

## Zur Physik des Gerätetauchens

Urlaub am Meer. Endlich wieder eine Gelegenheit zum Tauchen! Unter der schimmernden Wasseroberfläche wird mich eine fremdartige Welt erwarten. Fremdartig vor allem dadurch, dass dort unten völlig andere Regeln vorherrschen als an Land: Für die Unterwasserlandschaften mit Sandflächen, felsigen Canyons und vielleicht Seegraswiesen lassen sich Äquivalente meist auch über Wasser finden. Aber viele Gesetze der Physik, die in luftiger Umgebung eine Hauptrolle spielen, werden im Wasser zur Nebensache, abgelöst durch andere Mechanismen, die im feuchten Medium plötzlich an Bedeutung gewinnen. Ein guter Grund also, sich die Physik unter Wasser und ihre Konsequenzen für mich und andere Lebensformen einmal genauer vor Augen zu führen.

Als ich mich in meinen Neoprenanzug zwänge (Halbtrocken und damit entsprechend eng anliegend) und anschließend Kilogramm über Kilogramm an Ausrüstung anlege, muss ich die Weisheit meiner Entscheidung zum Gerätetauchen kurzzeitig hinterfragen. Ich könnte ja auch einfach schnorcheln, das fordert deutlich weniger Aufwand. Und sehr viel weniger Ausrüstung. Aber sobald ich mich hinter meinen Begleitern (man sollte niemals alleine tauchen!) entlang der Felsen der Hausbucht ins Wasser bewege, merke ich, wie ich scheinbar immer leichter werde, bis ich schließlich mit aufgeblasener Tarierweste über dem Grund schwebe. Wasser hat eine höhere Dichte als die mich umgebende Luft und so tut mir das Archimedische Prinzip beim Tauchen einen großen Gefallen: Es besagt, dass in einem unter Einfluss der Schwerkraft befindlichen, flüssigen oder gasförmigen Medium auf einen Körper eine Kraft wirkt, die proportional zum Dichteunterschied zwischen Körper und verdrängtem Medium ist. Die höhere Dichte des Wassers gegenüber der Luft sorgt also dafür, dass ich mich im Wasser "leichter" fühle. Ganz einfach deshalb, weil der Erdanziehung nun ein größerer Auftrieb entgegenwirkt als an Land.

Das beigemischte Salz steigert die Dichte des Meerwassers gegenüber Süßwasser zusätzlich, sodass ich wegen meines stark auftreibend wirkenden, Luftbläschen enthaltenden Neoprenanzugs ohne meinen Bleigurt hilflos an der Oberfläche treiben würde, ohne die Hoffnung, jemals abzutauchen. Das ganze Gewicht, das an Land so störend ist, hat also eine essenzielle Bedeutung für das Gerätetauchen.

Das Archimedische Prinzip selbst kann man außerdem als die wohl wichtigste Grundlage des Gerätetauchens bezeichnen. Indem ich meine Tarierweste mit Luft aus meiner Tauchflasche fülle oder entleere, kann ich den mittleren Dichteunterschied gegenüber dem Meerwasser ändern. Bei wenig Luft sollte das mitgeführte Blei ausreichen, um mich in die Tiefe zu ziehen – das heißt, ich habe dann inklusive meiner Ausrüstung insgesamt mehr Masse als das Wasser, das ich verdränge. Bei viel Luft hingegen sollte ich bei korrekt gewählter Bleimenge auf analoge Weise auftreiben.

Auch viele Fische machen sich dieses Archimedische Prinzip zunutze; sie können ihre Schwimmblase, ein Organ mit einer Funktionsweise analog zur Tarierweste, je nach Bedarf durch einen Gasaustausch über vorbeiströmendes Blut füllen oder entleeren. Dadurch können sie sich stabil und energiesparend in der Wassersäule halten, ohne mit ihrem Flossenschlag einem Absinken entgegenwirken zu müssen.

Es erfordert etwas Übung, mit der Weste so geschickt zu tariieren, dass man ein Gleichgewicht findet. Hat man diese Erfahrung jedoch, so ermöglicht das Archimedische Prinzip unter Wasser eine vertikale Bewegung ohne eigenen Kraftaufwand. Ich muss also nur den horizontalen Anteil zu meiner Fortbewegung beisteuern. Hierzu dienen meine Taucherflossen. Sie vergrößern die Oberfläche meiner Füße wie die eines Froschs und wirken nach dem Rückstoßprinzip: Wenn ich mit den Flossen schlage, wird das Wasser hinter mir zurückgedrängt. Ganz nach dem dritten Newton'schen Axiom erfährt mein Körper eine Gegenkraft, die vom Betrag her der Kraft entspricht, die ich auf das Wasser ausübe, dieser von der Richtung her aber genau entgegengesetzt ist – ich werde nach vorne bewegt. Durch die große Oberfläche der Flossen kann ich mehr Wasser auf einmal verdrängen und erfahre damit auch einen größeren Rückstoß als es ohne Flossen der Fall wäre. Ohne sie könnte ich das Wasser auch nicht so gerichtet zurückdrängen: Ein Schlag mit meinen bloßen Füßen verursacht aufgrund der unvorteilhaften Form deutlich turbulenterer Wasserwirbel in verschiedene Richtungen; die resultierenden Kraftanteile sind daher diffus und ungerichtet. Auch ist die dem Wasser entgegengerichtete Querschnittsfläche meiner Füße im Verhältnis zu deren Gesamtoberfläche geringer ohne Flossen, der mechanische Widerstand in der Strömung folglich kleiner. Dadurch wiederum ist aber auch der Kraftübertrag bei gleich schnellem Beinschlag gegenüber der Verwendung von Flossen reduziert, ich würde also kaum vom Fleck kommen.

Die Fische um mich herum bewegen sich nach demselben Prinzip voran: Ihre kräftige Schwanzflosse funktioniert in den Grundzügen ganz analog zu meinen Taucherflossen, also nach dem Rückstoßprinzip. Aber sie sind unter Wasser viel schneller als ich; ich könnte mit den meisten Arten niemals mithalten. Warum? Physik und natürliche Selektion arbeiten zumeist Hand in Hand. Fische haben oft einen Körperbau, der sich für die Fortbewegung unter Wasser durch evolutive Mechanismen als die beste Form etabliert hat: Eine torpedoartige oder tropfenförmige Gestalt, die in der Viskosität (also inneren Reibung) des Wassers den geringsten Strömungswiderstand darstellt. Die Flüssigkeit kann fast ungehindert um den Fischkörper herumströmen, statt vor ihm "hergeschoben" zu werden, und ohne in Turbulenzen zu verfallen und ihn damit stark in seiner Fortbewegung zu bremsen. Die Effektivität dieser Form wird deutlich, wenn man die verschiedensten Meeresbewohner, z.B. schnell schwimmende Fische, Delfine, Pinguine usw., miteinander vergleicht: Sie alle haben unabhängig voneinander einen ähnlichen Körperbau entwickelt.



**Abbildung 1:** Thunfische wie der Gelbflossenthun *Thunnus albacares* weisen als schnell schwimmende Raubfische einen besonders stromlinienförmigen Körperbau auf.

Neuere Untersuchungen z.B. von Borazjani und Daghooghi (2013) implizieren außerdem, dass Fische mit ihren Flossen offenbar ähnliche Prinzipien wie bei Flugzeug- und Vogelflügeln nutzen: An der Vorderkante der Schwanzflosse kommt es bei bestimmten Schwimgeschwindigkeiten durch das unterschiedlich schnell vorbeiströmende Wasser zu einem Unterdruck, welcher so gerichtet ist, dass der Fisch einen Schub nach vorne erfährt.

Ich dagegen wurde nicht für das Wasser gemacht; die Vorfahren der Säugetiere haben das Meer schon vor Urzeiten verlassen und solche Anpassungen zugunsten des Lebens an Land längst hinter sich gelassen. Während einige Säugetiere das Meer durch neue Anpassungen zurückerobert haben, sind wir Menschen reine Landbewohner. Wir sind auch keine herausragend schnellen Tiere und durch die verhältnismäßig geringe Viskosität der Luft spielt der Luftwiderstand für uns mit unseren vergleichsweise geringen Geschwindigkeiten nur eine untergeordnete evolutive Rolle. Deshalb ist mein Körper nicht stromlinienförmig (schon gar nicht für die Körperhaltung, die ich unter Wasser annehmen muss) und ich müsste mehr Kraft aufwenden als ein gleich schwerer Fisch, um die gleiche Geschwindigkeit zu erreichen.

Langsam verlasse ich das Flachwasser und tauche in größere Tiefen hinab. Je höher die Wassersäule über mir wird, desto mehr Farben verschwinden aus meiner Umgebung: Zuerst verblasst das Rot, dann Orange und schließlich die ersten Gelbtöne. Weil rote Farbtöne als erstes vom Wasser “verschluckt” werden, finden sie sich so selten auf Tauchausrüstungen. Das in größere Tiefen leuchtende Gelbgrün ist dagegen beliebt, weil sich Taucher darin auch auf große Entfernung noch erkennen können – die Lichtabsorption wirkt schließlich nicht nur vertikal, sondern auch horizontal.



**Abbildung 2:** Schon in wenigen Metern Tiefe ist rotes Licht durch die Filterwirkung des Wassers fast verschwunden, es herrschen Blau-, Grün- und Gelbtöne vor. Die eigentlich rote Koralle unten rechts im Bild wirkt nur noch schmutzig braun. Foto: Mark Wunsch/Greencoast Media, aus Hempel und Bischof (2017), S. 149.

Würde ich noch tiefer hinabtauchen, würden auch das Grün und zuletzt Blau aus meiner Umwelt verschwinden. Die Welt in der Tiefe ist schwarz. Doch was genau passiert nun mit dem Licht, wenn es durch das Wasser dringt? Licht ist elektromagnetische Strahlung und kann, wie es formal aus den Maxwell-Gleichungen folgt, durch verschiedene Mechanismen abgeschwächt werden: Bereits an der Oberfläche wird ein Teil des Sonnenlichtes durch die Spiegelwirkung des Wassers reflektiert und dringt gar nicht erst ein. Die Stärke der Reflexion bzw. in quantitativer Form der Betrag des Reflexionskoeffizienten von Wasser hängt unter anderem vom Einfallswinkel ab und ist für senkrechten Einfall am geringsten. Allein durch den Effekt der Reflexion wird die Intensität des Lichtes beim Übergang von Luft in Wasser also abhängig vom Winkel des Auftreffens bereits abgeschwächt.

Sind Schwebstoffe oder andere Verunreinigungen im Wasser enthalten, so kommt es zur Lichtstreuung auch an anderen Teilchen als Wassermolekülen. Für Störkörper, die klein gegenüber der Lichtwellenlänge sind (z.B. kleine Moleküle), ist die Streuwirkung intensiver für kurzwelliges, also blaues Licht, als für längerwelliges rotes Licht. Dies ist die sogenannte Rayleigh-Streuung, welche auch für die blaue Färbung des Himmels verantwortlich ist, weil durch sie nur die blauen Anteile des Lichtes von allen Seiten zu kommen scheinen. Hinzu kommen die nahezu wellenlängenunabhängigen Mechanismen der Mie'schen Streuung an Objekten ungefähr in der Größenordnung der Wellenlänge sowie der Streuung an größeren Objekten wie etwa aufgewirbelten, feinen Sandpartikeln. In der Folge kann das Licht in solche verunreinigten Medien weniger tief eindringen als in reines Wasser.

Für die weitere Betrachtung muss der Brechungsindex von Wasser eingeführt werden. Man kann ihn als komplexe Größe auffassen: Der Realteil gibt das Brechungsvermögen wider und ist damit der klassische Brechungsindex. Da er für Wasser größer ist als für Luft, erfolgt beim Eindringen des Lichtes eine Brechung zum Lot, der Senkrechten zur Oberfläche, hin. Der Grund dafür ist, dass sich das Licht im Medium mit einer gegenüber dem Vakuum verringerten Geschwindigkeit ausbreitet. Sie ergibt sich aus dem Quotienten der Vakuumlichtgeschwindigkeit mit dem Realteil des Brechungsindex. Trifft Licht also von der Luft auf Wasser, so wird es dem größeren Brechungsindex gemäß verlangsamt.

Menschliche Augen sind an den Brechungsindex der Luft angepasst und so sehe ich beim Tauchen nur scharf, solange meine Tauchmaske eine Luftschicht vor meinen Augen hält. Nehme ich die Maske ab, liegen sie auf einmal an einer Grenzschicht zum Wasser. Durch den erhöhten Brechungsindex wird das Licht beim Übergang in meine Augen nun anders gebrochen. Der Betrag des Brechungswinkels nähert sich an einer Grenzschicht zu Wasser statt Luft dem des Einfallswinkels des Lichtstrahls (d.h. der Strahl wird nun schwächer gebrochen). An der Luft ist der Brechungswinkel viel kleiner. In der Folge bin ich unter Wasser extrem weitsichtig, weil mein Augapfel für die neuen Brechungsverhältnisse zu lang ist; der Brennpunkt verschiebt sich nach vorne. Im Umkehrschluss sind Meeresbewohner wie Seehunde und Wale, die unter Wasser scharf sehen können, an der Luft kurzsichtig.

Aber selbst mit Tauchmaske muss ich mir der brechenden Wirkung des Wassers bewusst sein. Das Verhältnis der Brechungsindizes am Übergang vom Wasser ( $n_1 \approx 1.33$ ) zur Tauchmaske (Luft:  $n_2 \approx 1.00$ ) ist ungefähr 4:3 und damit lässt sich über das Snellius'sche Brechungsgesetz herleiten, dass unter Wasser alles etwa ein Drittel größer und somit näher erscheint als über Wasser. Durch die Brechung an der Grenzschicht Wasser–Luft vergrößert sich nämlich der Winkel eines Lichtstrahls gegenüber dem Lot, was wiederum beim Einfall ins Auge als größerer Öffnungswinkel wahrgenommen wird. Ein größerer Öffnungswinkel aber entspricht einem näher gelegenen oder größeren Objekt.

Der Imaginärteil des komplexen Brechungsindex ist ein Maß für die Abschwächung des Lichts durch Absorption an Wassermolekülen. Er liegt nahe bei Null, weshalb reines Wasser weitreichend transparent wirkt. Erst bei Schichten von mehreren Metern Dicke wird die absorbierende Wirkung für das menschliche Auge erkennbar. Die verschieden starke Absorption der unterschiedlichen Wellenlängen des Lichtes ist der Dispersion des Imaginärteils geschuldet: Er nimmt im sichtbaren Bereich vom langwelligen Rot bis zum kürzerwelligen Blau ab. Erst ganz am kurzwelligen, violetten Ende des sichtbaren Spektrums wird sein Betrag wieder etwas größer und nimmt auch im Ultravioletten weiterhin zu, sodass UV-Strahlung wieder stärker als blaues Licht absorbiert wird. Im Falle des Wassers erfolgt die Abschwächung des Lichtes bei der Absorption primär durch eine Umwandlung in thermische Energie, also Wärme. Daher kann Sonnenlicht Wasser erwärmen.

Die langwelligen Funksignale technischer Geräte – elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen weit größer als beim sichtbaren oder auch infraroten Licht – erfahren eine so starke Abschwächung, dass sie kaum ins Wasser eindringen können. Die technische Kommunikation unter Wasser ist daher eine besondere Herausforderung. Wissenschaftliche Instrumente für die Meeresforschung, wie z.B. die sogenannten Floats, müssen zum Versenden ihrer Messdaten regelmäßig an die Oberfläche aufsteigen. Umgekehrt können Satelliten mit ihren Messgeräten je nach untersuchter Wellenlänge nur Oberflächenwasser erfassen. Die Welt der Tiefe bleibt ihrem elektronischen Blick verborgen. Dieses Phänomen ist sicher einer der Gründe, warum wir die Oberfläche des Mondes besser kennen als die Meeresböden unseres eigenen Planeten.



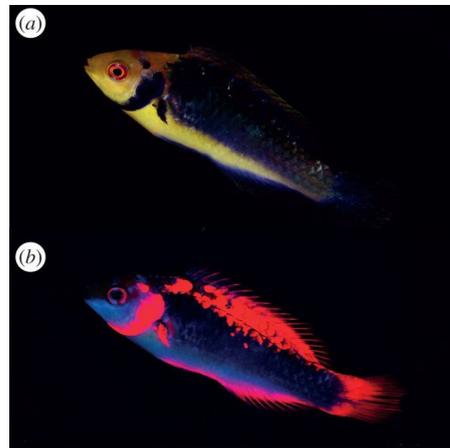
**Abbildung 3:** Von Johnsen (2005) untersuchte Tiefseebewohner. Auffällig ist die rote Färbung vieler Exemplare, die unter Biolumineszenz als Tarnung fungiert.

Die Absorption rotes Lichts muss man sich vor Augen führen, wenn man Tiere betrachtet, die außerhalb der obersten Wasserzone leben. Obwohl schon ab Tiefen von gut fünf Metern kein Rot mehr im Umgebungslicht vorhanden ist, stößt man bei vielen dauerhaft tiefer lebenden Arten auf rote Körper. Besonders ausgeprägt ist das Phänomen in der Dämmerlichtzone (auch Mesopelagial), die in ca. 200-1000 m Tiefe liegt, so etwa bei vielen Krebstieren, aber auch dem Vampirtintenfisch *Vampyroteutis infernalis*. Im Schwarz-Weiß dieser lichtarmen Zone ist das an der Oberfläche so grell

wirkende Rot nämlich dank der Filterwirkung des Wassers eine perfekte Tarnung: Die meisten Bewohner der Dämmerlichtzone und eigentlichen Tiefsee haben im Laufe der Evolution die Fähigkeit verloren, rotes Licht wahrzunehmen, da es in ihrem Lebensraum keine Rolle spielt. Wichtiger als das kaum noch vorhandene Sonnenlicht ist hier die sogenannte Biolumineszenz, ein durch Bakterien chemisch erzeugtes Licht. Mehr als vier Fünftel aller Tiefseebewohner sind laut Douglas et al. (1998) durch das Zusammenspiel mit diesen Bakterien zum Selbstleuchten befähigt. Aber auch die Biolumineszenz spielt sich primär im kurzwelligen, blauen Bereich des sichtbaren Lichts ab. Ein roter Körper ist also vollkommen ausreichend, um einem rotblinden Beutegreifer im Licht seiner biolumineszenten "Taschenlampe" verborgen zu bleiben, da das schmale für ihn sichtbare, blaugrüne Spektrum möglichst effektiv absorbiert statt reflektiert wird. Die Beute erscheint ihm also genauso dunkel wie das sie umgebende Wasser.

Diese Farbseeschwäche anderer Tiere wiederum machen sich einige Arten der Barten-Drachenfische (Familie Stomiidae) zunutze: Als Ausnahme von der obigen Regel sind sie sehr wohl in der Lage rotes Licht wahrzunehmen. Da dieses, wie zuvor erwähnt, nicht in ihren Lebensraum in der Dämmerlichtzone vordringt, erzeugen sie es mithilfe biolumineszenter Bakterien selbst und können so ihre rotblinde Beute beleuchten, ohne dass diese etwas von der herannahenden Gefahr bemerkt.

Friedlichere Absichten hat zum Beispiel der Rotaugen-Lippfisch (*Cirrhilabrus solorensis*), welcher in Tiefen zwischen 10 und 65 m lebt und gerade im dortigen, blauen Restlicht eine kräftig rote Färbung aufweist. Dies scheint paradox, wenn man bedenkt, dass Farben zumeist dadurch zustandekommen, dass ein Objekt bestimmte Teile des vorhandenen Lichtspektrums weitgehend absorbiert und andere Teile mehr oder weniger vollständig reflektiert. Das Objekt erscheint dem Betrachter dann in der Farbe, die sich aus dem reflektierten Lichtanteil ergibt. Einfach formuliert: Eine rote Fischschuppe erscheint uns rot, weil sie nur die roten Anteile aus dem auf sie einfallenden Licht reflektiert und den Rest des sichtbaren Spektrums absorbiert. Wenn aber, wie eben in größeren Meerestiefen, gar kein Rot mehr im einfallenden Licht vorhanden ist, das reflektiert werden könnte, so



**Abbildung 4:** Männchen des Rotaugen-Lippfischs *Cirrhilabrus solorensis* unter weißem (a) und monochromatischem (einfarbigem), blauem Licht (b). Unter letzterem Licht, wie es durch die Filterwirkung des Wassers auch in größeren Meerestiefen vorkommt, weist der Fisch eine fluoreszente, rote Färbung auf. Abb. zugeschnitten aus Gerlach et al. (2014).

wirkt die Schuppe plötzlich farblos; dunkelgrau bis schwarz – je nachdem, wie perfekt die anderen Farbanteile tatsächlich absorbiert werden. Demnach wären rot leuchtende Körper zehn oder mehr Meter unter dem Meeresspiegel gar nicht mehr möglich, es sei denn, es gibt eine andere, näher gelegene Weißlichtquelle wie etwa eine Taschenlampe. Das Rot des Lippfischs muss also auf eine andere Weise zustandekommen: Er bedient sich des Phänomens der Fluoreszenz. In den Atomen eines fluoreszenten Farbstoffs kommt es durch den Einfall einer bestimmten Wellenlänge zur Anregung eines Hüllenelektrons in einen höheren Energiezustand, dessen Niveau nur durch die exakte Energiemenge dieser einen Wellenlänge erreicht werden kann. Dieser angeregte Zustand hat eine begrenzte Lebensdauer, ist also instabil, und so fällt das Elektron schließlich zurück auf ein niedrigeres Energieniveau. Dabei wird erneut Energie frei, die in Form eines Lichtquants mit der zu dieser Energie gehörigen Wellenlänge emittiert wird. Oft erfolgt das Zurückfallen ins ursprüngliche Niveau nicht in einem, sondern in mehreren Schritten. Die durch das einfallende Licht zugeführte Energie wird also nicht auf einmal, sondern über ein Lichtquant pro Schritt emittiert. Dadurch sind diese Lichtquanten weniger energiereich als das ursprünglich aufgenommene Quant und sind daher längerwellig. Dank diesem Phänomen kann der Rotaugen-Lippfisch das kurzwellige blaue Licht, das auch in größeren Tiefen noch auf seinen Körper fällt, in rotes Licht “umwandeln”. Gerlach et al. (2014) haben herausgefunden, dass die Art wie die Drachenfische ihre eigene Körperfarbe sehr wohl wahrnehmen kann. Eine originelle Strategie also, um Weibchen zu beeindrucken.

Die Absorption des Lichtes ist nicht der einzige Hinweis auf die zunehmende Wassertiefe. Immer wieder muss ich einen Druckausgleich durchführen, denn mit der anwachsenden Wassersäule steigt der Druck, den diese auf die Luft in meinem Körper ausübt. An der Wasseroberfläche liegt durch die viele Kilometer hohe Luftsäule ein Druck von ca. einem Bar vor. Da das Wasser, wie bereits weiter oben erwähnt, deutlich dichter ist, übt es trotz geringerer Molmasse schnell einen größeren Druck aus: eine Menge von einem Mol an Luftmolekülen (ein Gemisch verschiedener Gase) ist schwerer als ein Mol Wassermoleküle, aber wegen der größeren Dichte des Wassers liegen z.B. in einem Kubikmeter Wasser bereits sehr viel mehr Moleküle vor als in einem Kubikmeter Luft. Als Faustregel kann man mit einem Druckanstieg von gut einem Bar, also einer ganzen Atmosphäre, pro zehn Meter Wassertiefe rechnen.

Flüssigkeiten selbst sind weitgehend inkompressibel, und so wird der hohe Druck nur überall dort deutlich, wo unter Wasser Gase – sehr wohl kompressibel – vorliegen. In meinen Ohren zum Beispiel. Das Trommelfell verhindert dort ein Entweichen der Luft aus dem Innenohr, gleichzeitig wird diese aber durch den steigenden Umgebungsdruck immer weiter komprimiert. Ohne den Druckausgleich, über den ich dem sinkenden Volumen der Luft durch Zuführen weiterer Luft entgegen wirke,

würden mir womöglich die Trommelfelle reißen, unter dem hohen Druck des Wassers nach innen gedehnt.

Wenn ich den Atem anhielte, wie es beim gerätafreien Apnoetauchen der Fall ist, würde meine Lunge das gleiche Schicksal erleiden und immer weiter zusammengepresst werden. Rekordtiefen von bis zu 122 Metern (aktueller Weltrekord von William Trubridge, s. Tegtmeier (2016)) konnten Apnoetaucher nur dank des stabilen Baus der menschlichen Lunge, eines überdurchschnittlich großen Lungenvolumens und komplizierter biologischer Prozesse, die eine dauerhafte Schädigung der Lunge scheinbar verhindern oder zumindest abschwächen, überleben.

Beim Gerätetauchen habe ich dieses Problem nicht. Die Luft aus der Flasche – in der sie zu Beginn des Tauchgangs auf einen Druck von 200 bar gedrängt war – dehnt sich im Atemregler nur soweit aus, wie es der Umgebungsdruck zulässt. Dies wird (meist nach einer Zwischenstufe mit mittlerem Druck) durch Membranen erreicht, durch die die Luft den Umgebungsdruck “spürt”, also auf ähnliche Weise wie über das Trommelfell in meinem Ohr. Deshalb verbrauche ich in großer Tiefe allerdings auch viel mehr Luft als nahe der Oberfläche: Ähnlich zum Druckausgleich im Ohr muss ich hier unten eine größere Menge an Luft einatmen, um meine Lunge noch komplett zu füllen. Denn da die Luft komprimiert ist, enthält ein Liter davon hier unten mehr Moleküle als oben.

Aus dieser Feststellung drängt sich die Überlegung auf, ob man nicht dank der größeren Sauerstoffmenge pro Atemzug weniger oft einatmen müsse. Allerdings ist das Hämoglobin in unserem Blut, welches für unsere Sauerstoffaufnahme verantwortlich ist, schon unter Oberflächenbedingungen zu fast 100 % mit Sauerstoff gesättigt; eine größere Menge dieses Gases kann die Sättigung also nicht mehr nennenswert steigern. Außerdem wird der Atemreflex nicht über die Sauerstoffnot gesteuert, sondern über das Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), das sich als Endprodukt unserer Atmung im Körper ansammelt. Immer, wenn eine kritische Schwelle an Kohlenstoffdioxid in der Lunge überschritten wird, wird bei uns der Reflex zum Atmen aktiviert. Die  $\text{CO}_2$ -Produktion wiederum hängt aber nicht direkt von der Tiefe ab, sondern von unserem Energieverbrauch: Je mehr wir uns bewegen, desto mehr Luft müssen wir atmen, damit unser Körper mithilfe des Sauerstoffs ausreichend Energie für die Bewegung gewinnen kann. In der Folge entsteht auch eine größere Menge des Endprodukts  $\text{CO}_2$ , welches eben den verstärkten Atemreflex antreibt. Also können wir unter Wasser nur Luft sparen, wenn wir uns möglichst wenig fortbewegen. Die Sauerstoffmenge hat keinen direkten Einfluss.

Die Notwendigkeit des Atmens von auf den Umgebungsdruck komprimierter Luft liegt vielmehr darin, dass ich ebendiesen Umgebungsdruck dann nicht mehr auf meinem Brustkorb spüre: Es liegt ja keine Druckdifferenz zwischen meiner Lunge und der Außenwelt vor. Ohne das clevere Konzept meines Atemreglers und der Pressluft würde ich beim Tieftauchen also ersticken, weil der Druck der Wassermassen ab einer gewissen Tiefe stärker als meine Brustmuskulatur wäre.

Aufgrund dieser vielseitigen Problematik weisen die meisten Meeresbewohner keine gasgefüllten Kammern in ihren Körpern auf. Die Schwimmblase der Fische stellt eine Ausnahme dar, da der Luftdruck in ihrem Inneren ja innerhalb eines gewissen Rahmens angepasst werden kann.

An dieser Stelle sei auch der Pottwal erwähnt, der als Luftatmer in der Tiefsee – bis in über zwei Kilometern Tiefe – jagt und dessen Lunge entsprechend großen Drücken ausgesetzt wäre. Daher tauchen die Tiere mit komplett entleerter Lunge ab; der benötigte Sauerstoff ist stattdessen in Blut und Gewebe gespeichert.

Trotz der oben genannten Gefahren ist die Kompressibilität der Luft aber zugleich ein Segen für das Gerätetauchen. Betrachtet man ein ideales Gas, so gilt nach dem Boyle-Mariott'schen Gesetz, dass das Produkt aus Druck und Volumen bei unveränderter Temperatur und Stoffmenge immer konstant bleibt. Ein ideales Gas ist ein theoretisches Konstrukt, in dem die Gasteilchen durch Massepunkte angenähert werden, welche bis auf elastische Stöße nicht miteinander wechselwirken und deren mittlere Abstände sehr viel größer sind als ihre (unendlich kleinen) Durchmesser. Dies ist vor allem für wenig dichte Gase bei hohen Temperaturen und niedrigen Drücken erfüllt; für eine Abschätzung kann aber auch die Umgebungsluft näherungsweise als ideales Gas betrachtet werden. Damit kann für die ebenfalls vereinfachende Annahme einer konstant bleibenden Temperatur eine Abschätzung der beim Tauchen mitgeführten Atemluft erfolgen: Fülle ich Umgebungsluft in eine Tauchflasche mit einem Volumen von 10l und komprimiere sie dabei auf einen Druck von 200 bar, so kann ich in der Flasche eine Luftmenge mitführen, die einem Volumen von gut 200 mal 10l, also 2000l der unter einem Bar Druck befindlichen Umgebungsluft entspricht. Nur dadurch sind längere Tauchgänge auch in größere Tiefen möglich.

Ein Blick auf meinen Tauchcomputer verrät mir, dass ich die Nullzeit überschritten habe. Auch mein Luftvorrat steht auf Halbzeit. Ich sollte mich mit meinen Begleitern auf den Rückweg machen. Die Nullzeit entspricht der Zeit, die man in einer bestimmten Tiefe verbringen kann, ohne beim Auftauchen sogenannte Dekompressionsstops (kurz Dekostop) einlegen zu müssen. Diese haben einen medizinischen Hintergrund und dürfen keinesfalls vernachlässigt werden: Wie aus dem Gesetz von Henry bekannt, steigt die Löslichkeit von Gasen mit zunehmendem Umgebungsdruck. In großen Wassertiefen kann mein Blut daher z.B. viel mehr gelösten Stickstoff aufnehmen als in geringeren Tiefen mit niedrigeren Drücken. Als besonders leicht löslicher Hauptbestandteil der Luft ist der Stickstoff gleichzeitig das wichtigste Gas für die medizinische Betrachtung. Da ich beim Gerätetauchen immer neue Luft einatmen kann, wird auch immer wieder Stickstoff nachgeführt, der sich nach und nach in meinem Blut anreichern kann. Das Risiko der Taucherkrankheit (s.u.) ist deshalb beim Gerätetauchen viel größer als beim Apnoetauchen, wo

von Anfang an nur eine begrenzte Menge an Gasen vorliegt, die sich anreichern könnten. Mit zunehmendem Druck, der auf meiner Atemluft lastet, steigen auch die Partialdrücke der einzelnen in ihr enthaltenen Gase. Der Partialdruck eines Gases berechnet sich nach Dalton aus der prozentualen Volumenzusammensetzung des Gasgemischs, für Stickstoff etwa entspricht er bei normaler Atemluft ca. 78 % des Gesamtdrucks. Erinnern wir uns nun erneut an das Gesetz von Boyle und Mariotte, so wird klar, dass ein steigender Partialdruck eines Gases einer zunehmenden Stoffmenge des Gases pro Volumeneinheit entspricht, das heißt: Je größer die Tiefe, desto schneller kann sich aufgrund der besseren Löslichkeit und der pro Atemzug größeren aufgenommenen Stoffmenge an Luft eine kritische Menge Stickstoff im Blut anreichern. Mit steigender Tiefe sinkt also die Nullzeit.

Würde ich meinen Tauchcomputer ignorieren und schnell aufsteigen, so würden in meinem Blut gelöste Gase mit dem sinkenden Umgebungsdruck ausperlen, da ihre Löslichkeit schneller wieder abnimmt als mein Körper sie durch einfaches Atmen abführen könnte. In der Folge würden sich Gasblasen bilden, die Durchblutungsstörungen und damit Gewebeschädigungen und Wahrnehmungsstörungen mit sich bringen könnten. Diese sogenannte Taucherkrankheit kann bis zum Tod führen und ist eines der größten Risiken beim Sporttauchen. Nichts also, das man sich wünschen würde. Selbst ohne ein Überschreiten der Nullzeit sollte daher nur um maximal zehn, besser sogar unter sieben Meter pro Minute aufgetaucht werden. Dies und die Dekostops, bei denen mehrere Minuten auf einem konstanten Tiefenniveau verharret wird, stellen ein kontinuierliches Ausperlen des gelösten Stickstoffs ohne die gefährliche Bläschenbildung weitgehend sicher.

Für besonders tiefe Tauchgänge ist nicht nur die Anreicherung von Stickstoff im Blut ein Risiko: Die hohen Partialdrücke der einzelnen Gase in der Atemluft haben in solchen Tiefen zur Folge, dass Sauerstoff und besonders Stickstoff in ausreichend großen Stoffmengen aufgenommen werden, um eine toxische Wirkung zu entfalten. So ist an der Wasseroberfläche das Atmen reinen Sauerstoffs riskant, weil dieser in zu großer Menge Nervensystem und Lunge angreifen kann. Bei sehr großen Tauchtiefen ab etwa siebzig Metern wird diese kritische Menge durch die starke Kompression unter Umständen bereits beim Atmen der normalen Atemluft mit ca. 21 % Sauerstoffanteil erreicht. Kritischer ist es für den Stickstoff, der neben der erst durch zunehmende Tiefen erreichten Blutlöslichkeit grundsätzlich auch eine gute Lipidlöslichkeit hat und auf diese Weise in zu großer Menge – ab für Hobbytaucher durchaus erreichbaren dreißig bis vierzig Metern unter Wasser – das Zentralnervensystem (ZNS) stört. Die stickstoffbedingte Euphorie, in der sich diese Störung des ZNS äußert, ist gemeinhin als “Tiefenrausch” bekannt und macht betroffene Personen unzurechnungsfähig in einer Umgebung, die sich ihnen nur durch technische Hilfe und angemessene Vorsicht erschließt – eine prekäre Situation. Als Gerätetaucher reicht es also nicht, allein die Zusammensetzung der Luft zu betrachten. Auch die Änderung der Partialdrücke mit der Tauchtiefe muss

berücksichtigt werden und setzt der Verwendung normaler Atemluft klare Grenzen in vertikaler Richtung.

Beim ersten Dekostop lasse ich meinen Blick über den weiten Sandgrund schweifen, über dem ich schwebe. An Land bin ich an die Oberfläche des Bodens gebunden; meine Welt ist im Hinblick auf meine Fortbewegung weitgehend zweidimensional. Hier, beim Tauchen, kann ich dagegen im dreidimensionalen Raum manövrieren. Für die Bewohner des Freiwassers hat das eine essenzielle Bedeutung. Mehr Freiheiten bedeuten nämlich zugleich auch mehr Richtungen, aus denen der Feind kommen kann. Besondere Sinne sind wichtig, um in dieser Welt zu überleben: Man kann sich an einen Fisch nicht anschleichen. Grund dafür ist sein Seitenlinienorgan, das Druckunterschiede im Wasser registrieren kann – und zwar sehr viel sensibler, als es unsere Haut vermag. Jedes Lebewesen, das sich im Wasser bewegt, verursacht aber eine Druck- oder auch Kompressionswelle und feine Strömungen, die seinem Strömungswiderstand geschuldet sind (an dieser Stelle wird also deutlich, dass Wasser in der Tat nur *näherungsweise* inkompressibel ist). So kann der Fisch sich nähernde Feinde von allen Seiten wahrnehmen. Außerdem dient das Seitenlinienorgan Schwarmfischen als Hilfe zur Koordination des Schwarms, da sich jeder Fisch an der Bewegung seiner Nachbarn orientieren kann.

In der Ferne rattert eine Schiffsschraube. Unmöglich, die Richtung ausfindig zu machen, aus der sie kommt. Für mich ist das keine neue Erfahrung, denn ich bin einseitig schwerhörig und kann Geräusche grundsätzlich kaum orten. Aber in diesem Fall geht es meinen Begleitern wie mir. Im Meerwasser beträgt die Geschwindigkeit des Schalls – eine longitudinale Druckwelle, das heißt die Wassermoleküle werden parallel zur Ausbreitungsrichtung des Schalls ausgelenkt – mehr als das Vierfache gegenüber der Luft. Unser dreidimensionales Hören basiert aber auf dem Konzept, dass unsere Ohren aufgrund ihrer nicht deckungsgleichen Positionen eine einfallende Schallwelle nicht gleichzeitig registrieren. Die Geräuschquelle wird sich dann näher an dem Ohr befinden, das sie zuerst wahrnimmt. Ihre genaue Lage folgt für unser Gehirn aus dem Betrag des Zeitversatzes zwischen beiden Ohren und leichten Unterschieden im Schalldruck. Der wahrgenommene Schalldruck variiert nämlich je nachdem, in welchem Winkel das Ohr zur Geräuschquelle gerichtet ist und gibt deshalb Auskunft über die Richtung. Man kann sich das vereinfachend wie zwei Wellen vorstellen, von denen eine direkt und eine schräg auf ein Schleusentor einfällt. Die Kraft, die es aufdrücken könnte, wird nach unserer Alltagserfahrung im ersten Fall größer sein als im zweiten. Als Druckwelle hat der Schall eine ähnliche Wirkung auf unser Trommelfell. Nun ist aber unter Wasser bereits der Zeitunterschied zwischen beiden Ohren wegen der erhöhten Schallgeschwindigkeit so gering, dass wir ihn nicht mehr wahrnehmen können. Und so muss man nicht schwerhörig sein, um unter Wasser Schwierigkeiten bei der Ortung von Geräuschen zu haben.

Gleichzeitig kann sich Schall hier unten viel weiter ausbreiten als in der Luft, ehe er sich verliert. Gerade niedrige Frequenzen, die eine besonders geringe Abschwächung erfahren, können ganze Ozeane durchqueren. Ein Rückblick auf die Signale elektromagnetischer Wellen, die im Wasser sehr stark abgeschwächt werden, macht deutlich, warum im Meer stattdessen eine akustische Kartierung der Umgebung etwa durch Echolot für uns Menschen das Mittel der Wahl ist. Wale nutzen die gute Schallausbreitung, um selbst in hunderten Kilometern Entfernung Kontakt zu Artgenossen zu halten. Die Lärmverschmutzung der Meere durch Schiffsschrauben und andere anthropogene Geräuschquellen erschwert ihnen dies jedoch leider in zunehmendem Maße.

Ich steige weiter auf. Beim zweiten und letzten Dekostop – eine standardmäßig in drei Metern Wassertiefe eingehaltene, fünfminütige Pause – merke ich, dass mir langsam etwas kalt wird. Mein Halbtrockenanzug funktioniert nach einem im Grundsatz simplen Prinzip: Beim ersten Eintauchen laufen die Zwischenräume im Neopren, das meinen Körper wie eine dicke, zweite Haut umhüllt, voll Wasser. Sobald das geschehen ist, erfolgt dank der Neoprenwände und darin eingeschlossener Luftbläschen allerdings nur noch ein geringer Austausch mit dem Wasser der Umgebung. So kann die Wasserschicht im Anzug durch meine Körperwärme erhitzt werden und zusammen mit der Neopren-Luft-Schicht als einigermaßen gut isolierender “Mantel” wirken.

Da Wasser jedoch ein besserer Wärmeleiter ist als Luft, geht trotz dieser Vorkehrung immer wieder Wärme an die Umgebung verloren und ich kühle selbst mit Anzug schneller aus als an Land. In der Tat ist Luft ein verhältnismäßig so guter Wärmeisolator, dass neben der Wärmeleitung, die durch Stöße unserer Moleküle mit Teilchen der Umgebung und damit durch den Austausch kinetischer Energie auf mikroskopischer Ebene stattfindet, auch die sogenannte Wärmestrahlung eine Rolle spielt. Diese beschreibt das Abstrahlen von Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung, deren Wellenlänge von der Temperatur des strahlenden Körpers abhängt und für homoiotherme (gleichwarme) Tiere wie uns Menschen im Infraroten liegt. Im Gegensatz zur Wärmeleitung ist die Wärmestrahlung also unabhängig vom umgebenden Medium und kann daher selbst im Vakuum stattfinden. Ihr konstanter Beitrag gewinnt daher in dünnen Medien, wo nur wenig Energieaustausch durch Stöße möglich ist, an Bedeutung. Im Wasser dagegen ist der zusätzliche Verlust durch die Wärmeleitung so groß, dass schon kleinere Temperaturunterschiede zwischen meinem Körper und der Umgebung das Auskühlen merklich beschleunigen. Für kältere Umgebungen muss man sich als Taucher deshalb mit zusätzlichen Mitteln vorm Auskühlen schützen. Eine Eisweste zum Beispiel liefert eine zusätzliche Schicht für den Halbtrockenanzug und verstärkt so die isolierende Wirkung.

Im Verhältnis z.B. zu vielen Metallen kann man das Wasser jedoch noch immer als eher schlechten Wärmeleiter beschreiben. Außerdem ist das Neopren selbst

ein noch deutlich schlechterer Wärmeleiter, weshalb auch die Wasserschicht im Halbtrockenanzug überhaupt als Isolierung fungieren kann.

Ein dritter Prozess des Wärmetransports, die Konvektion, wird durch den Tauchanzug weitgehend unterbunden. Die Konvektion ist ein mechanischer Vorgang: Erhitzt man einen Teil eines Gases oder einer Flüssigkeit, so ändert sich seine Dichte gegenüber dem nicht erwärmten Teil; sie nimmt im Allgemeinen ab. Befinden wir uns nicht gerade um den Punkt der Dichteanomalie des Wassers, das bei ca. vier Grad Celsius seine höchste Dichte erreicht, so gilt dies auch für Meere und Seen. Durch die geringere Dichte gegenüber der Umgebung erfahren die erwärmten Anteile den schon behandelten Auftrieb und steigen auf. Gibt es weiter oben eine verhältnismäßig kühle Grenzfläche, so kann der Prozess durch Abkühlen, die daraus folgende Dichtezunahme und damit durch ein Absinken auch in der Umkehr stattfinden – es kommt zu regelrechten Zirkulationen. Da ich aber einen Neoprenanzug trage, wird das erwärmte Wasser trotzdem an meinem Körper gehalten und kann zum Glück nicht über Konvektion regelmäßig durch kühleres Wasser ersetzt werden. Wegen der Langsamkeit des Prozesses müsste ich mich ohnehin möglichst still im Wasser halten, um Konvektion an meinem Körper zu erleben. Damit ist die Wärmeleitung (Konduktion) für mich als Taucher das weitaus wichtigere Phänomen. Im Meer kann aber auch die Konvektion von Bedeutung sein, so werden etwa einige Wasser umwälzende Meeresströmungen unter anderem von ihr getrieben, insbesondere in den Polregionen.

Die Funktionsweise des Halbtrockenanzugs ist zuletzt auch deshalb möglich, weil Wasser sehr gut Wärme speichern kann. Dies äußert sich in seiner hohen Wärmekapazität, d.h. in der benötigten Energie, um ein Gramm Wasser um ein Grad Celsius (bzw. Kelvin) zu erhitzen. Entsprechend viel Energie steckt in dem Wasser, das durch meine Körperwärme aufgeheizt wurde. Bis es wieder merklich abgekühlt ist, muss es also viel Energie an die Umgebung abgeben – wegen der mäßigen Wärmeleitfähigkeiten ein langsamer Prozess.

Die hohe Wärmekapazität des Wassers ist auch von großer Bedeutung für unser Leben in Europa. Jedes Jahr bringt der Golfstrom gigantische Wassermassen aus dem tropischen Golf von Mexiko in europäische Gewässer. Mit dem warmen Wasser gelangen folglich große Mengen an Energie zu uns, die als Wärme an die Umgebung abgegeben werden. Hinzu kommt, dass sich das Meer wegen seiner mäßigen Wärmeleitfähigkeit und großen Wärmekapazität selbst ohne den Golfstrom im Sommer nur langsam aufwärmen und im Winter nur langsam abkühlen würde. Das Festland alleine reagiert dagegen deutlich schneller auf jahreszeitliche Temperaturänderungen. Die häufige Westwindlage Europas treibt jedoch feuchte, moderat temperierte Luft von Atlantik und Nordsee bis weit ins Festland hinein. Als natürliche Klimaanlage wirkt das Meer mit seiner verzögerten Reaktion al-

so den Extremen der europäischen Jahreszeiten entgegen und beschert uns ein feuchteres Klima, mildere Winter und kühlere Sommer als es z.B. in Kanada auf gleichen Breitengraden der Fall ist: Wir haben unsere vergleichsweise angenehmen Lebensbedingungen zu großen Teilen dem ozeanischen Klima und dem Golfstrom zu verdanken.

Mit diesem Gedanken wird es Zeit, sich von der Welt im Meer zu verabschieden. Der Dekostop ist beendet, und wenige Minuten später durchstößt mein Kopf die Wasseroberfläche. Mit aufgeblasener Tarierweste geht es bequem zurück zum Ufer, wo mich mein eigentlicher Lebensraum schnell wieder einholt: Mit jedem Zentimeter, den ich mich aus dem Wasser kämpfe, werde ich mir des Gewichts meiner Ausrüstung wieder bewusster. Es sind alle Farben in meine Welt zurückgekehrt und ich nehme die langsam beschlagende Tauchmaske ab – an Land kommen meine Augen schließlich wunderbar ohne sie aus.

Es war ein schöner Tauchgang, in dem mir aber auch klar geworden ist, wie wenig wir doch für die Welt da unten gebaut sind. Alles Leben hat seinen Ursprung im Meer, zumindest nach aktuellem Wissenstand. Trotzdem scheint fast nichts an unserem Körper noch für diese Umgebung geeignet. Besonders als Lungenatmer hat man es schwer, wird man doch durch die Kompressibilität der Luft mit einer Vielzahl an Problemen konfrontiert, die sich für Kiemenatmer gar nicht erst ergeben.

Und doch ist es gerade diese Herausforderung, diese absolute Fremdheit des feuchten Lebensraums, die mich – neben seinen skurrilen Bewohnern und wilden Schönheiten – so fasziniert. Ich werde sicher zurückkommen.

## Literatur

- I. Borazjani und M. Daghooghi. The fish tail motion forms an attached leading edge vortex. *Proceedings Royal Society B*, 280, 2013. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2012.2071>.
- Gotthilf Hempel und Kai Bischof, Editors. *Faszination Meeresforschung*. Springer Verlag, Berlin, 2. Auflage, 2017. eBook.
- Sönke Johnsen. The Red and the Black: Bioluminescence and the Color of Animals in the Deep Sea. *Integrative and Comparative Biology*, 45(2):234–246, April 2005. <https://doi.org/10.1093/icb/45.2.234>.
- R. H. Douglas, J. C. Partridge und N. J. Marshall. The Eyes of Deep-Sea Fish I: Lens Pigmentation, Tapeta and Visual Pigments. *Progress in Retinal and Eye Research*, 17(4):597–636, 1998.
- T. Gerlach, D. Sprenger und N. K. Michiels. Fairy wrasses perceive and respond to their deep red fluorescent coloration. *Proceedings of the Royal Society B*, 281, 2014. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2014.0787>.
- Sascha Tegtmeyer. Enorm tief: William Trubridge bricht eigenen Apnoe-Rekord. TAUCHEN Online-Magazin, 16. Mai 2016. <https://www.tauchen.de/news/enorm-tief-william-trubridge-bricht-eigenen-apnoe-rekord/>, l.A. 03.06.2019, 11:36 Uhr.
- Dieter Meschede, Editor. *Gerthsen Physik*. Springer Spektrum Verlag, Berlin-Heidelberg, 25. Auflage, 2015. eBook.
- Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 2. Elektrizität und Optik*. Springer Spektrum Verlag, Berlin-Heidelberg, 6. Auflage, 2013.
- William C. Heynes, Editor. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, Boca Raton, FL, 97. Auflage, 2016-2017.
- Bernd Hatje. Das ozeanische Klima. Offener Hamburger Schulserver: Online-Artikel, 2006. [https://www.hh.schule.de/abgstgeorg/BS\\_AG/Erdkunde/Klima/OzeanischesKlima.html](https://www.hh.schule.de/abgstgeorg/BS_AG/Erdkunde/Klima/OzeanischesKlima.html), l.A. 03.06.2019, 14:11 Uhr.
- Norbert Lassau. Eine Nachricht für U-Boote. WELT Online-Artikel: Fünf Minuten Physik, 2009. [https://www.welt.de/welt\\_print/wissen/article5471533/Eine-Nachricht-fuer-U-Boote.html](https://www.welt.de/welt_print/wissen/article5471533/Eine-Nachricht-fuer-U-Boote.html), l.A. 03.06.2019, 14:29 Uhr.

- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung. Kommunizieren unter Wasser. Online-Artikel, September 2016. <https://www.bundesregierung.de/bregde/aktuelles/kommunizieren-unter-wasser-214876>, l.A. 03.06.2019, 14:31 Uhr.
- Christina Schmidt. Geheime Abgründe – Darum wissen wir von der Tiefsee weniger als vom Mond. QUARKS Online-Artikel, Mai 2019. <https://www.quarks.de/gesellschaft/wissenschaft/darum-wissen-wir-von-der-tiefsee-weniger-als-vom-mond/>, l.A. 03.06.2019, 14:41 Uhr.
- Jan Oldenhuizing. *Abstrakte Theorie – Grundlagen für das Verständnis*. S.C.U.B.A. AG, 2014.
- Ulf König und Ingrid Fuckner. *Tauchsportlexikon DiveLex. Tauchtechnik – Tauchmedizin – Tauchphysik – Tauchausbildung*. Delius Klasing Verlag, Bielefeld, 1. Auflage, 2005.
- Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin. Tiefenrausch. Online-Artikel. <https://www.gtuem.org/981/tauchmedizin/tiefenrausch.html>, l.A. 03.06.2019, 13:50 Uhr.
- Werner Müller und Stephan Frings. *Tier- und Humanphysiologie. Eine Einführung*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 4. Auflage, 2009. eBook.
- Beate Plinninger, A. Rachel, Hartmut Wiesner und Alfred Ziegler. Anschauliche Mechanik: Vortrieb von Wassertieren. *Naturwissenschaften im Unterricht*, Seite 26, 2005.