll stets stabile Umgebungsbedingungen. Das Wetter war gleichbleibend sonnig bei täglich ca. 32 °C. Die Wassertemperaturen betragen etwa 27 °C.

Grundsätzlich wurden Tauchgänge zu verschiedenen Tageszeiten angeboten. Ein Tauchgang konnte morgens (ca. 7.00-8.00 Uhr), mittags (ca. 11.00-12.00 Uhr), nachmittags (ca. 14.00-15.00 Uhr) oder nachts (ca. 18.00-19.00 Uhr) durchgeführt werden. Die von den Testpersonen durchgeführten Tauchgänge führten auf Tiefen von

15 bis 35 m und dauerten durchschnittlich ca. 50 min. Tendenziell waren die morgendlichen Tauchgänge am tiefsten, die Nachttauchgänge am wenigsten tief.

Getaucht wurde entweder mit Luft oder Nitrox32, einem Gasgemisch mit 32% Sauerstoff und 68% Stickstoff.

## 2.2 Ophthalmologische Messungen

Da sich die Studie ausschließlich auf die Augeninnendruck- und Hornhautdickenmessung bezog, wurde keine vollständige augenärztliche Untersuchung durchgeführt. Eine Erweiterung der Pupille zur weiteren Diagnostik wurde nicht vorgenommen. Die Untersuchung ersetzte daher keinesfalls eine augenärztliche Kontrolle. Des Weiteren wurden keine Medikamente oder Therapien empfohlen oder gar verordnet. Bei Auffälligkeiten konnte lediglich ein Hinweis zur weiteren Abklärung gegeben werden.

### 2.2.1 Messung der Hornhautdicke (Pachymetrie)

Die Cornea ist meniskusförmig aufgebaut. Ihre normale Dicke liegt zwischen 0,52 mm (520  $\mu\text{m}$ ) im Zentrum und 0,66 mm (660  $\mu\text{m}$ ) in der Peripherie [6]. Der als „normal“ bezeichnete Wert der Hornhautdicke eines gesunden Auges wurde von Doughty und Zaman mit 534  $\mu\text{m}$  angegeben. Durchschnittswerte der Pachymetrie mittels Spaltlampe und mittels Ultraschall liegen bei 530  $\mu\text{m}$  bzw. 544  $\mu\text{m}$  [96]. In der großen OHTS-Studie von Brandt et al., in welcher 1300 Personen untersucht wurden, zeigte sich in der Ultraschall-Pachymetrie ein etwas höherer durchschnittlicher Wert von 573  $\mu\text{m}$  [97].

In der Praxis wird von einem Normwert von 550  $\mu\text{m}$  ausgegangen, der besonders in der Glaukomdiagnostik in Zusammenschau mit dem IOD eine Rolle spielt. So muss der intraokulare Druck je nach Hornhautdicke ausgehend von 550  $\mu\text{m}$  nach oben oder unten korrigiert werden, um falsch hohe oder niedrige Innendruckwerte zu vermeiden. Genauere Erläuterungen hierzu finden sich im Kapitel 2.2.2.

Die Pachymetrie (von altgriechisch *pachýs* = „dick“, *métron* = „Maß“ [98]) ist eine schmerzlose Kurzkontakt-Methode, bei der die Hornhautdicke durch mehrere aufeinander folgende Messungen festgestellt wird. In dieser Studie wurde der Pachymeter *Pocket II™* (Quantel Medical, Clermont-Ferrand, Frankreich) verwendet. Bei dem

*Pocket II™* handelt es sich um ein CE-zertifiziertes, tragbares Messgerät, das in der Augenheilkunde insbesondere zur Prognose und Verlaufskontrolle eines Glaukoms zum Einsatz kommt. Die Messungen erfolgten mittels einer 20 MHz Ultraschallsonde. Um einen validen Wert zu erhalten, müssen im verwendeten Standardprogramm des Gerätes fünf Einzelmessungen erfolgen, die anschließend automatisch gemittelt werden [99]

Die Messung der zentralen Hornhautdicke wurde an Bord des Tauchschiffs (Amba) durchgeführt, welche innerhalb des Atolls vor Anker lag, wodurch Wellengang die Messungen der Hornhautdicke nicht beeinflussen konnte. Pro Teilnehmer wurde die Hornhautdicke jedes Auges lediglich ein einziges Mal vor dem allerersten Tauchgang der Tauchsafari gemessen. Der Teilnehmer befand sich dabei in sitzender Position.

Für die Bestimmung der Hornhautdicke beider Augen wurde eine Zeitspanne von ca. 5-10 min pro Person veranschlagt. Jede Messung wurde von der Versuchsleiterin durchgeführt. Die Ultraschallsonde des Pachymeters wurde jeweils am zentralsten Punkt der Cornea angesetzt. Die Augen der Probanden mussten zur besseren Compliance mit Conjunccain® Augentropfen betäubt werden. Dies ist ein in der Augenheilkunde gängiges lokales Anästhetikum mit einer Wirkdauer von 20-30 min [100]. Für jeden Probanden wurde hierfür eine eigene Einmalophthiole verwendet und anschließend verworfen. Die Sonde des Pocket Pachymeters wurde nach jedem Probanden gründlich desinfiziert, um auch hier eine Keimübertragung zu verhindern und das Infektionsrisiko zu minimieren.

### **2.2.2 Messung des Augeninnendrucks (Tonometrie)**

Die Tonometrie (von griechisch *tónos* = „Druck, Spannung“; *métron* = „Maß“ [101]) ist die Bestimmung des IODs. Hierbei wird entweder mechanisch (z.B. Goldmann-Tonometrie, Icare Rebound-Tonometrie) oder über einen Luftimpuls (z.B. Non-Contact-Tonometrie) Druck auf die Cornea ausgeübt.

Die Bestimmung des intraokularen Drucks fand mit dem tragbaren CE-zertifizierten Tonometer *Icare® PRO* (Icare Finland Oy, Espoo, Finnland) statt, dessen Funktionsgrundlage auf dem sogenannten Rebound-Prinzip basiert. Dabei wird ein Plastikkopf 3-7 mm vor der Hornhaut positioniert. Bei Auslösen der Messung erfolgt ein extrem kurzer Kontakt des Plastikkopfes mit der Hornhaut, wodurch diese eingedrückt wird

und der Kopf zurückprallt (rebound). Aus der nötigen Abbremsgeschwindigkeit des Rückpralls ermittelt das Gerät den Augeninnendruck. Um ein valides Endergebnis zu erhalten, müssen im verwendeten Standardprogramm des Gerätes sechs aufeinanderfolgende Einzelmessungen durchgeführt werden, die am Ende automatisch gemittelt werden und so den Augeninnendruck ergeben. Bei dem Plastikkopf handelt es sich um ein Einmalprodukt, das nach jedem Probanden ausgewechselt wird, um das Infektionsrisiko zu reduzieren. Zusätzlich zum Endergebnis des IOD wird eine Zuverlässigkeitsangabe in Form eines farblich gekennzeichneten numerischen Wertes angezeigt. Besteht kein großer Unterschied der sechs Einzelmessungen zueinander, erscheint der Wert der Abweichung in Grün, bei etwas höheren Unterschieden in Gelb. Ist der Unterschied zu groß, wird die Abweichung in Rot angezeigt und eine Wiederholung der Messung empfohlen [102]. Um bestmögliche Resultate zu erhalten, wurden in dieser Studie ausschließlich in Grün angezeigte Ergebnisse verwendet. Eine Messwiederholung erfolgte sowohl bei gelber als auch bei roter Anzeige. Eine Zeitverzögerung entstand dadurch nicht. Da alle Teilnehmer des Projekts eine gesunde Hornhaut ohne vorangegangene Traumata oder Operationen aufwiesen, die zu Narbenbildung führen könnten, existierten keine Störgrößen, die die Messungen mit dem Icare *PRO*-Tonometer beeinträchtigt hätten. Auch aufgrund der Hornhautdicken, die alle in einem mit anderen Studien vergleichbaren Bereich von 500  $\mu\text{m}$  bis 600  $\mu\text{m}$  lagen, war kein deutlicher Messfehler des Geräts zu erwarten.

Die Icare Rebound-Tonometrie ist eine nichtinvasive Untersuchung, die vollkommen schmerzfrei ist [103] und das Sehen nicht beeinträchtigt. Durch die Messung entstehen keine Risiken, da weder Augentropfen verwendet werden, noch ein Lokalanästhetikum nötig ist, was der große Vorteil dieses Messverfahrens ist [104]. Durch einen integrierten Neigungssensor sind die Messungen nicht nur in aufrechter Körperposition, sondern auch in Rücken- oder Seitenlage möglich [102].

Verglichen mit dem Goldstandard, der Applanationstonometrie nach Goldmann (GAT), wird die Messgenauigkeit des Icare Tonometers vom Hersteller mit  $\pm 2,8$  mmHg im IOD-Bereich von 5-30 mmHg und mit  $\pm 15$  mmHg im IOD-Bereich  $>30$  mmHg angegeben.

Die Tonometrie fand, anders als die Pachymetrie, nicht auf dem Tauchschiß (Amba) selbst, sondern auf dem Tauch-Boot („Diving Dhony“) statt, mit dem die Taucher inklusive ihrer Ausrüstung zum Ausgangspunkt des Tauchgangs gebracht werden. Der

Augeninnendruck sollte dabei so zeitnah wie möglich direkt vor dem Tauchen und innerhalb eines Zeitraumes von maximal zehn Minuten nach dem Auftauchen bestimmt werden. Für jede Augeninnendruckmessung wurden jeweils ca. 1-3 min vor und nach dem Tauchgang benötigt. Alle Messungen wurden von der Versuchsleiterin ausgeführt.



**Abbildung 14:** Durchführung der Tonometrie auf dem Tauch-Boot („Diving Dony“)

Sie fanden in annähernd aufrecht sitzender Position der Probanden und kniender Position des Untersuchers statt. Das Icare Tonometer wurde dabei zur Messung des jeweiligen Auges gerade vor den Probanden gehalten. Mit der freien linken Hand wurde gleichzeitig das Gesicht des Probanden stabilisiert und mit den Fingern die Augenlider so fixiert, dass störendes Zwinkern beinahe vollständig verhindert werden konnte. Dabei wurde genau darauf geachtet, dass nicht auf das fixierte Augenlid des Probanden gedrückt wurde um die Werte nicht zu verfälschen.

Im Verlauf der Studie wurde bei einigen Probanden nicht nur der IOD innerhalb der ersten zehn Minuten nach dem Tauchgang bestimmt, sondern es fanden eine oder sogar zwei spätere Messungen statt. Die erste zusätzliche Messung wurde 30 min und die zweite 60 min nach dem Auftauchen durchgeführt. Mit Hilfe dieser beiden Druckwerte sollte eine Prognose darüber abgegeben werden, wie sich der IOD im späteren Verlauf nach einem Tauchgang verhält, und ob möglicherweise Veränderungen des

IODs bestehen bleiben. Bei 13 der 16 Teilnehmer wurde je ein 30-min-Wert bestimmt. Bei fünf dieser 13 Teilnehmer wurde der 30-min-Wert nach zwei unterschiedlichen Tauchgängen gemessen. Insgesamt wurden somit 18 30-min-Werte aufgezeichnet. Bei vier der 13 Teilnehmer wurde ein zusätzlicher 60-min-Wert gemessen.

### **2.2.3 Messungen des linken Auges**

Bei der Durchführung der Studie wurde stets der IOD beider Augen vor und nach den Tauchgängen bestimmt. Zwar beziehen sich alle bisher genannten und kommenden Ergebnisse allein auf das rechte Auge, dennoch wurden auch die Daten des linken Auges ausgewertet, um die Methodik abzusichern.

## **2.3 Datenerfassung**

### **2.3.1 Soziodemographische Daten**

Zunächst wurden die personenbezogenen Daten wie Geschlecht, Alter, Größe und Gewicht aufgenommen. Anschließend wurde die Taucherfahrung anhand der Anzahl aller bisher durchgeführter Tauchgänge und der Tauchjahre dokumentiert. Als Tauchjahr galt dabei jedes Jahr, in dem mindestens ein Tauchgang durchgeführt wurde.

Um einen Überblick über den gesundheitlichen Zustand der Teilnehmer zu erhalten, mussten diese einen Anamnesebogen ausfüllen, auf welchem die wichtigsten internistischen Erkrankungen, wie arterieller Hypertonus, abgelaufene Myokard- oder Hirninfarkte, Diabetes mellitus, Asthma, Erkrankungen der Schilddrüse und Allergien explizit abgefragt wurden. Zudem mussten die Probanden regelmäßig eingenommene Medikamente angeben, um Rückschlüsse auf weitere eventuell vorhandene Erkrankungen ziehen zu können.

Die augenspezifische Eigen- und Familienanamnese erfolgte ebenfalls über den Fragebogen. Hier wurde ausdrücklich nach einer Glaukomerkrankung gefragt, da diese ein Ausschlusskriterium aus dem Projekt gewesen wäre. Zudem wurde nach vorangegangenen augenspezifischen Operationen oder Laserbehandlungen, nach stattgefundenen Traumata oder Entzündungen der Augen, nach dem Vorhandensein einer Amblyopie und/oder einer Diplopie sowie nach dem Vorhandensein von Meta-

morphopsien (subjektive Sehstörungen mit verzerrter Wahrnehmung) und regelmäßigen Kopfschmerzen gefragt. Auch hier wurde eine eventuelle regelmäßige ophthalmologische Medikation dokumentiert. Jegliche Art von Fehlsichtigkeit (Myopie, Hyperopie, Presbyopie) und das Tragen von Kontaktlinsen wurden notiert.

### **2.3.2 Pseudonymisierung der Daten**

Jedem Studienteilnehmer wurde in einer Stammdatentabelle eine Zahl zugeordnet, wobei es sich weder um Buchstabeninitialen noch um das Geburtsdatum handelte. Es erfolgte somit eine Pseudonymisierung, die keinerlei Rückschlüsse auf die einzelnen Studienteilnehmer zuließ. Diese Stammdatentabelle wurde getrennt von der Datentabelle, die ausschließlich mit der zugeordneten Zahl arbeitete, aufbewahrt. Ebenso ist in allen weiteren Untersuchungsunterlagen, egal ob in schriftlicher oder elektronischer Form vorliegend, nur das Pseudonym des Studienteilnehmers zu finden.

Die Einverständniserklärungen wurden von der Hauptprojektleiterin, Dr. med. Anne-Kathrin Brebeck sicher verschlossen und getrennt von den pseudonymisierten Dokumenten aufbewahrt. Damit lag eine klare Trennung zwischen den personenbezogenen Daten, wie Name und Geburtsdatum, die ausschließlich in der Einverständniserklärung aufgenommen wurden, und den erhobenen Daten aus den Befragungen und Untersuchungen vor.

Zu den pseudonymisierten Daten hatten nur Projektbeteiligte Zugriff. Die Daten wurden nach Beendigung der Studie in pseudonymisierter Form ausgewertet und werden mindestens zehn Jahre gespeichert, um einen Vergleichsdatensatz für eventuelle Nachauswertungen oder eine Wiederholung der Studie vorlegen zu können.

## 2.4 Statistik

Die statistischen Analysen erfolgten mit SPSS (IBM SPSS Statistics 20.0, Armonk, NY, USA). Das Signifikanzniveau wurde bei allen Tests auf  $\alpha = 0,05$  festgelegt. Unterschiede wurden bei einem  $p \leq 0,05$  als statistisch signifikant betrachtet.

Der Vergleich des IOD vor und nach dem Tauchen wurde mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Test durchgeführt. Dieser nicht-parametrische Test ist eine Alternative zu parametrischen Tests wie dem t-Test, wenn die Voraussetzungen für diesen nicht gegeben sind. Um den t-Test anwenden zu können, müssten die Daten normalverteilt sein oder die Stichprobengröße müsste  $\geq 30$  sein. Jedoch ist die Power parametrischer Tests, eine Abweichung bei kleiner Stichprobengröße aufzudecken, auch im Falle einer Normalverteilung als sehr gering einzustufen. Daher wurde in dieser Studie, welche lediglich mit einer Stichprobengröße von  $N = 16$  arbeitet, *per se* ein nicht-parametrisches Verfahren gewählt.

Nullhypothese ( $H_0$ ) und Alternativhypothese ( $H_1$ ) wurden wie folgt festgelegt:

$$H_0: \text{IOD (vor dem Tauchen)} = \text{IOD (10 min nach dem Tauchen)}$$

$$H_1: \text{IOD (vor dem Tauchen)} \neq \text{IOD (10 min nach dem Tauchen)}$$

Zur Untersuchung eventueller Einflussgrößen (Hornhautdicke, Größe, Gewicht, Taucherfahrung) wurde die Korrelation nach Spearman (Spearman's  $\rho$ ) verwendet. Nullhypothese ( $H_0$ ) und Alternativhypothese ( $H_1$ ) bezüglich des Spearman-Korrelationskoeffizienten ( $\rho$ ) wurden wie folgt festgelegt:

$$H_0: \rho = 0 \quad \rightarrow \text{Annahme, wenn } p > 0,05$$

$$H_1: \rho \neq 0 \quad \rightarrow \text{Annahme, wenn } p \leq 0,05$$

Der Spearman-Korrelationskoeffizient nimmt dabei Werte zwischen -1 und +1 an, wobei die Stärke der Korrelation mit folgenden Werten festgelegt wurde:

$$|\rho| \approx 0,1: \text{geringe Korrelation,}$$

$$|\rho| \approx 0,3: \text{mittlere Korrelation,}$$

$$|\rho| \approx 0,5: \text{starke Korrelation.}$$

## 3 Ergebnisse

Alle Analysen bezogen sich nur auf das rechte Auge. Ein Teilnehmer (Proband 10) konnte aufgrund der fehlenden Werte für den Augeninnendruck (IOD) zehn Minuten nach dem Tauchgang in der Statistik nicht berücksichtigt werden. Somit beträgt die Stichprobengröße bei allen Analysen  $N = 16$ . Jeder einzelne der 16 Probanden führte insgesamt sechs Tauchgänge durch. Es konnten somit 96 Tauchgänge ausgewertet werden.

Aus sprachlichen Gründen wird im weiteren Text darauf verzichtet, den genauen Zeitpunkt der Augeninnendruckmessung nach dem Tauchgang (= zehn Minuten nach dem Auftauchen) anzugeben. Es wird also nur von 'vor und nach dem Tauchgang' die Rede sein.

### 3.1 Allgemeine deskriptive Analyse

#### 3.1.1 Geschlechter- und Altersverteilung der Teilnehmer

Die 16 Teilnehmer, davon fünf Frauen, waren im Durchschnitt  $55,3 \pm 11,6$  (Mittelwert  $\pm$  SD) Jahre alt. Die Spannweite betrug 29 bis 68 Jahre. Bezogen auf den Altersdurchschnitt waren sechs Personen (37,5%)  $\leq 55$  Jahre und zehn Personen (62,5%)  $> 55$  Jahre.

#### 3.1.2 Anamnesebogen

Die Auswertung des Anamnesebogens ergab folgendes Bild: Acht Teilnehmer (50,0%) gaben an, vollkommen gesund zu sein. Vier Teilnehmer (25,0%) gaben einen Bluthochdruck (arterielle Hypertonie) und drei Teilnehmer (18,8%) eine Schilddrüsenunterfunktion an. Ein Teilnehmer (6,3%) hatte bereits einen Myokardinfarkt als Folge eines Hypertonus erlitten. Alle acht Erkrankten (50,0%) führten eine regelmäßige auf ihre Erkrankung abgestimmte Medikamenteneinnahme auf. Drei Teilnehmer gaben eine Allergie an (im Detail: Pollen, braunes Pflaster, Öl).

Der ophthalmologische Status war wie folgt: Der Großteil der Studienteilnehmer (87,5%) zeigte sich augengesund, lediglich einer gab einen stattgehabten Zentral-

venenverschluss rechts an, und ein weiterer wurde wegen einer Amblyopie bereits zweimal operiert. Ähnliche Verhältnisse zeigten sich bezüglich der familiären Vorbelastung: 75,0% boten eine leere Familienanamnese, zwei Teilnehmer (12,5%) berichteten über Familienmitglieder mit Grauem Star (*Katarakt*) und je ein Teilnehmer gab an, Familienangehörige zu haben, die an einem Glaukom oder einer Retinitis pigmentosa erkrankt waren. Von einer Fehlsichtigkeit waren mit insgesamt 81,3% weit-aus mehr Probanden betroffen. Zwei (12,5%) wiesen eine Myopie auf, neun (56,3%) eine Hyperopie oder Presbyopie, einer (6,3%) führte die Kombination aus Kurz- und Weitsichtigkeit auf. Ein weiterer (6,3%) gab an, an einer Amblyopie zu leiden. Nur drei Teilnehmer (18,8%) waren uneingeschränkt sehfähig.

### 3.1.3 Tageszeiten der Tauchgänge

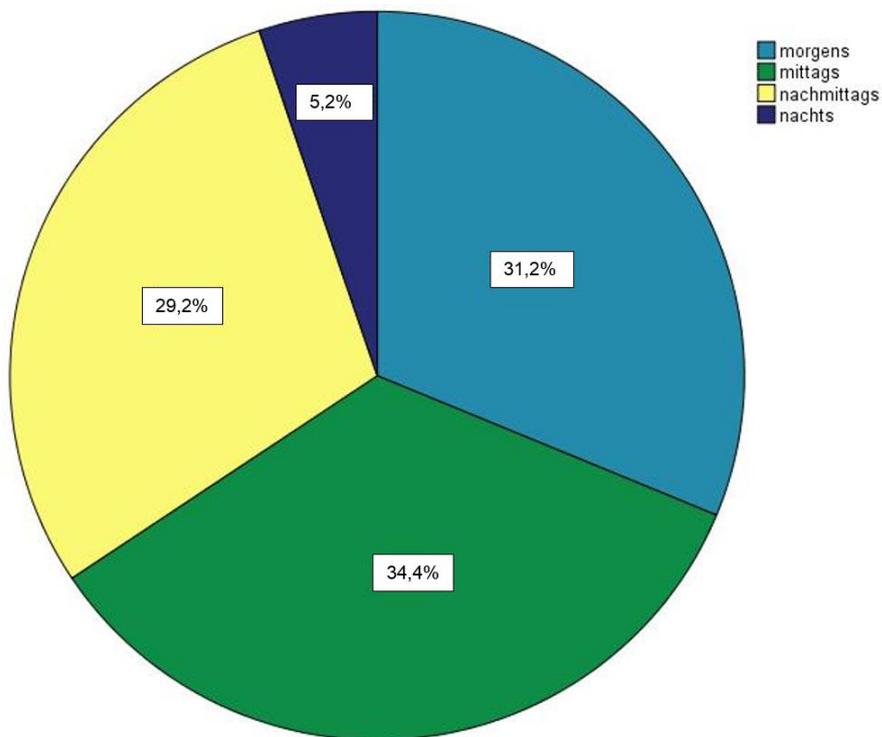
In einem Zeitraum von zwölf Tagen führte jeder Studienteilnehmer sechs Tauchgänge durch. Dabei bestand die Möglichkeit, zu verschiedenen Tageszeiten zu tauchen: morgens, mittags, nachmittags und/oder abends. Berücksichtigt man die Zeiten von Sonnenauf- und Sonnenuntergang auf den Malediven zum Zeitpunkt der Studie (Januar 2014), kann bei den abends stattgefundenen Tauchgängen von Nachttauchgängen gesprochen werden, da die Sonne zwischen 18.07 Uhr und 18.12 Uhr unterging [105].

Tauchgänge, die morgens oder mittags stattfanden, waren tendenziell tiefer als die Tauchgänge nachmittags oder nachts. Die frühen Tauchgänge führten auf Tiefen bis maximal 34,9 m, und die späten Tauchgänge auf Tiefen zwischen 15 m und 29 m. 31,2% aller Tauchgänge fanden morgens statt, 34,4% wurden in den Mittagsstunden durchgeführt, 29,2% nachmittags und nur 5,2% nach Sonnenuntergang. Tabelle 6 und Abbildung 15 geben die Häufigkeiten der unterschiedlichen Tageszeiten wieder.

Die durchschnittlichen IOD-Werte aller morgens durchgeführten Tauchgänge lagen bei 17,4/17,0 mmHg (vor dem Tauchgang/nach dem Tauchgang), die der Mittags-Tauchgänge bei 17,7/17,6 mmHg, nachmittags bei 15,6/16,8 mmHg und nachts bei 19,2/18,2 mmHg. Zwar scheint der gemittelte IOD bei den Nachttauchgängen deutlich höher zu sein, allerdings fanden nachts insgesamt nur fünf Messungen statt.

	Tauchgang						Gesamt
	1	2	3	4	5	6	
Morgens (7-8 Uhr)	-	-	16	4	6	4	30
Mittags (11-12 Uhr)	16	-	-	6	5	6	33
Nachmittags (14-15 Uhr)	-	13	-	4	5	6	28
Nachts (18-19 Uhr)	-	3	-	2	-	-	5

**Tabelle 6:** Häufigkeit der unterschiedlichen Tageszeiten bezogen auf die einzelnen Tauchgänge

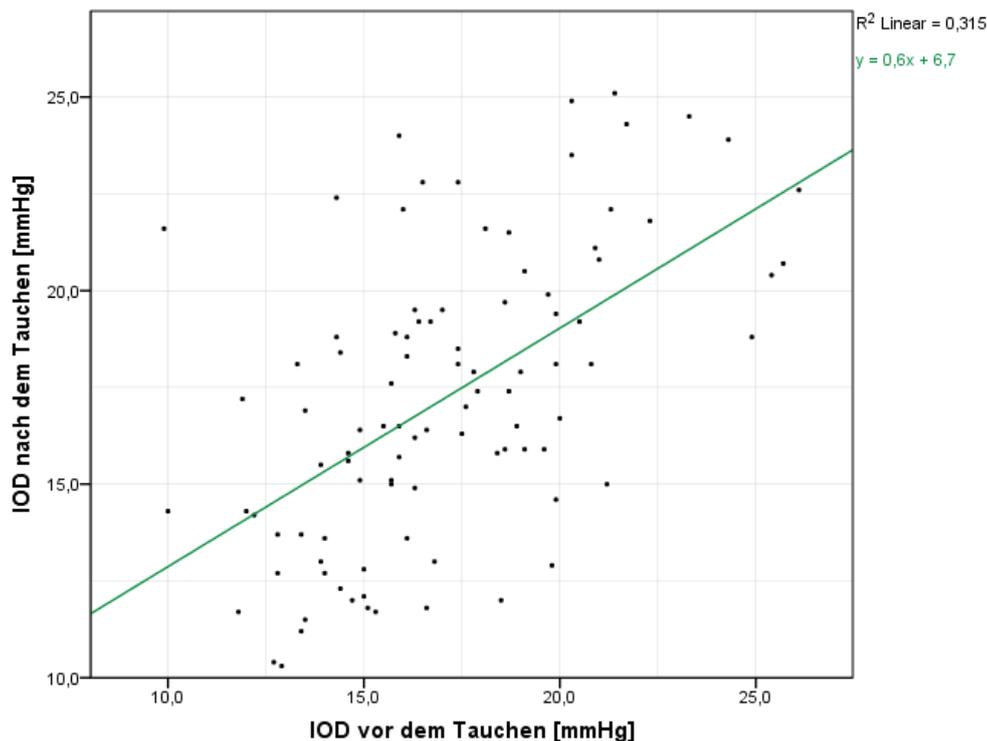


**Abbildung 15:** Häufigkeit der unterschiedlichen Tageszeiten aller Tauchgänge

### 3.1.4 Interindividuelle Schwankungen des Augeninnendrucks

Insgesamt war bei 11,5% aller vor dem Tauchen durchgeführten Messungen der Augeninnendruck erhöht (>21 mmHg). Von allen nach dem Tauchgang gemessenen IOD-Werten lagen 18,8% über dem Grenzwert von 21 mmHg.

Mit  $\rho = 0,58$  ( $p < 0,01$ ) zeigt sich eine signifikante positive Korrelation zwischen den jeweiligen IOD-Werten vor und nach dem Tauchen (Abb. 16).



**Abbildung 16:** Punktdiagramm der Verteilung des Augeninnendrucks vor und nach dem Tauchgang,  $\rho = 0,58$  ( $p < 0,01$ ), Geradengleichung:  $y = 0,6x + 6,7$  (IOD = intraokularer Druck)

Die interindividuelle Schwankungsbreite beschreibt die Schwankungen des Augeninnendrucks aller Teilnehmer. Dabei erfolgt keine Analyse der Werte des Einzelnen, sondern die IOD-Werte *aller* Probanden werden in Relation gesetzt um einen Überblick über die Werte der Studienpopulation zu erhalten. Dies geschah für jeden der sechs Tauchgänge separat, jedoch unabhängig davon, an welchem Tag und zu welcher Tageszeit der jeweilige Tauchgang stattfand. Für die interindividuelle Schwankungsbreite sind nun das Minimum, das Maximum und die Spannweite der einzelnen Tauchgänge von Interesse. Die Spannweite ergibt sich aus der Differenz zwischen dem maximalen und dem minimalen IOD eines Tauchgangs. In Tabelle 7 wurden die

Ergebnisse dieser Analyse zunächst für die Tauchgänge 1-6 zusammengetragen. Die Werte der Zeile „Gesamt“ sollen die Gesamtsituation beschreiben. Hierzu wurde zuerst für jeden Probanden ein Mittelwert aus den IOD-Werten aller 6 Tauchgänge berechnet. Man erhielt somit zwei Mittelwerte pro Person (jeweils einen vor und einen nach dem Tauchgang). Anschließend wurden aus dem Pool der Mittelwerte aller 16 Teilnehmer das Maximum, das Minimum und die daraus resultierende Spannweite in die Tabelle eingetragen.

Tauchgang	N	Augeninnendruck [mmHg]					
		vor TG			nach TG		
		Min	Max	SW	Min	Max	SW
1	16	10,0	24,3	14,3	10,4	23,9	13,5
2	16	11,8	25,7	13,9	11,7	20,7	9,0
3	16	12,0	21,0	9,0	10,3	24,0	13,7
4	16	<b>9,9</b>	24,9	<b>15,0</b>	12,0	24,3	12,3
5	16	13,9	<b>26,1</b>	12,2	11,8	24,5	12,7
6	16	11,9	25,4	13,5	13,6	25,1	11,5
Gesamt	16	13,3	20,4	7,1	12,5	20,4	8,0

**Tabelle 7:** Interindividuelle Schwankungen des Augeninnendrucks vor und nach dem Tauchen (TG = Tauchgang; N = Anzahl der Probanden; Min = Minimum; Max = Maximum; SW = Spannweite; fett gedruckt sind das Minimum und das Maximum aller Tauchgänge sowie die größte SW)

Bei einem Vergleich der Situation vor und nach dem Tauchen fällt auf, dass das absolute Minimum (9,9 mmHg), das absolute Maximum (26,1 mmHg) und die größte Spannweite (15,0 mmHg) vor dem Tauchen gemessen wurde.

Die Minima der Tauchgänge 1-6 vor dem Tauchen liegen in einem Bereich von 9,9 mmHg bis 13,9 mmHg ( $\Delta = 4,0$  mmHg), die Minima nach dem Tauchen zwischen 10,3 mmHg und 13,6 mmHg ( $\Delta = 3,3$  mmHg). Die Maxima liegen vor dem Tauchen zwischen 21,0 mmHg bis 26,1 mmHg ( $\Delta = 5,1$  mmHg) und nach dem Tauchen zwischen 20,7 mmHg bis 25,1 mmHg ( $\Delta = 4,4$  mmHg). Dadurch wird ersichtlich, dass

sich die interindividuelle Schwankungsbreite vor und nach den Tauchgängen ähnlich verhält.

Bezogen auf die Gesamtsituation ist das Minimum mit 12,5 mmHg nach dem Tauchgang um 0,8 mmHg geringer als vor dem Tauchen (13,3 mmHg). Das Maximum hingegen ist mit 20,4 mmHg im Vorher-Nachher-Vergleich identisch. Die Spannweite ist nach dem Tauchen (8,0 mmHg) um 0,9 mmHg größer als vor dem Tauchen (7,1 mmHg). Insgesamt scheint der Unterschied des IOD zwischen vor und nach dem Tauchen gering zu sein.

### **3.1.5 Intraindividuelle Schwankungen des Augeninnendrucks**

Im Gegensatz zur interindividuellen Schwankungsbreite beschreibt die intraindividuelle Schwankungsbreite die Spannweite des Augeninnendrucks für eine Einzelperson (Tab. 8). Die angegebenen Minima und Maxima entsprechen jeweils dem niedrigsten bzw. höchsten IOD-Wert einer Person bezogen auf alle 6 von dieser Person durchgeführten Tauchgänge. Die aufgeführte Spannweite errechnet sich aus der Differenz dieser beiden Werte. Es handelt sich also nicht um die Spannweite des IOD im Rahmen eines einzelnen Tauchgangs. Deshalb kann aus den Werten in Tabelle 8 nicht auf eine eventuelle pathologische Fluktuation des IOD geschlossen werden.

	Proband	IOD vor dem Tauchen [mmHg]	IOD nach dem Tauchen [mmHg]		Proband	IOD vor dem Tauchen [mmHg]	IOD nach dem Tauchen [mmHg]
Minimum	1	14,6	11,7		9	11,8	11,2
Maximum		<b>26,1</b>	<b>22,6</b>			15,1	14,3
Spannweite		<b>11,5</b>	10,9			3,3	3,1
Minimum	2	13,5	15,7		10	14,3	16,5
Maximum		18,6	<b>22,1</b>			<b>21,3</b>	<b>22,4</b>
Spannweite		5,1	6,4			7,0	5,9
Minimum	3	14,3	15,8		11	15,8	14,9
Maximum		<b>23,3</b>	<b>24,5</b>			<b>25,7</b>	<b>21,5</b>
Spannweite		9,0	8,7			9,9	6,6
Minimum	4	12,2	10,4		12	13,9	12,8
Maximum		15,0	14,2			16,1	15,5
Spannweite		2,8	3,8			2,2	2,7
Minimum	5	16,5	17,4		13	16,3	16,2
Maximum		<b>24,9</b>	<b>22,8</b>			20,5	20,5
Spannweite		8,4	5,4			4,2	4,3
Minimum	6	12,8	10,3		14	15,9	15,0
Maximum		<b>21,4</b>	<b>25,1</b>			<b>25,4</b>	<b>24,0</b>
Spannweite		8,6	<b>14,8</b>			9,5	9,0
Minimum	7	16,1	16,3		15	9,9	11,8
Maximum		<b>22,3</b>	<b>24,9</b>			20,9	<b>21,6</b>
Spannweite		6,2	8,6			11,0	9,8
Minimum	8	13,5	11,5		16	13,3	15,8
Maximum		19,9	17,6			19,6	19,2
Spannweite		6,4	6,1			6,3	3,4

**Tabelle 8:** Intraindividuelle Schwankungen des Augeninnendrucks vor und nach dem Tauchen (**fett gedruckt sind IOD-Werte außerhalb des Grenzbereichs von 10-21 mmHg und Spannweiten >11 mmHg**)

Rein deskriptiv ist dennoch zu erwähnen, dass zwei Studienteilnehmer (12,5%) vor und/oder nach dem Tauchgang eine größere Spannweite aufwiesen, als durch den physiologischen Schwankungsbereich des Augeninnendrucks von 10-21 mmHg mit einer Spannweite von 11 mmHg definiert ist. Eine erhöhte Spannweite ergab sich bei Teilnehmer 1 vor und bei Teilnehmer 6 nach dem Tauchen.

Insgesamt fallen erhebliche Unterschiede der Spannweiten zwischen den einzelnen Teilnehmern auf. Betrachtet man zunächst die Situation aller Teilnehmer vor dem Tauchen, ergeben sich für die Spannweite Werte zwischen 2,2 bis 11,5 mmHg ( $\Delta = 9,3$  mmHg). Nach dem Tauchen variiert die Spannweite mit Werten zwischen 2,7 und 14,8 mmHg ( $\Delta = 12,1$  mmHg) sogar noch mehr. Dies deutet darauf hin, dass auch bei augengesunden Personen eine gewisse und individuell sehr unterschiedliche Fluktuation des IOD vorliegt.

Dem gegenüber zeigt der intraindividuelle Vergleich der Spannweite vor und nach dem Tauchen nur geringe Differenzen: Mit Ausnahme von Proband 6, dessen Differenz 6,2 mmHg beträgt, liegt der Unterschied der Spannweite zwischen vor und nach dem Tauchen in einem Bereich von 0,1 bis maximal 3,3 mmHg. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass durch das Tauchen keine maßgeblichen Veränderungen des IOD zu erwarten sind.

Acht der 16 der Testpersonen (50,0%) erreichten bereits vor dem Tauchen Maximalwerte, die oberhalb des physiologischen Grenzbereichs von 21 mmHg lagen. Nach dem Tauchen waren bei zehn Probanden (62,5%) Maximalwerte über 21 mmHg festzustellen.

### **3.2 Vergleich des Augeninnendrucks vor und nach dem Tauchen**

Es wird der Frage nachgegangen, ob das Tauchen einen Einfluss auf den IOD haben könnte und ob sich damit eventuelle Konsequenzen für Taucher mit Glaukom ergeben könnten. Daher wurde der IOD von augengesunden Probanden vor und nach einem Tauchgang miteinander verglichen.

### 3.2.1 Deskriptive Analyse

In 52,1% der Fälle war der IOD nach dem Tauchgang niedriger als vorher. Entsprechend war der IOD bei etwa der Hälfte der Teilnehmer höher als zuvor. Zur weiteren Analyse wurden die IOD-Mediane berechnet.

Vor dem Tauchen (Tab. 9) lagen die Mittelwerte der einzelnen Tauchgänge in einem Bereich von  $16,1 \pm 3,2$  bis  $17,9 \pm 3,6$  mmHg ( $\Delta = 1,8$  mmHg): Die Standardabweichung lag im Verhältnis zum Mittelwert bei etwa 20%. Somit war die Streuung relativ gering. Die Mediane lagen zwischen 15,7 und 18,1 mmHg ( $\Delta = 2,4$  mmHg). Die Spalte „Gesamt“ soll erneut die Gesamtsituation darstellen. Zunächst wurden die IOD-Werte aller sechs Tauchgänge eines jeden Probanden gemittelt. Man erhält somit je 16 Mittelwerte vor und nach dem Tauchen. Aus diesen je 16 Werten wurde der Mittelwert  $\pm$  SD, der Median, sowie der kleinste und größte Wert bestimmt. Der Mittelwert (gesamt) betrug  $17,1 \pm 2,2$  mmHg und der Median (gesamt) 17,7 mmHg.

	Augeninnendruck vor dem Tauchgang [mmHg]						
Tauchgang	1	2	3	4	5	6	Gesamt
Mittelwert	16,3	16,1	16,5	17,8	17,7	17,9	17,1
<b>Median</b>	<b>16,1</b>	<b>15,7</b>	<b>15,9</b>	<b>17,8</b>	<b>16,3</b>	<b>18,1</b>	<b>17,7</b>
SD	3,4	3,2	2,9	3,8	3,7	3,6	2,2
Minimum	10,0	11,8	12,0	9,9	13,9	1,9	13,3
Maximum	24,3	25,7	21,0	24,9	26,1	25,4	20,4

**Tabelle 9:** Augeninnendruck vor dem Tauchen (SD = Standardabweichung)

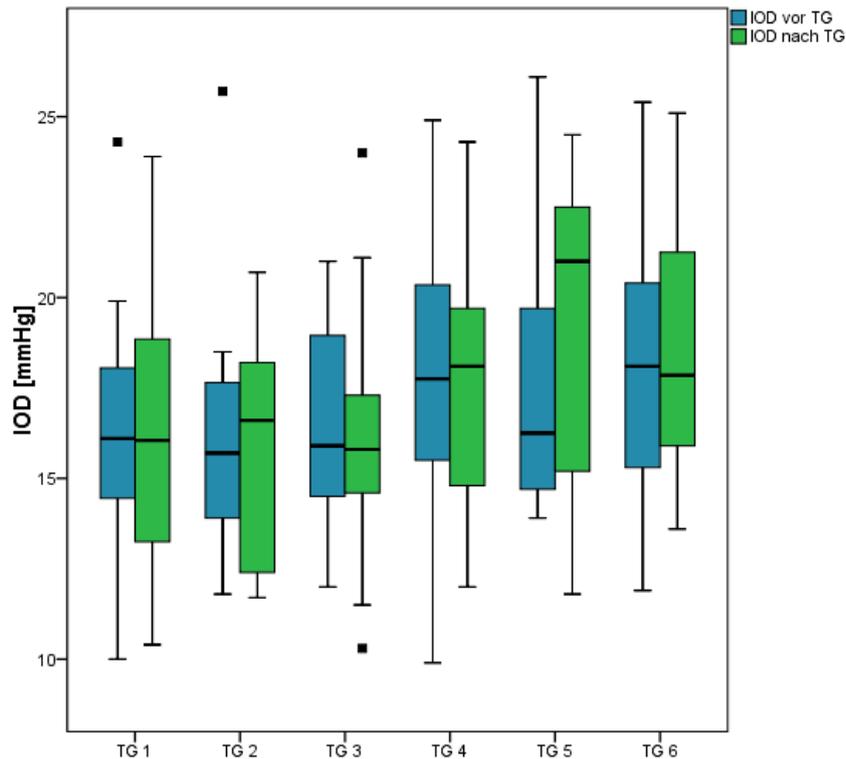
Die einzelnen Mittelwerte nach dem Tauchgang (Tab. 10) lagen in einem Bereich von  $15,8 \pm 3,1$  mmHg bis  $19,0 \pm 4,4$  mmHg ( $\Delta = 3,2$  mmHg), die Mediane lagen zwischen 15,8 und 21,0 mmHg ( $\Delta = 5,2$  mmHg). Der über alle 16 Testpersonen und deren je sechs Tauchgänge hinweg gemittelte Mittelwert betrug  $17,2 \pm 2,6$  mmHg und der Median 17,9 mmHg.

	<b>Augeninnendruck nach dem Tauchgang [mmHg]</b>						
Tauchgang	1	2	3	4	5	6	Gesamt
Mittelwert	16,0	15,8	16,2	17,7	19,0	18,6	17,2
<b>Median</b>	<b>16,1</b>	<b>16,6</b>	<b>15,8</b>	<b>18,1</b>	<b>21,0</b>	<b>17,9</b>	<b>17,9</b>
SD	3,5	3,1	3,6	3,5	4,4	3,4	2,6
Minimum	10,4	11,7	10,3	12,0	11,8	13,6	12,5
Maximum	23,9	20,7	24,0	24,3	24,5	25,1	20,4

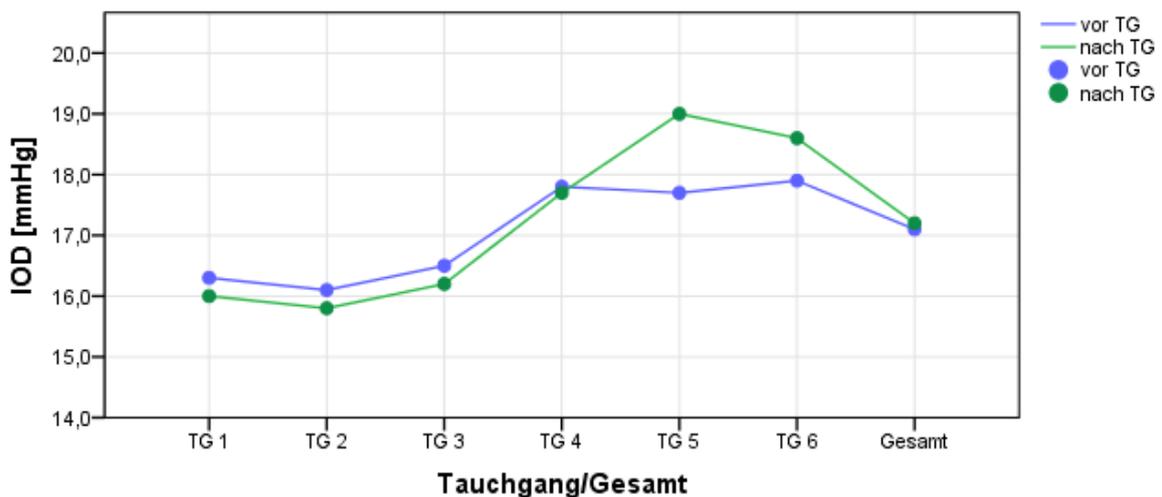
**Tabelle 10:** Augeninnendruck nach dem Tauchen (SD = Standardabweichung)

Während die Mittelwerte sowie die Mediane nach dem Tauchen deutlich stärker variierten als vor dem Tauchen, war der Unterschied der jeweiligen Gesamtwerte zwischen vor und nach dem Tauchen nur gering. Hier zeigte sich eine Differenz der Mittelwerte von  $\Delta = 0,1$  mmHg und der Mediane von  $\Delta = 0,2$  mmHg.

Zur Darstellung der IOD-Werte vor und nach dem Tauchen bezogen auf die einzelnen Tauchgänge wurde eine Boxplot-Grafik gewählt (Abb. 17). Der Oberrand der Box entspricht dem dritten Quartil ( $Q_{0,75}$ ), der Unterrand dem ersten Quartil ( $Q_{0,25}$ ). Der waagerechte Strich innerhalb der Box repräsentiert den Median. Absolutes Minimum und Maximum werden durch den jeweiligen Whisker dargestellt. Die Punkte bei Tauchgang 1-3 markieren Ausreißer. Als Ausreißer wurden Werte betrachtet, die außerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstandes lagen.



**Abbildung 17:** Boxplot zur Darstellung des Augeninnendrucks vor und nach den einzelnen Tauchgängen (IOD = intraokularer Druck; TG = Tauchgang)



**Abbildung 18:** Entwicklung der Mediane des Augeninnendrucks vor und nach den einzelnen Tauchgängen (IOD = intraokularer Druck; TG = Tauchgang)

Anhand der Abbildung 18 lässt sich kein großer Unterschied zwischen den IOD-Werten vor und nach dem Tauchen erkennen, jedoch zeigt sich eine Tendenz der IOD-Zunahme im Verlauf der Tauchgänge.

Wie bereits unter 2.2.2 erwähnt, erfolgten insgesamt 18 Messungen 30 min und zudem vier Messungen 60 min nach dem Auftauchen. Bei fünf der 18 30-min-Messungen (27,8%) lag der 30-min-Wert oberhalb, bei 72,2% (13 Messungen) unterhalb des Wertes vor Tauchbeginn. Vergleicht man den 30-min-Wert mit dem Wert, der innerhalb der unmittelbar nach dem Tauchgang bestimmt wurde, lag dieser in 33,3% oberhalb und in 61,1% der Fälle unterhalb des zehn-Minuten-Wertes. Ein einzelner 30-min-Wert (5,6%) war mit dem zehn-Minuten-Wert des Probanden identisch. Zusammenfassend und vereinfacht lässt sich sagen, dass der 30-Minuten-Wert in ca.  $\frac{3}{4}$  der Fälle kleiner als der Ausgangswert und in ca.  $\frac{2}{3}$  der Fälle ebenfalls kleiner als der 10-min-Wert war. Das Verhältnis der vier 60-min-Werte bezogen auf die vorher gemessenen IOD-Werte wird in Tabelle 11 aufgezeigt.

Proband	Verhältnis der IOD-Werte	$\Delta$ (60 – vor TG)
1	30 < 60 < 10 < vor TG	-2,5
2	30 < 10 < 60 < vor TG	- 4,1
3	30 < 10 < vor TG < 60	+0,2
4	60 < 10 < vor TG < 30	-5,8

**Tabelle 11:** Verhältnis der Augeninnendrucke vor dem Tauchgang sowie 10, 30 und 60 min nach dem Tauchgang (bei vier Probanden, bei welchen ein 60-Minuten-Wert bestimmt wurde).  $\Delta$  (60 – vor TG) beschreibt die Differenz zwischen dem 60-Minuten-Wert und dem Ausgangswert vor dem TG. (TG = Tauchgang, IOD = intraokularer Druck).

Anhand dieser vier über einen Zeitraum von 60 min beobachteten Verläufe des Augeninnendrucks lässt sich keine einheitliche Aussage treffen. An der Differenz zwischen dem 60-Minuten-Wert und dem Ausgangswert vor dem Tauchen lässt sich jedoch ablesen, dass der Augeninnendruck nach 60 min in drei von vier Fällen niedriger war als der Ausgangswert. Somit kann man vermuten, dass der IOD auch nach 60 min nicht ansteigt, sondern tendenziell sinkt.

### 3.2.2 Nicht-parametrische Tests

Der Vergleich des Augeninnendrucks vor dem Tauchen mit dem Druck nach dem Tauchgang wurde mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Test durchgeführt. Dieser Test

vergleicht die Mediane zweier abhängiger Stichproben. In diesem konkreten Fall entsprechen die Messungen des IOD vor dem Tauchen der ersten Stichprobe, die Messungen nach dem Tauchen der zweiten. Da wiederholt Messungen bei derselben Person durchgeführt wurden, sind die beiden Stichproben voneinander abhängig und damit die Bedingungen für den Test erfüllt.

Als Nullhypothese ( $H_0$ ) wird angenommen, dass es keinen Unterschied zwischen dem Augeninnendruck vor und nach dem Tauchen gibt:

$$\text{Median}_{\text{(vor dem Tauchen)}} = \text{Median}_{\text{(nach dem Tauchen)}}$$

Die Alternativ- oder Arbeitshypothese ( $H_1$ ) lautet demnach, dass ein Unterschied zwischen den beiden Stichproben besteht:

$$\text{Median}_{\text{(vor dem Tauchen)}} \neq \text{Median}_{\text{(nach dem Tauchen)}}$$

Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Tests. Da sich bei keinem der Vergleiche ein Signifikanzniveau von  $p \leq 0,05$  zeigte, besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen den beiden Zeitpunkten, und es muss die Nullhypothese angenommen werden. Das bedeutet, dass weder insgesamt noch in Bezug auf einzelne Tauchgänge ein signifikanter Unterschied zwischen dem IOD vor und nach dem Tauchen besteht. Er scheint demnach durch das Tauchen nicht bedeutsam beeinflusst zu werden.

Tauchgang	p-Wert
1	0,59
2	0,74
3	0,21
4	0,76
5	0,22
6	0,31
Gesamt	0,50

**Tabelle 12:** Wilcoxon-Vorzeichen-Test zum Vergleich des Augeninnendrucks vor und nach einem Tauchgang

### 3.3 Überprüfen weiterer Einflussfaktoren

Als Einflussfaktoren kamen das Alter, das Geschlecht, die Körpergröße, das Körpergewicht, der daraus berechnete Body-Mass-Index und die Taucherfahrung in Frage. Da die Dicke der Cornea mit dem intraokularen Druck korreliert (vgl. Kapitel 2.2.1), wurde auch diese Variable als Einflussfaktor getestet. Weitere Faktoren, die den Augeninnendruck beeinflussen könnten, waren Tiefe und Dauer des Tauchgangs.

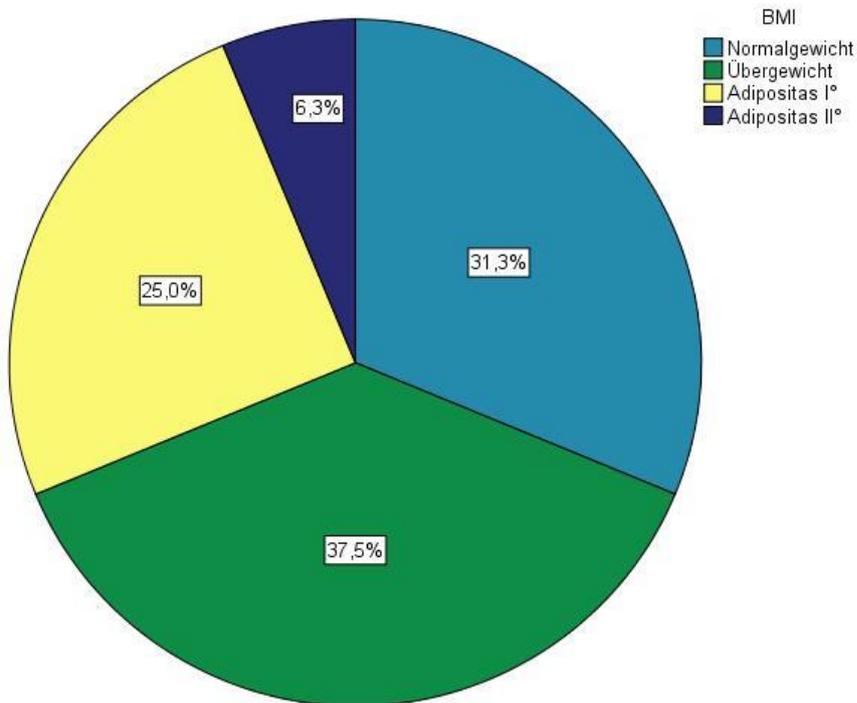
#### 3.3.1 Deskriptive Analyse

Das Alter sowie die Geschlechterverteilung der Teilnehmer wurden bereits in Kapitel 3.1.1. beschrieben. Es wird daher an dieser Stelle zunächst nicht weiter darauf eingegangen.

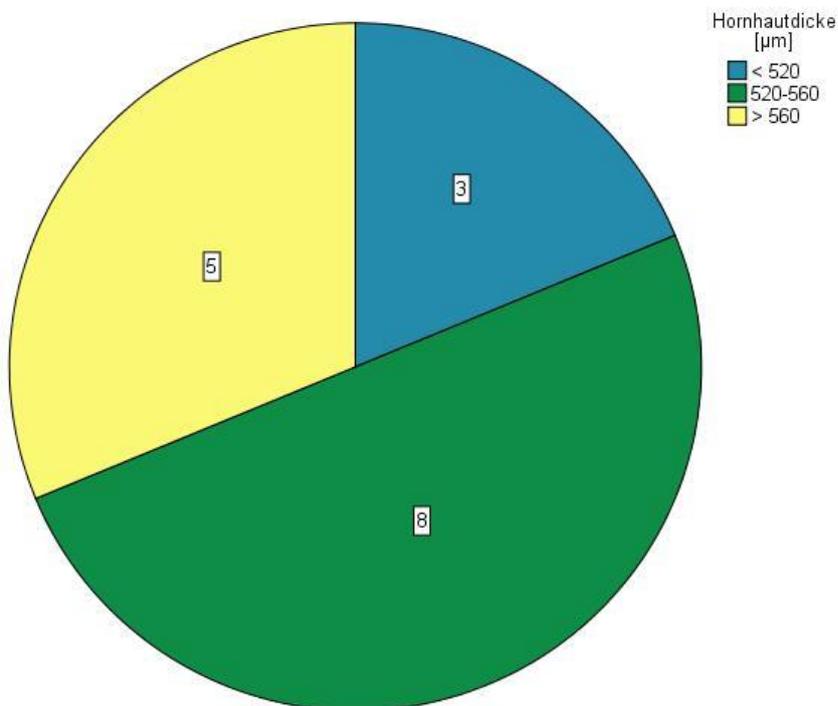
	Größe [m]	Gewicht [kg]	BMI [kg/m <sup>2</sup> ]	Hornhautdicke [µm]
Mittelwert	1,73	83,9	27,6	543
Median	1,76	86,0	26,6	541
SD	0,11	19,6	3,9	27
Minimum	1,50	55,0	22,6	507
Maximum	1,88	115,0	35,0	602

**Tabelle 13:** Zusammenstellung der Einflussfaktoren Größe, Gewicht, BMI und Hornhautdicke des rechten Auges (SD = Standardabweichung, BMI = Body-Mass-Index)

Die Studienpopulation war im Schnitt  $1,73 \pm 0,11$  m groß (Median = 1,76 m) und wies ein durchschnittliches Gewicht von  $83,9 \pm 19,6$  kg auf (Median = 86,0 kg) (Tab. 13). Berechnet man den BMI der Teilnehmer, so zeigt sich, dass 31,3% normalgewichtig und 68,8% übergewichtig oder sogar adipös waren (Abb. 19). Die Hornhautdicke des rechten Auges lag in einem Bereich von 507 bis 602 µm mit Standardabweichungen von  $\pm 11,0$  µm bis  $\pm 31,0$  µm. Damit lag die durchschnittliche Hornhautdicke bei  $543 \pm 27$  µm (Median = 541 µm) (Tab.13).



**Abbildung 19:** Gewichtsverteilung nach BMI



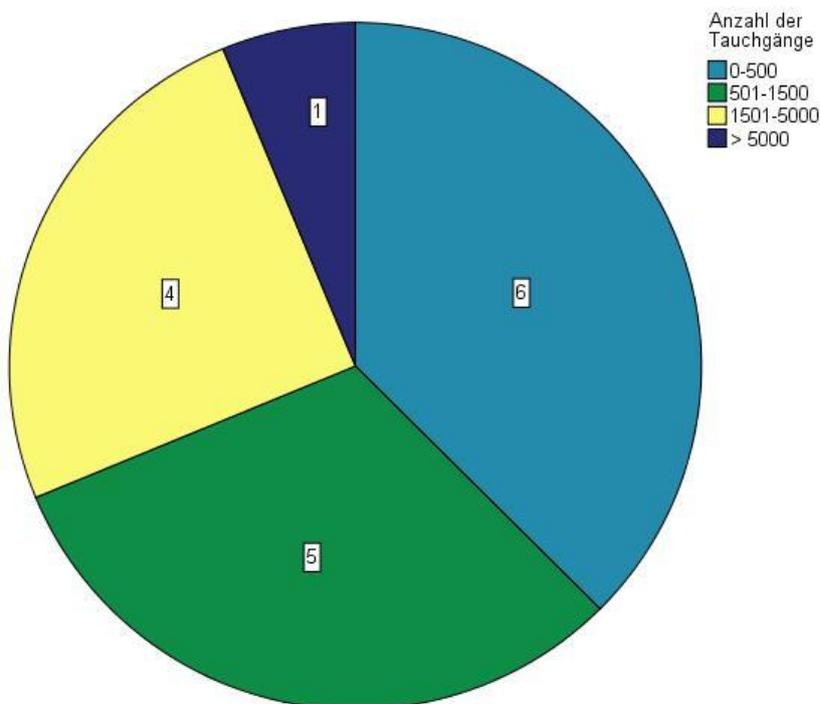
**Abbildung 20:** Häufigkeitsverteilung der Hornhautdicke des rechten Auges [ $\mu\text{m}$ ]

Die Taucherfahrung (Tab. 14) wurde durch die Anzahl der Tauchgänge und der Tauchjahre sowie durch die daraus resultierende Anzahl an Tauchgängen pro Jahr beschrieben. Hier zeigt sich die mit Abstand größte Streuung aller erhobenen Daten. Die

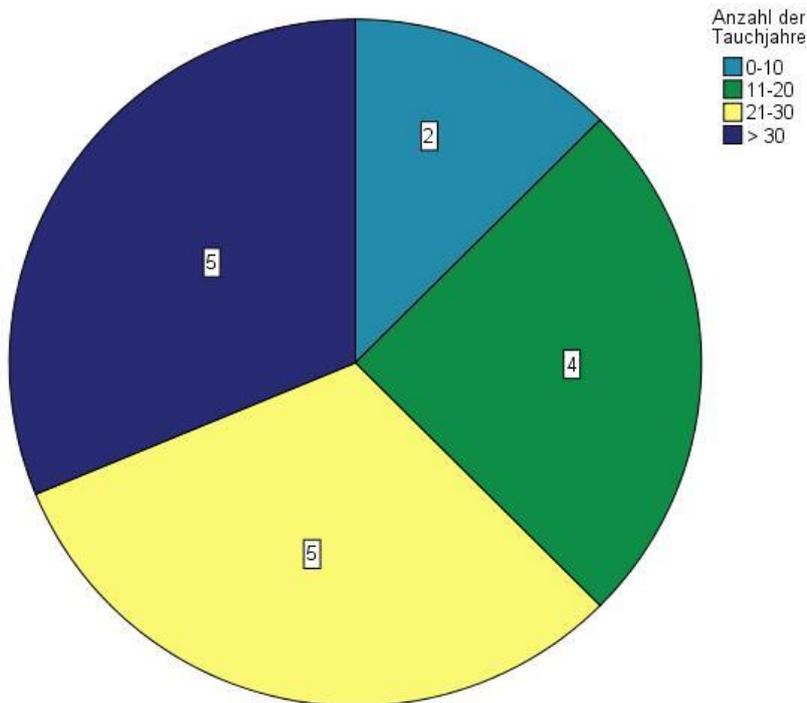
Spannweite der absolvierten Tauchgänge reichte von 167 bis 12000 bei einem Mittelwert von  $2072 \pm 3079$  (Median = 755). Die durchschnittliche Anzahl der Tauchjahre betrug  $23,84 \pm 11,32$  (Median = 22,50 Jahre). Die Anzahl der Tauchgänge pro Tauchjahr lag in einem Bereich von 7,3 bis 400,0 bei einem Mittelwert von  $88,6 \pm 118,8$  (Median = 43,3). Die Abbildungen 21 und 22 zeigen die Häufigkeitsverteilung der Anzahl der Tauchgänge bzw. Tauchjahre.

	Anzahl Tauchgänge	Anzahl Tauchjahre	Tauchgänge pro Tauchjahr
Mittelwert	2072	23,8	88,6
Median	755	22,5	43,3
SD	3079	11,3	118,6
Minimum	167	8	7,3
Maximum	12000	41	400,0

**Tabelle 14:** Einflussfaktor „Taucherfahrung“: Anzahl der bisher durchgeführten Tauchgänge, Anzahl der Tauchjahre und daraus resultierende durchschnittliche Anzahl der Tauchgänge pro Tauchjahr (SD = Standardabweichung)



**Abbildung 21:** Häufigkeitsverteilung der Anzahl der Tauchgänge



**Abbildung 22:** Häufigkeitsverteilung der Anzahl der Tauchjahre

Die durchschnittliche Tiefe der sechs Tauchgänge lag stets in einem Bereich von 20-30 m. In dieser Tiefe herrscht ein Umgebungsdruck von 3-4 bar. Tauchgang 2 war insgesamt mit  $21 \pm 3$  m am wenigsten tief, was daran liegt, dass dieser Tauchgang von allen Probanden entweder nachmittags oder nachts ausgeführt wurde (Tab. 6). Tauchgänge zu diesen Zeiten waren tendenziell weniger tief (durchschnittliche Tiefe nachmittags: 20 m, nachts: 27 m), als die Tauchgänge, die morgens oder mittags stattfanden, welche auf durchschnittlich 28 m bzw. 29 m führten.

Tauchtiefe [m]						
Tauchgang	1	2	3	4	5	6
Mittelwert	28	21	29	28	26	27
Median	29	21	30	29	26	30
SD	4	3	4	3	5	8
Minimum	17	15	22	21	16	15
Maximum	35	27	35	32	35	35

**Tabelle 15:** Tauchtiefe der einzelnen Tauchgänge in Meter [m]

Die Durchschnittsdauer der einzelnen Tauchgänge war mit ca. 50 Minuten relativ konstant. Nur Tauchgang 3 war durchschnittlich ungefähr zehn Minuten kürzer, da hier von zwei Probanden mit 20 und 21 Minuten die insgesamt kürzesten Tauchgänge des Untersuchungszeitraumes absolviert wurden (Tab. 16)

Dauer der Tauchgänge [min]						
Tauchgang	1	2	3	4	5	6
Mittelwert	50	53	41	53	53	50
Median	46	51	41	51	53	52
SD	9	6	14	8	8	8
Minimum	42	45	20	36	36	37
Maximum	67	68	60	64	64	70

**Tabelle 16:** Dauer der einzelnen Tauchgänge in Minuten [min]

### 3.3.2 Korrelationen

Korrelationen wurden nach Spearman (Spearman's  $\rho$ ) berechnet, bei welchen eine Normalverteilung keine Voraussetzung ist. Trotzdem gilt, dass bei jeder Korrelation nur zwei Variablen miteinander verglichen werden können. Um eine Korrelation zwischen einem möglichen Einflussfaktor und der Veränderung des IOD- durch das Tauchen zu überprüfen, wurde daher die Differenz zwischen dem Augeninnendruck vor und dem IOD nach dem Tauchen berechnet. Dies geschah für jedes Werte-Paar des IOD (vorher/nachher) separat. Aus dem Pool der Differenz-Werte wurde anschließend der Mittelwert  $\pm$  SD, der Median, sowie Minimum und Maximum bestimmt. Diese Analyse (Tab. 17) wurde für jeden Tauchgang einzeln und über alle Tauchgänge hinweg (Spalte „Gesamt“) durchgeführt. Die neue Variable „Differenz“ ist Ausdruck des Unterschieds (Delta,  $\Delta$ ) zwischen dem IOD vor und dem IOD nach dem Tauchen. Mit Hilfe dieser Variable kann nun der Augeninnendruck den möglichen Einflussfaktoren gegenübergestellt werden.

Differenz (IOD <sub>vor TG</sub> – IOD <sub>nach TG</sub> ) [mmHg]							
Tauchgang	1	2	3	4	5	6	Gesamt
Mittelwert	0,3	0,3	0,3	0,1	-1,3	-0,7	-0,1
Median	0,2	0,0	0,9	-0,3	-1,3	-1,0	-0,2
SD	2,8	3,4	2,8	4,6	3,6	3,1	1,5
Minimum	-4,3	-4,8	-8,1	-11,7	-8,1	-5,4	-2,6
Maximum	6,9	6,5	3,3	6,2	3,5	5,0	3,2

**Tabelle 17:** Differenz des Augeninnendrucks vor und nach dem Tauchen (SD = Standardabweichung; IOD = intraokularer Druck; TG = Tauchgang; Differenz gesamt = Mittelwert des Augeninnendrucks aller 6 Tauchgänge vor dem Tauchen minus Mittelwert des Augeninnendrucks aller 6 Tauchgänge nach dem Tauchen)

Bei der Testung der Korrelationen auf Signifikanz wurden bei einem Signifikanzniveau von  $p \leq 0,05$  folgende Hypothesen festgelegt ( $\rho$  = Spearman-Korrelationskoeffizient):

Nullhypothese:  $\rho = 0$   $\rightarrow$  Annahme, wenn  $p > 0,05$

Alternativhypothese:  $\rho \neq 0$   $\rightarrow$  Annahme, wenn  $p \leq 0,05$

Der Spearman-Korrelationskoeffizient nimmt dabei Werte zwischen -1 und +1 an, wobei ein Ergebnis nahe -1 für eine starke negative Korrelation, nahe +1 für eine starke positive Korrelation zweier Variablen spricht. Liegt der Wert nahe Null besteht keine Korrelation zwischen den Variablen.

Ein möglicher Zusammenhang zwischen den nominalen Variablen „Geschlecht“ und „Alter nach Altersgruppe“ und der metrischen Variable „Differenz“ wurde mit dem Eta-Koeffizienten  $\eta$  untersucht.

### 3.3.2.1 Korrelation mit verschiedenen Einflussfaktoren

Um einen Einfluss des Alters auf den IOD zu untersuchen, wurde die Studienpopulation in zwei Gruppen aufgeteilt: Probanden, die 55 Jahre und jünger waren und Probanden, die über 55 Jahre alt waren. Die statistische Berechnung ergab ein  $\eta = 0,007$  bei einem  $p = 0,98$ . Ein signifikanter Einfluss des Alters auf den Augen-

innendruck kann somit ausgeschlossen werden. Auch das Geschlecht scheint mit  $\eta = 0,03$  und  $p = 0,90$  keinen Einfluss zu haben.

	Größe	Gewicht	BMI	Hornhautdicke
<b>Differenz gesamt</b>	-0,19 (0,47)	-0,26 (0,33)	-0,30 (0,27)	0,35 (0,18)

**Tabelle 18:** Korrelation von „Differenz gesamt“ mit Größe, Gewicht, BMI und Hornhautdicke. (Erklärung: zuerst wird der Spearman-Korrelationskoeffizient ( $\rho$ ) aufgeführt, darunter der dazugehörige p-Wert in Klammern, fettgedruckt sind p-Werte  $\leq 0,05$ ; Differenz gesamt = Mittelwert des Augeninnendrucks aller 6 Tauchgänge vor dem Tauchen minus Mittelwert des Augeninnendrucks aller sechs Tauchgänge nach dem Tauchen (vgl. Tabelle 17); BMI = Body-Mass-Index)

	Tauchgänge	Tauchjahre	Tauchgänge pro Tauchjahr	Tauchtiefe	Tauchdauer
<b>Differenz gesamt</b>	-0,29 (0,28)	-0,54 <b>(0,03)</b>	-0,04 (0,88)	-0,16 (0,56)	-0,02 (0,94)

**Tabelle 19:** Korrelation von „Differenz gesamt“ mit Faktoren der Taucherfahrung (Erklärung: zuerst wird der Spearman-Korrelationskoeffizient ( $\rho$ ) aufgeführt, darunter der dazugehörige p-Wert in Klammern, fettgedruckt sind p-Werte  $\leq 0,05$ ; Differenz gesamt = Mittelwert des Augeninnendrucks aller 6 Tauchgänge vor dem Tauchen minus Mittelwert des Augeninnendrucks aller sechs Tauchgänge nach dem Tauchen (vgl. Tabelle 17); Tauchtiefe = Mittelwert der Tauchtiefe über alle sechs Tauchgänge hinweg; Tauchdauer = Mittelwert der Tauchdauer über alle sechs Tauchgänge hinweg)

Bei der Berechnung möglicher Korrelationen (Tab. 18, 19) zeigte sich lediglich ein einziger signifikanter Zusammenhang. Hierbei handelt es sich um eine enge negative Korrelation ( $\rho = -0,54$ ) zwischen der Anzahl der Tauchjahre mit der Variablen „Differenz gesamt“, die den Unterschied des Augeninnendrucks vor und nach dem Tauchen repräsentiert. Man könnte daher davon ausgehen, dass sich der IOD nach einer hohen Anzahl an Tauchjahren, also nach langjähriger Taucherfahrung, weniger oder gar nicht ändert.

### 3.3.2.2 Subgruppenanalyse: Korrelation mit Tauchdauer und -tiefe

Um eventuell weitere bisher unbedachte Einflussfaktoren zu detektieren, wurde die Differenz des IOD ( $\Delta$ ) auch mit der Tauchtiefe und der Dauer des Tauchgangs korreliert. Diese zweite Gegenüberstellung erfolgte abhängig vom jeweiligen Tauchgang, das heißt, die Tiefe und Dauer des *ersten* Tauchgangs wurde auf eine Korrelation mit der Differenz des Augeninnendrucks vor und nach dem *ersten* Tauchgang geprüft. Selbiges Prinzip erfolgte für die Tauchgänge 2-6.

Ein Zusammenhang der Differenz des Augeninnendrucks mit der Dauer des Aufenthalts unter Wasser zeigte sich in keinem Fall. Jedoch ergab sich bei Tauchgang 5 eine signifikante Korrelation zwischen der Differenz des IOD und der Tauchtiefe ( $p = 0,045$ ,  $\rho = 0,51$ ), (Tab. 20). Der Spearman-Korrelationskoeffizient ( $\rho$ ) betrug hier  $+0,51$ , wodurch von einem engen positiven Zusammenhang ausgegangen wird: Wird die Tauchtiefe größer, nimmt auch der Betrag der Differenz zu ( $\Delta \uparrow$ ). Die Differenz wurde auch hier gebildet, indem der IOD *nach* dem Tauchgang vom Wert *vor* dem Tauchen abgezogen wurde. Eine zunehmende Differenz bedeutet daher, dass der Augeninnendruck nach dem Tauchen im Vergleich zu vor dem Tauchen bei größeren Tauchtiefen höher wurde.

	Tauchtiefe [m]	Tauchdauer [min]
Differenz TG 1	-0,08 (0,76)	0,28 (0,29)
Differenz TG 2	0,06 (0,83)	-0,33 (0,22)
Differenz TG 3	-0,48 (0,06)	0,18 (0,50)
Differenz TG 4	-0,07 (0,80)	-0,21 (0,43)
Differenz TG 5	<b>0,51</b> <b>(0,045)</b>	-0,23 (0,38)
Differenz TG 6	-0,14 (0,60)	0,34 (0,19)

**Tabelle 20:** Korrelation der Differenz des Augeninnendrucks vor und nach dem Tauchen mit Tauchtiefe und -dauer. (Erklärung: In jeder Zeile wird zuerst der Spearman-Korrelationskoeffizient ( $\rho$ ) aufgeführt, darunter der dazugehörige  $p$ -Wert in Klammern, fettgedruckt sind  $p$ -Werte  $\leq 0,05$ . TG = Tauchgang)

### 3.4 Linkes Auge

Betrachtet man zunächst die Druckwerte der vor dem Tauchen durchgeführten Messungen aller 6 Tauchgänge und aller 16 Teilnehmer, lag der IOD bei 15,6% (linkes Auge) und 11,5% (rechtes Auge) oberhalb der Grenze von 21 mmHg. Werte unterhalb 10 mmHg zeigten sich bei keinem der linken und einem einzigen der rechten Augen. Links lagen somit insgesamt 15,6% und rechts 12,5% aller Messungen außerhalb des Normbereichs von 10-21 mmHg.

Bei einem direkten Vergleich aller Ausgangswerte des rechten mit den Ausgangswerten des linken Auges fällt zudem auf, dass die Differenz zwischen beiden Augen im Seitenvergleich bei 43,8% der Messungen den physiologischen Grenzwert von 3 mmHg übersteigt. Bei der von anderen Quellen definierten maximalen Seitendifferenz von 5 mmHg überstiegen nur 18,8% aller Ausgangswerte diese Grenze.

Die interindividuelle Schwankungsbreite, die in Tabelle 7 für das rechte Auge dargestellt ist, wurde auch für das linke Auge bestimmt. Um rechtes und linkes Auge miteinander zu vergleichen, wurden jeweils die Mittelwerte (vgl. Zeile „Gesamt“ in Tabelle

7) betrachtet, die in Tabelle 21 für das linke und erneut für das rechte Auge aufgeführt sind. Aus den jeweiligen Differenzen zwischen rechtem und linkem Auge wird ersichtlich, dass der Unterschied stets kleiner als die bereits erwähnte Grenze von 3 mmHg war und damit insgesamt keine Seitendifferenz besteht.

	Augeninnendruck [mmHg]					
	Minimum		Maximum		Spannweite	
	<i>vor TG</i>	<i>nach TG</i>	<i>vor TG</i>	<i>nach TG</i>	<i>vor TG</i>	<i>nach TG</i>
Gesamt (RA)	13,3	12,5	20,4	20,4	7,1	7,9
Gesamt (LA)	12,3	14,2	21,7	20,3	9,4	6,1
Differenz	1,0	1,7	1,3	0,1	2,3	1,8

**Tabelle 21:** Vergleich aller Mittelwerte zwischen rechtem und linkem Auge (RA = rechtes Auge; LA = linkes Auge; vor TG = vor dem Tauchgang; nach TG = nach dem Tauchgang)

Die intraindividuellen Schwankungen des linken Auges stellen sich wie folgt dar: Vor dem Tauchen wurde bei neun Teilnehmern (56,3%) ein erhöhter IOD (> 21 mmHg) gemessen, während acht Teilnehmer (50,0%) am rechten Augen einen erhöhten IOD aufwiesen. Nach dem Tauchgang zeigten am linken Auge sieben Teilnehmer (43,8%) einen zu hohen IOD, verglichen mit zehn Teilnehmer (62,5%), bei welchen am rechten Auge zu hohe Werte bestimmt wurden. Bei den Messungen des linken wie auch des rechten Auges war dabei der IOD bei zwei Teilnehmern ausschließlich nach dem Tauchgang erhöht, während der Wert vor dem Tauchen im Normalbereich lag.

Ein bedeutender Unterschied zwischen dem rechten und dem linken Auge war aufgrund der beidseits augengesunden Studienpopulation nicht zu erwarten. Letztlich erbrachte, wie erwartet, auch die Analyse der Gegenseite weder einen signifikanten Unterschied zwischen dem IOD vor und nach dem Tauchen noch einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem IOD und den möglichen Einflussfaktoren.

Nachdem die Daten von beiden Augen nahezu identisch waren, lässt sich mit guter Berechtigung sagen, dass SCUBA-Tauchen unter den beschriebenen Umständen zu keiner schadhafte Erhöhung des Augeninnendrucks führt.

## 4 Diskussion

Der wichtigste Befund dieser Studie ist, dass blasenarmes Tauchen offenbar nicht zu gerichteten Veränderungen des Augeninnendruckes (IOD) führt. Die Null-Hypothese, dass im vernünftigen Rahmen durchgeführtes Gerätetauchen für Glaukom-Patienten kein erhöhtes Risiko aufweist, kann daher bestätigt werden.

### 4.1 Repräsentativität der Studie

#### 4.1.1 Studienpopulation

In Deutschland liegen die Durchschnittsgröße und das Durchschnittsgewicht für Männer bei 1,80 m und 88,8 kg, für Frauen bei 1,66 m und 71,6 kg [106]. Mit gut vergleichbaren Durchschnittswerten, die die Studienpopulation unserer Studie aufweist, kann sie als repräsentativ betrachtet werden.

#### 4.1.2 Pachymetrie

Auch bezüglich der in der Pachymetrie bestimmten Werte der Hornhautdicke sind die Werte in dieser Arbeit ( $543 \pm 27 \mu\text{m}$ ,  $507\text{-}602 \mu\text{m}$ ) vergleichbar mit den Ergebnissen anderer Studien (z.B. Kim et al., 2013:  $540,2 \pm 29,6 \mu\text{m}$  ( $455\text{-}625 \mu\text{m}$ ) [107]; Jablonski et al., 2013:  $545,4 \pm 42,6 \mu\text{m}$  ( $465\text{-}618 \mu\text{m}$ ) [108]).

#### 4.1.3 Rebound-Tonometrie

Nach Neuburger et al. „zeigt die klinische Anwendung, dass im Bereich höherer Pachymetriewerte oder bei bestehenden Hornhautpathologien (...) die Rebound-Tonometrie zum jetzigen Zeitpunkt als nicht ausreichend messgenau betrachtet werden sollte“ [104]. Da es sich bei der vorliegenden Arbeit jedoch ausschließlich um nicht vorgeschädigte Augen ohne Hornhautpathologien handelt, ist diesbezüglich kein Messfehler zu erwarten und die Messung mittels Rebound-Tonometrie kann als valide angesehen werden.

## 4.2 Limitationen der Studie

### 4.2.1 Stichprobengröße

Limitiert ist diese Feldstudie wegen des geringen Stichprobenumfangs von 16 Teilnehmern. Nach den Berechnungen der statistischen Power ist die Anzahl zwar ausreichend, jedoch wurde die Anforderung von mindestens 15 Teilnehmern nur sehr knapp erfüllt.

### 4.2.2 Zeitpunkte der Messungen des Augeninnendrucks

Der IOD wurde in dieser Studie ausschließlich vor und nach dem Tauchen, aber nicht während des Tauchens bestimmt. Hierdurch könnte ein durch das Tauchen hervorgerufener IOD-Anstieg detektiert werden, der für Glaukom-Patienten eventuell gefährlich werden könnte. Eventuell blieben daher Druckspitzen unentdeckt, die durch den erhöhten Umgebungsdruck in der Tiefe während des Tauchganges auftreten und die sich nach dem Auftauchen bereits wieder normalisiert haben könnten. Da es für Glaukom-Patienten sehr wichtig ist, größere Fluktuationen mit damit einhergehenden Druckspitzen zu vermeiden [20,109,110], lassen die Ergebnisse dieser Studie keine endgültigen Schlussfolgerungen zur Risikoabschätzung für Taucher mit Glaukom zu. Hierzu könnten beispielsweise Untersuchungen mit Druck-sensitiven Kontaktlinsen aufschlussreich sein. Diese wurden in der Schweiz entwickelt und sind dort bereits seit einigen Jahren zugelassen, um eine kontinuierliche 24-h-Messung des IODs im ambulanten Setting zu erhalten. So können Fluktuationen des IODs unter alltäglichen Belastungssituationen detektiert werden. Der zugehörige Empfänger für die IOD-Signale kann dabei auf die Haut geklebt oder in eine Brille integriert werden [18,20,111]. Dies wäre eventuell auch mit einer Tauchermaske möglich und würde damit eine kontinuierliche IOD-Messung unter Wasser über den gesamten Tauchgang hinweg ermöglichen.

Eine weitere Möglichkeit, den IOD unter erhöhten Umgebungsdrücken zu messen, bestände darin, ihn bei Teilnehmern in einer Druckkammer zu messen. Hier könnte auch der Einfluss von Umgebungsdruck-induzierten Veränderungen vor und nach einer Kammersitzung untersucht werden. Zudem ließe sich der Zeitraum für eine Nachuntersuchung ohne größeren Aufwand verlängern.

In dieser Studie wurde der IOD im Zeitraum innerhalb der ersten zehn Minuten nach Tauchgangsende untersucht. Wegen tauchorganisatorischer Vorgaben bestanden enge zeitliche Vorgaben, die leider nur wenige weitere Messungen nach der 10-min-Messung ermöglichten. Die vorliegenden 30- und 60-min-Werte lassen kein einheitliches Muster der IOD-Entwicklung erkennen, jedoch zeigen die Ergebnisse eine Tendenz zur Normalisierung des IODs in Richtung des Ausgangswertes.

### 4.2.3 Tageszeitliche Schwankungen

Es ergibt sich die Frage, ob der Tagesverlauf-abhängige IOD, durch das Tauchen zu unterschiedlichen Tageszeiten unterschiedlich beeinflusst wird. Auf diesen möglichen Zusammenhang wurde in dieser Arbeit nicht eingegangen. Das lag einmal an der geringen Stichprobengröße und zum anderen an den Messwiederholungen und den damit abhängigen Daten. Zwar wurden zum Beispiel morgens insgesamt 30 Tauchgänge durchgeführt, jedoch nicht von 30 verschiedenen sondern nur von den 16 Teilnehmern. Im Falle einer vergleichbaren Studienpopulation ( $N = 16$ ), müsste beispielsweise von jedem Teilnehmer über mehrere Tage hinweg immer morgens, mittags, abends *und* nachts ein Tauchgang durchgeführt werden, damit von jedem Teilnehmer zu jedem Tageszeitpunkt gleich viele Messungen zur Verfügung ständen.

### 4.2.4 Einschränkung der signifikanten Korrelationen

Die Taucherfahrung wurde durch die Anzahl der bisher durchgeführten Tauchgänge, die Anzahl der Tauchjahre und die daraus resultierende Anzahl an Tauchgängen pro Tauchjahr definiert. Da die signifikante Korrelation des IOD jedoch nur mit einem dieser drei Faktoren (= Tauchjahre) besteht, kann eine geringer ausgeprägte Veränderung des IOD nicht grundsätzlich für Taucher mit großer Taucherfahrung angenommen werden.

Ebenso verhält es sich mit dem Zusammenhang zwischen dem IOD und der Tauchtiefe. Warum hier eine signifikante Korrelation ausschließlich für den 5. Tauchgang zutrifft, ist zunächst nicht ersichtlich, weshalb eine genauere Betrachtung der Werte dieses Tauchgangs nötig wird. Da sich die durchschnittliche Tiefe des 5. Tauchgangs nicht wesentlich von den anderen Tauchgängen unterscheidet (Tab. 15), ist die Tiefe höchstwahrscheinlich nicht der ausschlaggebende Faktor für die

Korrelation. Analysiert man die Variable „Differenz des IODs“ der sechs Tauchgänge (Tab. 17), fällt auf, dass der Mittelwert der ersten 4 Tauchgänge positive Werte, der Mittelwert von Tauchgang 5 und 6, und auch der über alle Tauchgänge gemittelte Wert, negative Werte annimmt. Das bedeutet, dass bei den Tauchgängen 1-4 der gemittelte IOD vor dem Tauchen größer war, als der gemittelte IOD nach dem Tauchen. Bei Tauchgang 5 und 6 verhielt es sich entgegengesetzt. Selbiges gilt für den Gesamtwert. Ein weiterer Unterschied ist der Betrag der Werte dieser Variable: Tauchgang 5 weist mit einem Mittelwert von  $|1,33|$  mmHg den einzigen Wert auf, der  $> 1$  mmHg ist, während sich alle anderen Mittelwerte in einem Bereich von  $|0,13|$  bis  $|0,69|$  mmHg aufhalten. Die Differenz ( $\Delta$ ) zwischen dem IOD vor und dem nach dem Tauchen ist demnach für Tauchgang 5 um das Zwei- bis Zehnfache größer, als bei den anderen Tauchgängen und dem Gesamtwert. Bei der Überprüfung der gemessenen Einzelwerte fällt auf, dass während keinem Tauchgang so viele Werte oberhalb des Grenzbereichs liegen, wie bei Tauchgang 5. Hier weisen 50% der Teilnehmer einen IOD von  $> 21$  mmHg auf. Im Vergleich erreichen nur 6,3% beim ersten, 0% beim zweiten, 12,5% beim dritten, 18,8% beim vierten und 25% beim sechsten Tauchgang Werte über 21 mmHg. Zudem wurde der 5. Tauchgang zu gleichen Anteilen morgens, mittags und nachmittags durchgeführt, weshalb die Tageszeit als Einflussfaktor ausgeschlossen werden kann. Ein möglicher bisher unberücksichtigter Einfluss durch die Umgebungsbedingungen kann ausgeschlossen werden, weil der 5. Tauchgang der einzelnen Teilnehmer an unterschiedlichen Tagen durchgeführt wurde. Warum der IOD nach Tauchgang 5 erhöhte Werte annimmt, bleibt daher ungewiss.

### 4.3 Aktuelle Studienlage

Zahlreiche Publikationen beschäftigen sich mit der Physiologie und Pathologie des Tauchens und den damit einhergehenden Auswirkungen auf den menschlichen Organismus. Für den Fachbereich Ophthalmologie lassen sich deutlich weniger Publikationen zum Thema 'Tauchen' finden. Eine ohne Einschränkungen durchgeführte Recherche in der Literaturdatenbank der National Library of Medicine (PubMed, USA) erbrachte am 09.08.2018 die in Tabelle 22 zusammengestellten Ergebnisse. Hierdurch wird ersichtlich, dass die aktuelle Studienlage zu ophthalmologischen Aspekten beim Tauchen mit autonomer Luftversorgung (SCUBA-Tauchen) sehr gering ist und Forschungsbedarf besteht.

	Suchbegriff	Anzahl der Ergebnisse in PubMed
<b>Tauchen allgemein</b>	scuba diving	1259
	recreational diving	453
	decompression sickness	3805
	barotrauma & diving	2096
	nitrogen narcosis	403
	inert gas narcosis	333
	oxygen toxicity & diving	155
	arterial gas embolism	230
<b>Tauchen &amp; Auge</b>	hyperbaric ophthalmology	145
	ocular barostress	1
	ocular barotrauma & diving	17
	intraocular pressure & diving	13
	mask squeeze	14
	glaucoma & diving	4
	contact lens & diving	18

**Tabelle 22:** Anzahl der Suchergebnisse bestimmter Begriffe in PubMed

Die ersten Untersuchungen des IODs beim Tauchen führten Kalthoff et al. durch [112,113]. Auf diese ersten Erkenntnisse, die 1975 und 1976 in der Fachzeitschrift *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* veröffentlicht wurden, wird seither mangels neuerer Untersuchungen auch in aktuellen Studien immer wieder verwiesen. Kalthoff et al. beobachteten damals den IOD von je 30 Probanden in einer Druckluftkammer oder beim Tauchen/Schnorcheln. Die Resultate der Studien zeigten für Patienten mit einem Offenwinkelglaukom, die noch keine Schädigung des Sehnervs aufwiesen, keine relevanten Einschränkungen beim SCUBA-Tauchen oder Schnorcheln, da die hier auftretenden Fluktuationen des IODs mit 2-3 mmHg nur gering ausgeprägt waren und im weiteren Verlauf schnell wieder abklagen. Bei bereits vorliegender Schädigung des N. opticus wurde jedoch dringend vom Tauchen sowie vom Schnorcheln abgeraten, da es durch die tauchbedingte Vasokonstriktion aufgrund von Kälte, erhöhten Sauerstoffpartialdrücken oder dem Tauchreflex zu einer Minderversorgung der Sehnervpapille kommen kann. Ein Tauchverbot wurde von Kalthoff und Mitarbeitern ebenfalls für Patienten ausgesprochen, die an einem

Winkelblockglaukom litten, da es bei engem Kammerwinkel vor allem während des Auftauchens zu einem akuten Glaukomanfall kommen kann. Die Tauchtauglichkeit ist demnach auch für Menschen mit engem Kammerwinkel ohne diagnostiziertem Glaukom fraglich [112,113]. Da der IOD bei Personen mit engem Kammerwinkel auch beim Schnorcheln auf kritische Werte ansteigen kann, sollte auch diese Sportart unterlassen werden [112,114,115]. Die Erkenntnisse von Kalthoff et al. wurden erneut unter anderem von Muth et al. in einem Artikel zur Tauchtauglichkeit, der 2002 in der *Deutschen Zeitschrift für Sportmedizin* erschien, bestätigt [116].

Die von Kalthoff et al. beschriebenen Fluktuationen des IODs von 2-3 mmHg konnten in der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt werden. In Tabelle 17 sind die Minima und die Maxima der Differenz des IODs von je einem Teilnehmer zusammengestellt. Der Betrag der Differenz entspricht der durch das Tauchen hervorgerufenen Veränderung des IODs, die Werte von | 3,3 | bis | 11,7 | mmHg annimmt. Die Fluktuation des IODs ist demnach zumindest teilweise deutlich größer als 3,0 mmHg: Eine detaillierte Analyse aller Einzelwerte der Differenz des IODs vor und nach dem Tauchen zeigt, dass 35,4% der Werte größer als 3 mmHg und 42,7% der Werte kleiner als 2 mmHg sind. Insgesamt liegen also mit 78,1% mehr als  $\frac{3}{4}$  der Werte außerhalb des von Kalthoff et al. beschriebenen Bereichs von 2-3 mmHg. Die Fluktuation des IODs in dieser Studie ist demnach insgesamt größer.

Eine weitere interessante Studie stammt von Van de Veire et al. aus dem Jahre 2008 [117]. Sie untersuchten an 27 Probanden die Auswirkungen auf den IOD bei steigendem Umgebungsdruck in einer Druckkammer. Auch in dieser Studie handelte es sich ausschließlich um augengesunde Probanden. Messungen des IOD fanden unter anderem bei 1 bar, 5 min nach Erreichen eines Luftdrucks von 2 bar (~10 m Tauchtiefe) und erneut 5 min nach Abfallen des Drucks auf 1 bar statt. Es konnte eine signifikante Abnahme des IODs um 2-3 mmHg bei Zunahme des Umgebungsdrucks von 1 auf 2 bar festgestellt werden. Nach Normalisierung des Drucks auf ursprüngliche 1 bar, zeigte auch der IOD eine deutliche Tendenz, auf das Ausgangsniveau zurückzukehren, jedoch ohne dieses innerhalb der festgelegten 5 min zu erreichen. Dieser Verlauf zeigte sich bei allen Studienteilnehmern. Somit wurde angenommen, dass ein erhöhter Umgebungsdruck aufgrund des dadurch sinkenden IOD kein Risiko für Glaukom-Patienten darstellt.

Unterstellt man einen linearen Zusammenhang, hätte der IOD in unserer Studie während des Aufenthalts unter Wasser noch deutlicher sinken müssen, da sich die Taucher durchschnittlich in Tiefen von ca. 20-30 m aufhielten und somit einem Umgebungsdruck von 3-4 bar ausgesetzt waren. Der Umgebungsdruck erreicht demnach hier doppelt so hohe Werte wie in den oben beschriebenen Untersuchungen in der Druckkammer. Da die Messung des IODs in dieser Studie jedoch erst nach dem Tauchen durchgeführt wurde, bleibt der von Van de Veire et al. beschriebene Zusammenhang in unserem Fall Spekulation. Denn geht man von einem ähnlichen Zeitverlauf wie bei Van de Veire et al. aus, hätte der IOD nach dem Tauchgang bereits wieder das Ausgangsniveau erreicht. Zur Klärung dieser Frage könnten kontinuierliche Messungen des IOD während eines Tauchgangs beitragen.

Im Zusammenhang mit der Frage, ob Glaukom-Patienten tauchen dürfen, ist nach Butler (1995) und Quigley (1993) nicht der maximale Druck ausschlaggebend, dem das Auge beim Tauchen ausgesetzt wird, sondern der jeweilige Unterschied zwischen intra- und extraokularem Druck. Das bedeutet, dass auch dann, wenn der IOD in großen Tiefen sehr hohe Werte erreichen würde, die Differenz zum dort herrschenden Umgebungsdruck nur gering ist [73,118]. Butler beschäftigte sich 1995 intensiv mit den Auswirkungen des Tauchens auf das Auge, nachdem damals die Nachfrage von Glaukom-Patienten bezüglich des zu erwartenden Risikos für ein Fortschreiten der Erkrankung durch den Tauchsport stieg. Der Autor setzte sich dabei unter anderem auch mit den Folgen einer veränderten Optik und des erhöhten Drucks unter Wasser (okulares Barotrauma, Augenbeteiligung im Rahmen der Dekompressionskrankheit) auseinander, ging auf ophthalmologische Komplikationen der hyperbaren Sauerstofftherapie ein, die zur Behandlung von Tauchzwischenfällen zum Einsatz kommt und sprach Empfehlungen zum Tauchen nach Augenchirurgischen Eingriffen und während der Anwendung medikamentöser ophthalmologischer Therapien aus. Zudem führte er das Auge betreffende Aspekte zur Tauchtauglichkeit auf. Laut Butler seien lediglich Glaukom-Patienten nicht tauchtauglich, deren Sehverlust so weit fortgeschritten ist, dass dadurch die Orientierung und Kommunikation unter Wasser eingeschränkt ist. Den Patienten, die sich einer Filtrationsoperation zur Behandlung des Glaukoms unterzogen hatten, wurde nahe gelegt, für mindestens zwei Monate nach der Operation nicht zu tauchen und danach besonders sorgfältig auf den Druckausgleich in der Tauchmaske zu achten. Damit sollte ein Barotrauma vermieden

werden, welches das Filterkissen zerstören könnte. Ansonsten stellt der Eingriff lediglich eine relative Kontraindikation dar [73].

Nach heutigen Empfehlungen können Patienten mit einem Offenwinkelglaukom, die therapeutisch gut eingestellt sind und die noch keine Zeichen einer Schädigung des Sehnervs aufweisen, bedenkenlos tauchen. Eine absolute Kontraindikation stellt im Gegensatz hierzu das unbehandelte Winkelblockglaukom dar, bei welchem strengstes Tauchverbot gilt. Allerdings wird in jedem Fall, in dem anamnestisch ein Glaukom identifiziert wurde, zu einer fachärztlichen Kontrolle und einer individuellen tauchsportärztlichen Untersuchung geraten [119].

Unsere Untersuchungen zeigen keine signifikanten Veränderungen des IODs durch das Tauchen. Vergleicht man die Ausgangswerte vor dem Tauchen mit den Werten nach dem Tauchen, zeigt sich in 52,1% der Fälle ein Abfall und in 47,9% ein Anstieg (vgl. Kapitel 3.2.1, Abb. 17 + 18). An dieser Stelle soll deshalb auf drei weitere Größen eingegangen werden, die in dieser Studie nicht berücksichtigt wurden, aber einen Einfluss auf den IOD haben könnten.

#### 4.3.1 Effekt von Schwimmbrillen oder Tauchermasken

Zum Thema Schwimmbrillen/Tauchermasken und intraokularer Druck finden sich nur wenige Studien und einige Fallberichte.

**Schwimmbrillen.** Nach Ma et al (2007) steigt der IOD sofort nach dem Aufsetzen einer Schwimmbrille signifikant an. Während des Tragens bleibt der erhöhte Wert bestehen und sinkt wieder auf das Ausgangsniveau, sobald die Schwimmbrille abgenommen wird [120].

Morgan et al. beschäftigten sich 2008 ebenfalls mit den Auswirkungen einer Schwimmbrille auf den IOD. Sie postulierten, dass die Spannung des elastischen Kopfbandes einer Schwimmbrille, die via Gummiabdichtung des Rahmens auf die Augenhöhle übertragen wird, den Druck auf das Gewebe der Orbita erhöht und zu einer Kompression des Bulbus führt, woraus der beobachtete nachhaltig erhöhte IOD resultiert [121]. Auch Paula et al. beschreiben diesen Effekt in einer Studie von 2016: je größer die Spannung des Gummibandes um den Kopf, desto höher der Druck auf das periorbitale Gewebe und der damit einhergehende Anstieg des IODs [122]. Zudem

wurde mehrfach gezeigt, dass kleine Schwimmbrillen im Vergleich zu Schwimmbrillen mit größerem Rahmen einen größeren Effekt auf den IOD ausüben [121,123,124].

**Tauchermasken.** Senn et al. veröffentlichten 2001 eine klinische Studie, in welcher die okuläre Druckbelastung und das Risiko eines Barotraumas des Auges an 15 Sporttauchern untersucht wurden. Bis dato lagen keinerlei vergleichbare Messungen der Druckbelastung von Auge und dem umliegenden Gewebe vor. Der Studie zufolge treten durch Druckausgleich vermeidbare Schädigungen des Auges häufiger bei Tauchanfängern als bei erfahrenen Tauchern auf. Bei regelmäßig und adäquat durchgeführtem Druckausgleich sind die Druckschwankungen in der Tauchermaske jedoch klinisch irrelevant [92]. Goenadi et al. (2016) untersuchten den Effekt einer Tauchermaske auf den IOD und fanden heraus, dass dieser durch das Tragen einer Tauchermaske, anders als durch eine Schwimmbrille, nicht signifikant ansteigt. Demnach würde das Tragen einer Tauchermaske während eines Tauchganges gegenüber den Bedingungen in der Druckkammer keinen Unterschied hervorrufen. Bei der Studie von Goenadi et al. wurde also allein der Effekt der Tauchermaske auf den IOD ausgewertet, also ohne den Einfluss des Umgebungsdrucks beim Tauchen. Zudem wurde das Glas der Tauchermaske entfernt, um den IOD messen zu können. Damit wurde lediglich die Auswirkung des Brillenrahmens und des Maskenbands, das um den Kopf gelegt wird, auf den IOD untersucht, ohne dass eine Abdichtung gegenüber dem Außendruck vorlag [125].

Inzwischen sind einige klinische Fallberichte über okuläre Barotraumatata („mask squeeze“) beim SCUBA-Tauchen in der Literatur zu finden. Dabei werden sowohl subperiostale (bezogen auf das Periost der Orbita) [85–87,90,126–128] sowie retrobulbäre [129] Hämatome beschrieben, die teilweise mit dem Sehen von Doppelbildern (*Diplopie*) einhergehen [130,131]. In der vorliegenden Studie traten keine der genannten Schäden auf.

#### **4.3.2 Effekt des erhöhten Sauerstoffpartialdrucks**

Die Auswirkungen eines erhöhten Sauerstoffpartialdrucks sind aufgrund der in der Medizin vielseitig angewandten hyperbaren Sauerstofftherapie (HBO-Therapie; z.B. bei chronischen Wunden, Knochenbrüchen und –nekrosen, CO-Intoxikation [132]) weitgehend bekannt.

Ersanli et al. untersuchten den Effekt von hyperbarem Sauerstoff auf den IOD bei einem Umgebungsdruck von 2,5 bar in einer Druckkammer. Bei der 60-min Exposition atmeten die Teilnehmer an dieser Studie nicht Luft, sondern 100% Sauerstoff. Der  $pO_2$  betrug also 2,5 bar. Das Ergebnis war eine signifikante Abnahme des intraokularen Drucks. Dieses Ergebnis lässt sich allerdings wegen der ausgeprägten hyperoxischen Bedingungen nur bedingt mit anderen Studien vergleichen [133]. In weitgehender Übereinstimmung mit Ersanli et al zeigen Evanger et al., dass der IOD unmittelbar nach Beginn einer einmaligen Anwendung einer 90-min HBO-Therapie mit 100%igem Sauerstoff ( $pO_2 = 2,4$  bar) für kurze Zeit sinkt, jedoch im weiteren Verlauf den Ausgangswert schnell wieder erreicht. Es handelt sich dementsprechend lediglich um einen transienten Effekt. [134].

Auch die Taucher unserer Studie waren über einen Zeitraum von durchschnittlich 50 Minuten einem erhöhten  $pO_2$  ausgesetzt. Dieser steigt in der Tiefe von ca. 20-30 m bei normaler Inspirationsluft allerdings nur auf 0,63-0,84 bar (Tab. 3). Bei dem ebenfalls verwendeten Nitrox32 steigt der  $pO_2$  auf Werte von 0,96 bis 1,28 bar. Damit war der  $pO_2$  bei den beschriebenen Tauchgängen deutlich geringer als bei den HBO-Sitzungen, bei welchen die Teilnehmer 100% Sauerstoff einatmeten, wodurch sie  $pO_2$ -Werten von 2,4 bar (Evanger et al., 2018) oder 2,5 bar (Ersanli et al., 2006) ausgesetzt waren.

Durch die Inspiration von 100%igem  $O_2$  kommt es zu einer Vasokonstriktion der retinalen Gefäße [135–137], die indirekt den Abfall des IODs bedingen könnte. Ob dieser Effekt auch durch einen geringeren  $O_2$ -Partialdruck von 0,42 (Van de Veire et al., 2008) oder von 0,68-1,28 bar (vorliegende Studie) induziert wird, bleibt auf Grund fehlender Messungen zum exakten Zeitpunkt des Einwirkens des erhöhten  $pO_2$  unter Wasser Gegenstand weiterer Forschung.

#### **4.3.3 Effekt von Herzfrequenz, Blutdruck und körperlicher Belastung**

Die meisten der bisher erwähnten Untersuchungen fanden unter thermoneutralen Bedingungen statt, während der sich die Teilnehmer nicht aktiv bewegen mussten und während sie saßen. In der vorliegenden Arbeit wurden im Gegensatz dazu aktive Tauchgänge in horizontaler Körperlage ausgeführt.

Seit mehr als 25 Jahren ist bekannt, dass körperliche Anstrengung einen nicht zu vernachlässigenden Effekt auf den IOD hat [138]. In mehreren jüngeren Publikationen wurde ein sinkender IOD durch Sport beschrieben: Karabatakis et al. (2018) beschrieben einen signifikanten Abfall des IOD nach einem 20-min Dauerlauf. Ein linearer Zusammenhang zwischen dem steigenden Blutdruck, zunehmender Herzfrequenz und sinkendem IOD wurde dabei nicht festgestellt [139]. Nach Risner et al. (2009) führt eine dynamische körperliche Aktivität zu einem ausgeprägten Abfall des IOD, der allerdings nur kurz anhält [140]. Dies bestätigen auch Najmanova et al. (2016), die Veränderungen des IOD nach 30-min Belastung auf dem Fahrrad-Ergometer untersuchten. Es wurden Messungen vor der Belastung, sofort danach, sowie 5, 10, 20 und 30 min nach der Belastung durchgeführt. Sofort nach Beenden der Fahrrad-Ergometrie sowie 5 und 10 min danach war der IOD signifikant abgefallen. Hierbei korrelierte die Veränderung des IOD mit seinem Ausgangswert und der initialen Herzfrequenz [141]. Yan et al. (2016) liefern als Begründung für den sinkenden IOD die durch körperliche Belastung gesteigerte Sympathikusaktivität, die eine Erweiterung des Schlemmkanals und des Trabekelwerks bedingt, wodurch das Kammerwasser schneller abfließen kann [142].

Im Gegensatz hierzu steht die These, dass beim Tauchen insbesondere die parasympathische Aktivität steigt [143], mit der eine deutliche Verringerung der Herzfrequenz einhergeht. Dieses als Tauchbradykardie bezeichnete Phänomen hilft Wassersäugetieren, länger in Apnoe zu tauchen. So sinkt z.B. die Herzfrequenz von Seelöwen von ca.  $110 \text{ min}^{-1}$  vor dem Tauchgang auf Werte bis unter  $20 \text{ min}^{-1}$  in der größten Tiefe [144]. Hierdurch wird der Sauerstoffverbrauch deutlich gesenkt. In geringerem Ausmaß tritt die Tauchbradykardie auch beim Menschen auf. Die Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin e.V. schreibt hierzu: „Es kommt zwar (...) zu einer Verlangsamung des Herzschlags, doch tritt dieser Effekt nur sehr langsam ein und erreicht nur eine Frequenzverminderung um max. 30%. (...) Insgesamt ist eine nennenswerte Sauerstoffeinsparung beim Menschen im Vergleich zur Situation an Land nicht festzustellen“ [58]. In einigen Studien, die sich mit den Auswirkungen des SCUBA-Tauchens auf das kardiovaskuläre System auseinandersetzen, wurde die reduzierte Herzfrequenz bestätigt [63,143,145–147]. Es wird darauf hingewiesen, dass eine Vasokonstriktion in der Peripherie ein Teil der Tauchantwort ist.

Am Auge führt der Parasympathikus zu einer Aktivierung zweier Muskeln: Der *M. sphincter pupillae*, ein ringförmiger Muskel, der eine Engstellung (*Miosis*) der Pupille

bewirkt und der *M. ciliaris*. Die Kontraktion des letzteren Muskels führt unter anderem zu einer Erweiterung des Kammerwinkels, wodurch das Kammerwasser besser abfließen kann. Die Konsequenz ist ein Absinken des IODs. Ob dieser Effekt des vegetativen Nervensystems am Auge auch beim Tauchen eine Rolle spielt, müsste in zukünftigen Studien genauer untersucht werden. In unserer Studie konnte dieser parasymphatisch vermittelte Effekt nicht eindeutig nachgewiesen werden. Hier zeigt sich zunächst kein großer Unterschied zwischen den IOD-Werten vor und nach dem Tauchen, jedoch zeigt sich eine Tendenz der IOD-Zunahme nach dem Tauchen im Verlauf der einzelnen Tauchgänge (vgl. Kapitel 3.2.1)

Beim Tauchen, wie auch bei anderen körperlichen Aktivitäten, kommt es zu einem Anstieg des Blutdrucks. Aus der Umverteilung des Blutvolumens von der Peripherie nach zentral in die thorakalen Gefäße nach Immersion und Submersion, resultiert eine Volumenbelastung des Herzens (die Vorlast des Herzens steigt). Folglich steigen das enddiastolische Volumen und das Schlagvolumen [148,149]. Zusätzlich führen die erhöhte Wärmespeicherkapazität und Wärmeleitfähigkeit von Wasser im Vergleich zu Luft zu einem Abkühlen des Tauchers. Die dadurch zusätzlich hervorgerufene Vasokonstriktion peripherer Gefäße bedingt eine erhöhte Nachlast des Herzens. Der Blutdruck steigt an. Die Vasokonstriktion wird zudem durch die direkte gefäßverengende Wirkung von Sauerstoff verstärkt, dessen Partialdruck unter Wasser erhöht ist [135–137,148]. Einer Studie der Abteilung für Sportmedizin der Universität Göttingen zufolge, erreicht der Blutdruck bei jeweils gleicher Belastungsintensität unter Wasser statistisch signifikant höhere systolische Blutdruckwerte als unter Normalbedingungen [150]. Ein erhöhter Blutdruck wiederum kann zu einer Erhöhung des IODs führen [151], da dieser eine vermehrte Kammerwasserproduktion durch verstärkte Ultrafiltration zur Folge hat [152,153].

Unsere Studie zeigt inhomogene, durch die Tauchgänge hervorgerufene IOD-Veränderungen. Es könnte sein, dass diese einerseits Ausdruck einer Sympathikusaktivierung durch die körperliche Aktivität zusammen mit oben beschriebenen Effekten unter Wasser und andererseits einer gegenläufigen Vagusaktivierung durch die Tauchantwort sind.

Da fünf Teilnehmer unserer Studie Hypertoniker waren, wurde der IOD dieser Teilnehmer genauer betrachtet. Es sollte der Frage nachgegangen werden, ob die IOD-Werte dieser fünf Teilnehmer einerseits zu den 11,5 % gehörten, die bereits vor

dem Tauchen erhöht waren (vgl. Kapitel 3.1.4), und andererseits zu den 47,9 % der Messungen gehörten, bei welchen der Druck nach dem Tauchen den Druck vor dem Tauchen überstieg. (vgl. Kapitel 3.2.1). Es präsentierte sich folgende Konstellation: 11 der 96 Messungen (11,5 %) zeigten bereits vor dem Tauchgang erhöhte IOD-Werte. Sechs dieser 11 Messungen waren von denjenigen Teilnehmern, die anamnestisch einen Hypertonus angaben. Dies entspricht einem Anteil von 54,0 %. Bei 46 der 96 Messungen (47,9 %) war der IOD nach dem Tauchen höher als zuvor. Von diesen 46 Messungen wiederum waren 16 Messungen von Probanden mit Hypertonus, was einem Anteil von 34,8 % entspricht. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die Situation „IOD nach dem Tauchen ist höher, als vor dem Tauchen“ für jeden einzelnen Probanden mindestens einmal zutrifft. Diese Situation ist hierbei unter den Hypertonie-Patienten nicht häufiger zu finden, als unter den restlichen Teilnehmern ohne Hypertonus. Demnach ist der Anstieg des IODs nach dem Tauchen oder aber auch der von vornherein höhere IOD nicht allein durch das Vorliegen einer Hypertonie zu erklären.

## 5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die Auswirkungen des SCUBA-Tauchens auf den Augeninnendruck (IOD) bei ophthalmologisch gesunden Probanden untersucht. Dadurch sollte das Risiko abgeschätzt werden, dem Glaukom-Patienten bei der Ausführung des Tauchsports ausgesetzt sind.

Da weder insgesamt noch bezogen auf einzelne Tauchgänge ein signifikanter Unterschied zwischen dem IOD vor und nach dem Tauchen festzustellen war, wird dieser Studie zufolge der IOD durch das Tauchen nicht bedeutsam beeinflusst. Demnach bestünde bei der Ausübung des Tauchsports auch für Patienten, die an einem Glaukom leiden, vermutlich kein erhöhtes Risiko für eine Progression der Erkrankung. Aufgrund der Limitationen der Studie sollte diese Hypothese jedoch durch weitere Untersuchungen verifiziert werden. Um signifikante IOD-Schwankungen gänzlich ausschließen zu können, müssten IOD-Messungen über den gesamten Tauchgang hinweg durchgeführt werden.

Ein weiterer wichtiger Befund besteht in dem negativen Zusammenhang zwischen dem IOD und der Anzahl der Tauchjahre: je höher die Anzahl der Tauchjahre war,

desto geringer war die IOD-Veränderung durch das Tauchen. Eine hohe Anzahl an Tauchjahren, die zumindest teilweise mit einer langjährigen Tauchererfahrung gleichgesetzt werden kann, bewirkt offenbar, dass der IOD beim Tauchen nicht ansteigt. Für Glaukom-Patienten mit langjähriger Taucherfahrung würde dies bedeuten, dass der Tauchsport weiterhin ausgeführt werden kann, da nicht mit großen IOD-Schwankungen zu rechnen ist. Jedoch sollte nicht mit dem Tauchsport begonnen werden, wenn ein Glaukom neu diagnostiziert wurde.

## 6 Literaturverzeichnis

- 1 *Bertram B.* Blindheit und Sehbehinderung in Deutschland: Ursachen und Häufigkeit. *Der Augenarzt* 2005; 39(6)
- 2 *Berufsverband der Augenärzte.* Augenärzte informieren: Blindheit. <https://augeninfo.de/cms/nc/hauptmenu/presse/statistiken/statistik-blindheit.html> (04.07.2018)
- 3 *Grehn F.* *Augenheilkunde.* 31st ed.: Springer Berlin Heidelberg; 2012
- 4 *Belgian Glaucoma Society.* Wat is glaucomom?; 2002. <http://www.glaucoma.be/> (10.07.2018)
- 5 *Finger RP, Bertram B, Wolfram C, Holz FG.* Blindness and visual impairment in Germany: A slight fall in prevalence. *Deutsches Arzteblatt international* 2012; 109(27-28): 484–489
- 6 *Sachsenweger M, Klauß V.* *Augenheilkunde.* 2nd ed. Stuttgart: Thieme; 2003
- 7 *Lang GK, Lang GE, Hrsg.* *Augenheilkunde essentials.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2015
- 8 *Erb C, Böhm A, Budde W.* Notwendigkeit einer stationären 24-Stunden-Augeninnendruck-Messung für die Glaukomdiagnostik. <https://www.dog.org/wp-content/uploads/2010/02/Zentrale-Aspekte-Klinischer-Studien1.pdf> (11.09.2018)
- 9 *Wilensky JT.* Diurnal variations in intraocular pressure. *Transactions of the American Ophthalmological Society* 1991; 89: 757–790
- 10 *Drance SM.* The significance of the diurnal tension variations in normal and glaucomatous eyes. *Archives of ophthalmology (Chicago, Ill. 1960)* 1960; 64: 494–501
- 11 *Katavisto M.* The diurnal variations of ocular tension in glaucoma. *Acta ophthalmologica. Supplementum* 1964: SUPPL 78:1-130
- 12 *Davanger M.* The difference in oclar pressure in the two eyes of the same person: In individuals with healthy eyes and in patients with glaucoma simplex. *Acta ophthalmologica* 1965; 43: 299–313
- 13 *David R, Zangwill L, Briscoe D et al.* Diurnal intraocular pressure variations: An analysis of 690 diurnal curves. *The British journal of ophthalmology* 1992; 76(5): 280–283
- 14 *Thiel R.* Die physiologischen und experimentell erzeugten Schwankungen des intraokularen Druckes im gesunden und glaukomatösen Auge. *Arch Augenheilkd* 1925; 96: 331

- 15 Weiss A. (Titel unbekannt). *Vestn Oftal* 1931(14): 93
- 16 Langlely D, Swanljung H. Ocular tension in glaucoma simplex. *The British journal of ophthalmology* 1951; 35(8): 445–458
- 17 Hager H. Die Behandlung des Glaukoms mit Miotika; Grundlagen, Einstellungstechnik und Erfolgsaussichten. *Bucherei des Augenarztes* 1958(29): 1–123
- 18 Göbel K, Rüfer F, Erb C. Physiologie der Kammerwasserproduktion sowie der Tagesdruckschwankungen und deren Bedeutung für das Glaukom. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 2011; 228(2): 104–108
- 19 Saccà SC, Rolando M, Marletta A et al. Fluctuations of intraocular pressure during the day in open-angle glaucoma, normal-tension glaucoma and normal subjects. *Ophthalmologica. Journal international d'ophtalmologie. International journal of ophthalmology. Zeitschrift für Augenheilkunde* 1998; 212(2): 115–119
- 20 Pfeiffer N. Messung des Augeninnendrucks mit einer Kontaktlinse: Bedeutung noch unklar. *Karger Kompass Ophthalmol* 2017; 3(3): 113–115
- 21 Baumann E. Stellungnahme der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft zur Glaukomvorsorge
- 22 Kass MA, Heuer DK, Higginbotham EJ et al. The Ocular Hypertension Treatment Study: A randomized trial determines that topical ocular hypotensive medication delays or prevents the onset of primary open-angle glaucoma. *Archives of ophthalmology (Chicago, Ill. 1960)* 2002; 120(6): 701-13; discussion 829-30
- 23 Chihara E. Assessment of true intraocular pressure: The gap between theory and practical data. *Survey of Ophthalmology* 2008; 53(3): 203–218
- 24 Berufsverband der Augenärzte. Augenärzte informieren: Glaukom. <http://cms.augeninfo.de/nc/hauptmenu/presse/statistiken/statistik-glaukom.html> (30.09.2017)
- 25 Borchad-Tuch C. Glaukom: Die Erblindung aufhalten. *ARS medici* 2012(7): 319–322
- 26 Drance SM. Diurnal variation of intraocular pressure in treated glaucoma. Significance in patients with chronic simple glaucoma. *Archives of ophthalmology (Chicago, Ill. 1960)* 1963; 70: 302–311
- 27 Hughes E, Spry P, Diamond J. 24-hour monitoring of intraocular pressure in glaucoma management: A retrospective review. *Journal of glaucoma* 2003; 12(3): 232–236
- 28 Koeller A, Boehm A, Paul D, Pillunat L. Frequency of Intraocular Pressure Spikes in Primary Open–Angle Glaucoma Patients. *Investigative ophthalmology & visual science* 2004(45)

- 29 *Wikipedia*. Volkskrankheit; 2018.  
<https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=174678831> (01.08.2018)
- 30 *Wolfram C, Pfeiffer N*. Weißbuch zur Situation der ophthalmologischen Versorgung in Deutschland; 2012
- 31 *Statistisches Bundesamt*. 80,5 Millionen Einwohner am Jahresende 2012 – Bevölkerungszunahme durch hohe Zuwanderung; 2013
- 32 *Quigley HA, Broman AT*. The number of people with glaucoma worldwide in 2010 and 2020. *The British journal of ophthalmology* 2006; 90(3): 262–267
- 33 *Klink T*. Glaukom: viele Betroffene, hohe Dunkelziffer. *Deutsche Apotheker Zeitung (DAZ)* 2009(15): 67
- 34 *Traverso CE, Walt JG, Kelly SP et al*. Direct costs of glaucoma and severity of the disease: A multinational long term study of resource utilisation in Europe. *The British journal of ophthalmology* 2005; 89(10): 1245–1249
- 35 *Bausch + Lomb*. Bausch + Lomb's Barometer of Global Eye Health Fact Sheet; 2012.  
<http://www.bausch.com/our-company/newsroom/fact-sheet> (25.09.2018)
- 36 *WHO*. Metrics: Disability-Adjusted Life Year (DALY).  
[http://www.who.int/healthinfo/global\\_burden\\_disease/metrics\\_daly/en/](http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/metrics_daly/en/) (01.08.2018)
- 37 *Wikipedia*. DALY; 2018. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=176933505> (01.08.2018)
- 38 *Weltgesundheitsorganisation*. The global burden of disease: 2004 update. Geneva; 2008
- 39 *WELT N24*. 100. Geburtstag: Jacques Cousteau – Ozeanforscher und Tierquäler; 2010. <https://www.welt.de/wissenschaft/umwelt/article7884567/Jacques-Cousteau-Ozeanforscher-und-Tierquaeler.html> (04.10.2017)
- 40 *CMAS*. The World Underwater Federation. <https://cmas.org/cmas/about> (23.05.2020)
- 41 *Martin L, Uhlmann M*. Geschichte des Tauchens und der Tauchtechnik.  
<http://www.200bar.de/technik/tauchgeschichte.php> (07.10.2017)
- 42 *Porter S*. PADI Statistics for padi.com. <https://www.padi.com/sites/default/files/2017-07/2017%20PADI%20WW%20Statistics.pdf> (30.09.2017)
- 43 *Clark JE*. Moving in extreme environments: Inert gas narcosis and underwater activities. *Extreme physiology & medicine* 2015; 4: 1
- 44 *Levett DZH, Millar IL*. Bubble trouble: a review of diving physiology and disease. *Postgraduate medical journal* 2008; 84(997): 571–578
- 45 *Undercurrent.org*. How Many Divers Are There?; 2007.  
[https://www.undercurrent.org/UCnow/dive\\_magazine/2007/HowManyDivers200705.html](https://www.undercurrent.org/UCnow/dive_magazine/2007/HowManyDivers200705.html) (03.08.2018)

- 46 *Spomedial*. Beziehung zwischen Druck und Tiefe; 2001. [http://vmrz0100.vm.ruhr-uni-bochum.de/spomedial/content/e866/e2442/e10003/e10010/e10132/e10146/index\\_ge.html](http://vmrz0100.vm.ruhr-uni-bochum.de/spomedial/content/e866/e2442/e10003/e10010/e10132/e10146/index_ge.html) (07.10.2017)
- 47 *Wikipedia*. Immersion; 2018. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=163354758> (03.08.2018)
- 48 *Wenzel J, Muth CM*. Physikalische und physiologische Grundlagen des Tauchens. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 2002; 53(6): 162–169
- 49 *Baer D, Hrsg.* Duden - das große Fremdwörterbuch: Herkunft und Bedeutung der Fremdwörter ; [mit "umgekehrtem" Wörterbuch: deutsches Wort - Fremdwort]. 2nd ed. Mannheim: Dudenverl; 2000
- 50 *sporttauchen.de*. Tauchphysik; 2004. <http://www.sporttauchen.de/tauchphysik.htm> (07.10.2017)
- 51 *Prohaska R, Welslau W*. Tauchen: Tauglichkeit, Zwischenfälle und Unfälle. In: Ottomann C, Seidenstücker K-H, editors. *Maritime Medizin*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2015: 205–225
- 52 *Wikipedia*. Nitrox; 2020. <https://de.wikipedia.org/wiki/Nitrox> (23.05.2020)
- 53 *Linares T*. Medikamente für die Anästhesie. In: Schäfer R, Söding P, editors. *Klinikleitfaden Anästhesie: Mit Zugang zur Medizinwelt*. 8th ed. München, Deutschland: Elsevier; 2017: 232–295
- 54 *Overtone CE*. Studien über die Narkose. Jena: Gustav Fischer Verlag; 1901
- 55 *Winter PM, Firestone LL*. Studies of narcosis: Charles Ernest Overton introduction. *Bulletin of anesthesia history* 2003; 21(2): 15-6,19
- 56 *Unsworth I.P.* Inert gas narcosis - an introduction. *Postgraduate medical journal* 1966: 378–385
- 57 *Bennett PB, Rostain JC*. Inert gas narcosis. In: Brubakk AO, Bennett PB, Elliot DH, editors. *Bennett and Elliott's physiology and medicine of diving*. 5th ed. Edinburgh: Saunders; 2007
- 58 *Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin e.V.* Tauchmedizin. <https://www.gtuem.org/197/tauchmedizin> (07.10.2017)
- 59 *Raymond K, Sanders R, Hrsg.* *Diving, Scuba*. Treasure Island (FL); 2017
- 60 *Graf C*. *Lehrbuch Sportmedizin: Basiswissen, präventive, therapeutische und besondere Aspekte*: Dt. Ärzte-Verlag; 2012
- 61 *Lippmann J, Mitchell S*. *Deeper into diving: An in-depth review of decompression procedures, and of the physical and physiological aspects of deeper diving*. 2nd ed. Melbourne [Australia]: J.L. Publications; 2005

- 62 *Eichhorn L, Leyk D.* Diving medicine in clinical practice. *Deutsches Arzteblatt international* 2015; 112(9): 147-57; quiz 158
- 63 *Brebeck AK.* Untersuchungen zum besseren Verständnis des Einflusses von O<sub>2</sub>-angereicherter Luft auf kardiopulmonale Parameter und kognitive Funktionen bei Gerätetauchern: Eine experimentelle Studie. Dissertationsschrift. Dresden; 2016
- 64 *Bühlmann AA.* Die Berechnung der risikoarmen Dekompression. Rechenmodell und Ergebnis der experimentellen Dekompressionsforschung. *Schweizerische medizinische Wochenschrift* 1988; 118(6): 185–197
- 65 *Zenske A.* Auswirkungen von Sauerstoff-angereicherter Atemgas auf Sporttaucher: Eine Feldstudie. Dissertationsschrift. Berlin; 2017
- 66 *Bennett PB, Marroni A, Cronje FJ et al.* Effect of varying deep stop times and shallow stop times on precordial bubbles after dives to 25 msw (82 fsw). *Undersea & hyperbaric medicine journal of the Undersea and Hyperbaric Medical Society, Inc* 2007; 34(6): 399–406
- 67 *Schellart NA, Brandt Corstius J-J, Germonpré P, Sterk W.* Bubble Formation After a 20-m Dive: Deep-Stop vs. Shallow-Stop Decompression Profiles. *asem* 2008; 79(5): 488–494
- 68 *Marabotti C, Scalzini A, Chiesa F.* Increase of pulmonary arterial pressure in subjects with venous gas emboli after uncomplicated recreational SCUBA diving. *Respiratory Medicine* 2013; 107(4): 596–600
- 69 *Bove AA.* Diving Medicine. *Am J Respir Crit Care Med* 2014; 189(12): 1479–1486
- 70 *Butler FK.* Decompression sickness. In: Gold DH, editor. *The Eye in systemic disease*. Philadelphia Pa. u.a.: Lippincott; 1990: 469–471
- 71 *Rivera J.* Decompression sickness among divers: An analysis of 935 cases. *Military medicine* 1964; 129: 314–334
- 72 *Summitt JK, Berghage TE.* Review of Diving Accident Reports 1968. Ft. Belvoir: Defense Technical Information Center: 1–70; 1970.  
<http://worldcatlibraries.org/wcpa/oclc/227626422>
- 73 *Butler FK.* Diving and hyperbaric ophthalmology. *Survey of Ophthalmology* 1995; 39(5): 347–366
- 74 *Davis JC, Sheffield PJ, Schuknecht L et al.* Altitude decompression sickness: Hyperbaric therapy results in 145 cases. *Aviation, space, and environmental medicine* 1977; 48(8): 722–730
- 75 *Silbermann U, Uhlmann M.* Sauerstoffvergiftung - Ursachen, Erste Hilfe und Vermeidung. <http://www.200bar.de/medizin/sauerstoffvergiftung.php> (01.10.2017)
- 76 *Hamilton RW.* Tolerating Oxygen Exposure. *SPUMS Journal* 1997(Vol 27 No. 1)

- 77 *Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin e.V.* O<sub>2</sub>-Vergiftung.  
<https://www.gtuem.org/983/tauchmedizin/o2-vergiftung> (23.05.2020)
- 78 *König P, Lipp A.* Lehrbuch für Forschungstaucher: Kapitel 4 -Die Auswirkungen des Druckes beim Tauchen. Hamburg; 2007
- 79 *Muth CM, Shank ES, Larsen B.* Der schwere Tauchunfall. Pathophysiologie--Symptomatik--Therapie. *Der Anaesthesist* 2000; 49(4): 302–316
- 80 *Medicineh.com.* Barotrauma & Dekompressionskrankheit (The Bends).  
<https://medicineh.com/16-barotrauma-decompression-sickness-10906> (08.06.2020)
- 81 *Malhotra MS, Wright HC.* Arterial Air Embolism during Decompression and Its Prevention. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 1961; 154(956): 418–427
- 82 *Strutz J.* Otorhinolaryngologische Aspekte zum Sporttauchen. *HNO* 1993; 41(8): 401–411
- 83 *Stibbe A.* Sporttauchen: Der sichere Weg zum Tauchsport. 10th ed. Bielefeld: Delius Klasing; 2008
- 84 *Bowman JC, Gossman W.* StatPearls: Diving Mask Squeeze. Treasure Island (FL); 2020
- 85 *Gómez-Ledesma I, Mencía-Gutiérrez E, Gutiérrez-Díaz E, Alonso-Santiago MA.* Orbital subperiosteal hemorrhage while scuba diving. *Orbit (Amsterdam, Netherlands)* 2006; 25(1): 19–22
- 86 *Rosenberry C, Angelidis M, Devita D.* Orbital subperiosteal hematoma from scuba diving. *Wilderness & environmental medicine* 2010; 21(3): 250–252
- 87 *Woo D, Rogers S, Leong J et al.* Non-traumatic subperiosteal orbital hemorrhage secondary to barotrauma. *Orbit (Amsterdam, Netherlands)* 2012; 31(5): 347–349
- 88 *Rudge FW.* Ocular barotrauma caused by mask squeeze during a scuba dive. *Southern medical journal* 1994; 87(7): 749–750
- 89 *Melamed Y, Shupak A, Bitterman H.* Medical problems associated with underwater diving. *The New England journal of medicine* 1992; 326(1): 30–35
- 90 *Andenmatten R, Piguet B, Klainguti G.* Orbital hemorrhage induced by barotrauma. *American journal of ophthalmology* 1994; 118(4): 536–537
- 91 *PADI.* The encyclopedia of recreational diving 1994: 257–259
- 92 *Senn P, Helfenstein U, Senn ML et al.* Okuläre Druckbelastung und Barotrauma. Studie an 15 Sporttauchern. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 2001; 218(4): 232-6; discussion 237-8
- 93 *Wikipedia.* Subconjunctival bleeding - Wikipedia; 2020.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Subconjunctival\\_bleeding](https://en.wikipedia.org/wiki/Subconjunctival_bleeding) (27.03.2020)

- 94 *Holland R.* Tauchen mit Kontaktlinsen. *Neues Optikerjournal* 2001(7-8): 47–56
- 95 *Bartmann H.* Taucher-Handbuch. Landsberg u.a: ecomed; 1989
- 96 *Doughty MJ, Zaman ML.* Human corneal thickness and its impact on intraocular pressure measures: A review and meta-analysis approach. *Survey of Ophthalmology* 2000; 44(5): 367–408
- 97 *Brandt JD, Beiser JA, Kass MA, Gordon MO.* Central corneal thickness in the Ocular Hypertension Treatment Study (OHTS). *Ophthalmology* 2001; 108(10): 1779–1788
- 98 *Wikipedia.* Pachymeter; 2018. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=175411575> (24.09.2018)
- 99 *Quantel medical.* Pocket II: Precision with one touch; 2017
- 100 *Fachinformation.* Conjuncaïn EDO; 2019
- 101 *Wikipedia.* Tonometrie; 2018. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=179397820> (25.09.2018)
- 102 *Icare Finland Oy.* Icare PRO-Tonometer - Gebrauchsanweisung: Deutsch. Espoo, Finland; 2012
- 103 *Munkwitz S, Elkarmouty A, Hoffmann EM et al.* Comparison of the iCare rebound tonometer and the Goldmann applanation tonometer over a wide IOP range. *Graefe's archive for clinical and experimental ophthalmology = Albrecht von Graefes Archiv für klinische und experimentelle Ophthalmologie* 2008; 246(6): 875–879
- 104 *Neuburger M, Rosentreter A, Dietlein TS, Jordan JF.* Messverfahren der Tonometrie. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 2011; 228(2): 118–124
- 105 *sunrise-and-sunset.com.* Sonnenaufgang und Sonnenuntergang Zeiten Male, Januar 2014. <http://www.sunrise-and-sunset.com/de/sun/malediven/male/2014/januar> (23.08.2018)
- 106 *Eglitis L.* laenderdaten.info: Durchschnittsgröße im weltweiten Vergleich. Oldenburg. <https://www.laenderdaten.info/durchschnittliche-koerpergroessen.php> (01.10.2018)
- 107 *Kim KN, Jeoung JW, Park KH et al.* Comparison of the new rebound tonometer with Goldmann applanation tonometer in a clinical setting. *Acta ophthalmologica* 2013; 91(5): e392-6
- 108 *Jablonski KS, Rosentreter A, Gaki S et al.* Clinical use of a new position-independent rebound tonometer. *Journal of glaucoma* 2013; 22(9): 763–767
- 109 *Gerste RD.* Therapie des Glaukoms: Fluktuation des Intraokulardrucks gilt es zu verhindern. *Dtsch Arztebl International* 2011; 108(49): A-2661-A-2662
- 110 *Draeger J.* Glaukom: Auf die Druckspitzen kommt es an. *Dtsch Arztebl International* 2012; 109(7): A-328-A-328

- 111 *Lamparter J, Hoffmann EM.* Messung des Augeninnendruckes (Tonometrie) mit unterschiedlichen Verfahren. *Der Ophthalmologe Zeitschrift der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft* 2009; 106(8): 676–682
- 112 *Kalthoff H, John S.* Verhalten des Augeninnendruckes beim Schnorcheln und Tauchen. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 1976; 168(02): 253–257
- 113 *Kalthoff H, John S, Scholz V.* Probleme des Augeninnendruckes beim Sporttauchen mit Gerät. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 1975; 166(4): 488–493
- 114 *Hyams SW, Friedman Z, Neumann E.* Elevated intraocular pressure in the prone position. A new provocative test for angle-closure glaucoma. *American journal of ophthalmology* 1968; 66(4): 661–672
- 115 *Kalthoff H.* Der Bauchlagenbelastungstest zur Diagnostik des Engwinkelglaukoms und die Ermittlung seines Grenzwertes mit Hilfe der Diskriminanzanalyse. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 1971; 159(1): 72–82
- 116 *Muth CM, Wendling J, Tetzlaff K.* Tauchtauglichkeitsuntersuchungen bei Sporttauchern mit besonderer Berücksichtigung medizinischer Grenzfälle. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 2002; 53(6)
- 117 *van de Veire S, Germonpre P, Renier C et al.* Influences of atmospheric pressure and temperature on intraocular pressure. *Investigative ophthalmology & visual science* 2008; 49(12): 5392–5396
- 118 *Quigley HA.* Open-angle glaucoma. *The New England journal of medicine* 1993; 328(15): 1097–1106
- 119 *Schnell D.* Augen. In: Tetzlaff K, Klingmann C, editors. *Moderne Tauchmedizin: Handbuch für Tauchlehrer, Taucher und Ärzte.* 2nd ed. Stuttgart: Alfons W. Gentner Verlag; 2012
- 120 *Ma KT, Chung WS, Seo KY et al.* The effect of swimming goggles on intraocular pressure and blood flow within the optic nerve head. *Yonsei medical journal* 2007; 48(5): 807–809
- 121 *Morgan WH, Cunneen TS, Balaratnasingam C, Yu D-Y.* Wearing swimming goggles can elevate intraocular pressure. *The British journal of ophthalmology* 2008; 92(9): 1218–1221
- 122 *Paula APB, Paula JS, Silva MJL et al.* Effects of Swimming Goggles Wearing on Intraocular Pressure, Ocular Perfusion Pressure, and Ocular Pulse Amplitude. *Journal of glaucoma* 2016; 25(10): 860–864
- 123 *Starr CE, Radcliffe NM.* Swimming goggles and elevated intraocular pressure. *The British journal of ophthalmology* 2009; 93(5): 700

- 124 *Kang MH, Morgan WH, Balaratnasingam C et al.* Case of normal tension glaucoma induced or exacerbated by wearing swimming goggles. *Clinical & experimental ophthalmology* 2010; 38(4): 428–429
- 125 *Goenadi CJ, Law DZ, Lee JW et al.* The Effect of a Diving Mask on Intraocular Pressure in a Healthy Population. *Case reports in ophthalmology* 2016; 7(2): 328–332
- 126 *Chen JC, Kucharczyk W.* Nontraumatic orbital subperiosteal hematoma in a scuba diver: CT and MR findings. *Journal of computer assisted tomography* 1988; 12(3): 504–506
- 127 *Butler FK, Gurney N.* Orbital hemorrhage following face-mask barotrauma. *Undersea & hyperbaric medicine journal of the Undersea and Hyperbaric Medical Society, Inc* 2001; 28(1): 31–34
- 128 *Crawford C, Mazzoli R.* Subperiosteal hematoma in multiple settings. *Digital journal of ophthalmology DJO* 2013; 19(1): 6–8
- 129 *Barron E.* The "Squeeze," an Interesting Case of Mask Barotrauma. *Air medical journal* 2018; 37(1): 74–75
- 130 *Latham E, van Hoesen K, Grover I.* Diplopia due to mask barotrauma. *The Journal of emergency medicine* 2011; 41(5): 486–488
- 131 *González-Pastor E, Fernández-Tresguerres F, Palomares-Fernández J, Toledano N.* Diplopia due to barotrauma. *Archivos de la Sociedad Espanola de Oftalmologia* 2016; 91(3): 142–144
- 132 *Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin e. V.* Hbo-Therapie. <https://www.gtuem.org/77/druckkammern/hbo-therapie> (27.04.2020)
- 133 *Ersanli D, Akin T, Yildiz S et al.* The effect of hyperbaric oxygen on intraocular pressure. *Undersea & hyperbaric medicine journal of the Undersea and Hyperbaric Medical Society, Inc* 2006; 33(1): 1–4
- 134 *Evanger K, Vaagbo G, Haugen OH.* Short-term effects on ocular variables immediately after hyperbaric oxygen exposures. *Undersea & hyperbaric medicine journal of the Undersea and Hyperbaric Medical Society, Inc* 2018; 45(4): 395–402
- 135 *Luksch A, Garhofer G, Imhof A et al.* Effect of inhalation of different mixtures of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> on retinal blood flow. *The British journal of ophthalmology* 2002; 86(10): 1143–1147
- 136 *Gilmore ED, Hudson C, Preiss D, Fisher J.* Retinal arteriolar diameter, blood velocity, and blood flow response to an isocapnic hyperoxic provocation. *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology* 2005; 288(6): H2912-7

- 137 *Hosking SL, Harris A, Chung HS et al.* Ocular haemodynamic responses to induced hypercapnia and hyperoxia in glaucoma. *The British journal of ophthalmology* 2004; 88(3): 406–411
- 138 *Qureshi IA.* Effects of exercise on intraocular pressure in physically fit subjects. *Clinical and experimental pharmacology & physiology* 1996; 23(8): 648–652
- 139 *Karabatakis VE, Natsis KI, Chatzi balis TE et al.* Correlating Intraocular Pressure, Blood Pressure, and Heart Rate Changes after Jogging. *European Journal of Ophthalmology* 2018; 14(2): 117–122
- 140 *Risner D, Ehrlich R, Kheradiya NS et al.* Effects of exercise on intraocular pressure and ocular blood flow: A review. *Journal of glaucoma* 2009; 18(6): 429–436
- 141 *Najmanova E, Pluhacek F, Botek M.* Intraocular Pressure Response to Moderate Exercise during 30-Min Recovery. *Optometry and vision science official publication of the American Academy of Optometry* 2016; 93(3): 281–285
- 142 *Yan X, Li M, Song Y et al.* Influence of Exercise on Intraocular Pressure, Schlemm's Canal, and the Trabecular Meshwork. *Investigative ophthalmology & visual science* 2016; 57(11): 4733–4739
- 143 *Noh Y, Posada-Quintero HF, Bai Y et al.* Effect of Shallow and Deep SCUBA Dives on Heart Rate Variability. *Frontiers in physiology* 2018; 9: 110
- 144 *McDonald BI, Ponganis PJ.* Deep-diving sea lions exhibit extreme bradycardia in long-duration dives. *The Journal of experimental biology* 2014; 217(Pt 9): 1525–1534
- 145 *Winkler BE, Tetzlaff K, Muth C-M et al.* SCUBA-dive-related changes in heart rate in children. *Pediatric exercise science* 2011; 23(3): 388–398
- 146 *Marabotti C, Scalzini A, Menicucci D et al.* Cardiovascular changes during SCUBA diving: An underwater Doppler echocardiographic study. *Acta physiologica (Oxford, England)* 2013; 209(1): 62–68
- 147 *Brebeck AK.* Heart rate during recreational SCUBA-diving
- 148 *Muth C-M, Tetzlaff K.* Tauchen und Herz. *Kardiologische Aspekte des Sporttauchens. Herz* 2004; 29(4): 406–413
- 149 *Lin YC.* Circulatory functions during immersion and breath-hold dives in humans. *Undersea biomedical research* 1984; 11(2): 123–138
- 150 *Witten F.* Blutdruckverhalten beim Tauchen. Dissertation. Göttingen; 2000
- 151 *Erb C, Predel H-G.* Die Bedeutung der arteriellen Hypertonie für das primäre Offenwinkelglaukom. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 2014; 231(2): 136–143
- 152 *Carel RS, Korczyn AD, Rock M, Goya I.* Association between ocular pressure and certain health parameters. *Ophthalmology* 1984; 91(4): 311–314

- 153 *Pederson JE, Green K. Aqueous humor dynamics: Experimental studies. Experimental eye research 1973; 15(3): 277–297*

## 7 Danksagung

Ich möchte zunächst allen Teilnehmer der Studie danken, die während ihres Tauchurlaubs einen umfangreichen und durchweg positiven Einsatz gezeigt haben. Nur durch sie konnte diese Arbeit überhaupt ins Leben gerufen werden.

Vielen Dank an die Studienleiterin Dr. Anne-Kathrin Brebeck, die mir durch die Überlassung des Themas die Chance gab, den medizinischen Dokortitel zu erwerben.

Ein weiterer Dank geht an die Augenklinik der Universität Würzburg, die den Rebound-Tonometer *Icare® PRO* und das Pachymeter Pocket II™ für die Zeit der Datenerhebung uneingeschränkt zur Verfügung stellte und auch im Nachhinein jederzeit für weitere Fragen dazu offen war.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. C. Haritoglou, der ohne Zögern die Stelle meines Doktorvaters einnahm, als es aufgrund besonderer Umstände zu Problemen kam und ich zwischenzeitlich ohne einen universitären Vertreter war.

Zudem geht ein herzlicher Dank an Herrn Prof. Dr. J.D. Schipke, der mich durch mehrere sehr ausführliche, stets verständliche und anregende Korrekturen immer näher zur Fertigstellung meiner Arbeit führte und damit wesentlich zu dem Ergebnis beigetragen hat.

Zuletzt möchte ich ganz besonders meinen Eltern und meinem Mann danken. Ohne die wiederkehrenden und teils strengen Motivationen ihrerseits hätte ich dieses Projekt wahrscheinlich niemals fertig gestellt.