

Tauchphysik

Unter Tauchen versteht man üblicherweise das völlige Eintauchen des menschlichen Körpers in Wasser mit einem zeitlich befristeten Aufenthalt unter der Wasseroberfläche.

Für diese Umgebungsbedingungen ist der Mensch primär nicht geschaffen. Dennoch gehört das Tauchen für eine Reihe von Menschen zum beruflichen Alltag, wird aber auch von vielen Menschen als Freizeitbeschäftigung und Sport betrieben. Die Betreuung der professionellen Taucher und der Freizeittaucher ist das Feld der Tauchmedizin.

Basis der Tauchmedizin ist das Wissen um die physiologischen und pathophysiologischen Grundlagen des Aufenthaltes unter Wasser. Aufgaben der Tauchmedizin bestehen darin, diese Kenntnisse bei der Untersuchung und Beratung von Tauchern anzuwenden und diese über die besonderen Risiken eines Aufenthaltes unter Wasser zu beraten. Zur Tauchmedizin gehört aber auch die Untersuchung und Behandlung von Erkrankungen, die im Zusammenhang mit dem Tauchen auftreten können.

Die Charakterisierung der Tauchmedizin als ein Bereich, der sich mit dem Aufenthalt des Menschen in einer für ihn nicht primär geeigneten Umgebung beschäftigt, läßt die Parallelen zur Weltraummedizin, zur Flugmedizin und Höhenmedizin erkennen. Auf Grund der besonderen Umgebungsbedingungen erwachsen besondere Risiken und daraus für den untersuchenden und beratenden Arzt eine besondere Verantwortung.

Physikalische Grundlagen und Risiken des Tauchens

Eine der für das Tauchen wichtigsten physikalischen Größen ist der Druck, im internationalen Einheitensystem gemessen in Pascal = 1 Newton pro Quadratmeter (1 Pa = 1 N / qm).

Geläufiger ist das Hunderttausendfache: 100.000 Pascal = 1000 Hekto-Pascal = 1 bar, etwa der durchschnittliche Luftdruck in Meereshöhe (1 Atmosphäre, entsprechend dem "Gewicht" der gesamten kilometerdicken Luftschicht oberhalb der Erdoberfläche).

Wasser ist im Verhältnis zu Luft ca. 800mal schwerer und im Gegensatz zu Luft nicht kompressibel: Entsprechend stark steigt der Druck mit zunehmender Wassertiefe an: Während der Druckunterschied zwischen Weltall und Erdoberfläche nur etwa 1 bar beträgt, steigt der Druck im Wasser von der Wasseroberfläche bis in 10 m Tiefe bereits ebenfalls um 1 bar an. Jede weitere 10 m Wassertiefe bringen ein weiteres bar Druck. Gefahren erwachsen beim Tauchen sowohl aus dem Absolutdruck als auch aus Druckdifferenzen.

Da der Mensch selbst zu einem hohen Prozentsatz aus Wasser besteht, andererseits aber lebensnotwendig auf gasgefüllte Hohlräume und einen Gasaustausch sowohl in den Lungen als auch in der Körperperipherie zwischen Blut und Körperzellen angewiesen ist, sind einige weitere Gasgesetze für das Verständnis der Tauchphysiologie und Tauchpathophysiologie von großer Bedeutung:

Dalton'sches Gesetz oder Partialdruckgesetz

Der Gesamtdruck eines Gasgemisches ist die Summe der Drücke, die jedes Gas für sich ausüben würde, wenn es alleine den gesamten verfügbaren Raum des Gasgemisches ausfüllte. So üben die 78% Stickstoff der Luft in Meereshöhe auch 78% des Gesamtluftdrucks von ca. 1 bar, d.h. 0,78 bar aus, entsprechend üben die 21% Sauerstoff der Luft in Meereshöhe einen Sauerstoffpartialdruck (Sauerstoffteildruck) von 0,21 bar aus.

Wird in 10 m Wassertiefe normale Luft geatmet, so herrscht dort ein Gesamtdruck von 2 bar (entsprechend 1 bar an der Wasseroberfläche + einem weiteren bar durch die 10 m Wassertiefe); der Stickstoffpartialdruck beträgt $2 \text{ bar} \times 0,78 = 1,56 \text{ bar}$ und der Sauerstoffpartialdruck $2 \text{ bar} \times 0,21 = 0,42 \text{ bar}$.

Boyle-Mariottesches Gesetz

Das Volumen eines jeden Gases unter konstanter Temperatur verhält sich umgekehrt proportional zum absoluten Druck. Die Dichte ist dem absoluten Druck ebenfalls direkt proportional. Das heißt: der Wert von Druck mal Volumen ist konstant ($p \times V = \text{konstant}$).

Dies hat beim Menschen besondere Bedeutung für gasgefüllte Hohlräume, je nach dem, ob diese gasgefüllten Hohlräume flexibel begrenzt sind (wie dies bei der Lunge und dem Brustkorb der Fall ist) oder ob die Hohlräume starr begrenzt sind (wie dies bei den Nasennebenhöhlen der Fall ist): Wird z.B. mittels Atemanhalten von der Wasseroberfläche in eine Tiefe von 10 m getaucht, so steigt der Umgebungsdruck und damit auch der Druck in den Lungen von 1 bar auf 2 bar, d.h. auf das Doppelte; entsprechend wird die in der Lunge eingeschlossene Luft auf die Hälfte ihres Volumens komprimiert. Umgekehrt dehnt sich die in der Lunge eingeschlossene Luftmenge beim Auftauchen aus 10 m Tiefe bis an die Wasseroberfläche wieder auf das Doppelte ihres komprimierten Volumens aus.

Solche ausgeprägten Volumenänderungen bergen grundsätzlich immer die Gefahr von Gewebeerreißen. Besonders hoch wird dieses Risiko, wenn z.B. durch Emphyseblasen eine erhöhte Verletzbarkeit des Gewebes besteht oder wenn durch frühere Erkrankungen Vernarbungen bestehen.

Zusätzliche Risiken entstehen aber auch dann, wenn die Lunge nicht nur an der Wasseroberfläche normal mit Luft gefüllt und mit angehaltenem Atem getaucht wird, sondern beim Tauchen mit Preßlufttauchgerät auch unter Wasser eine "normale" Lungenfüllung erfolgt.

Hier befindet sich dann in 10 m Wassertiefe etwa doppelt soviel Luftmasse in der Lunge, wie dies bei gleicher Atemlage an der Oberfläche entspräche: Taucht der Taucher z.B. in einer Panikreaktion ohne ausreichende Ausatmung an die Wasseroberfläche auf, so dehnt sich die in der Lunge enthaltene Luftmenge auf das Doppelte aus, was zur Lungenzerreißen mit anschließender Gasembolie in die Blutgefäße führen kann.

Da der absolute Druck beim Abtauchen in die Tiefe alle 10 m linear um 1 bar ansteigt, sind die relativen Druckänderungen in der Nähe der Wasseroberfläche am größten:

- von der Oberfläche auf 10 m Wassertiefe = Druck von 1 bar auf 2 bar = Anstieg um 100%
- von 10 m auf 20 m Wassertiefe = Druck von 2 bar auf 3 bar = Anstieg um 50%
- von 20 m auf 30 m Wassertiefe = Druck von 3 bar auf 4 bar = Anstieg um 33%

Entsprechend sind die druckänderungsabhängigen Risiken in der Nähe der Wasseroberfläche am größten. Dies ist auch der Grund dafür, daß es im Regelfall unsinnig ist, ärztlicherseits eine auf niedrige Tauchtiefen beschränkte Tauchtauglichkeit auszusprechen: Wenn keine Tauchtauglichkeit besteht, dann besteht die Tauchtauglichkeit auch nicht für niedrige Tauchtiefen!

Werden starr umschlossene Gasräume mit einem fest umschlossenen Gasvolumen, z.B. im Rahmen einer Erkältung geschwollene Nasennebenhöhlen oder Paukenhöhle, einer Druckänderung ausgesetzt, so ist - wegen der starren Umwandlung - eine Volumenänderung und gleichzeitige Druckanpassung an den sich ändernden Umgebungsdruck nicht möglich.

Damit entstehen Druckunterschiede zwischen der starr umschlossenen Gasmenge und der Umgebung, die im Falle der Nasennebenhöhlen starke Schmerzen und im Falle der Paukenhöhle auf Grund der Druckdifferenz zwischen Paukenhöhle und äußerem Gehörgang zum Zerreißen des Trommelfells führen können.

Da bereits in 3 m Wassertiefe ein Druckunterschied von 0,3 bar zwischen äußerem Gehörgang und Paukenhöhle herrscht, genügen bereits wenige Meter Tauchtiefe zum Zerreißen des Trommelfells mit u.U. für den Taucher tödlichen Folgen: Es strömt gegenüber der Körpertemperatur deutlich kälteres Wasser ein, welches das Gleichgewichtsorgan massiv reizt: Bei der sofort einsetzenden Orientierungslosigkeit kann es zum Ertrinken des Tauchers kommen.

Ein weiteres Beispiel dafür, daß auch bereits in ganz geringen Tiefen lebensbedrohende Risiken lauern, stellt das Schnorcheln dar: Beim Schnorcheln befindet sich der Körper unter Wasser und damit in einer Umgebung mit höherem Druck als an der Wasseroberfläche, während die Lunge über den Schnorchel mit der Umgebungsluft und dem niedrigeren Druck als im Wasser verbunden ist: Somit ergeben sich prinzipiell immer Druckdifferenzen zwischen dem unter höherem Druck stehenden Lungengewebe einschließlich der Lungenkapillaren (feinste Lungenblutgefäße) und dem unter niedrigerem Druck stehenden Lungenbläschen-, Bronchien- und Luftröhrenraum.

Um diese Druckdifferenz zu begrenzen, sind handelsübliche und zulässige Schnorchel auf eine Maximallänge von 30 cm begrenzt. Bereits bei einer Verlängerung des Schnorchels auf 60 cm wäre die Druckdifferenz mit 0,06 bar so groß, daß selbst beim völlig Gesunden Blutflüssigkeit aus den Kapillaren in die Lungenbläschen gepreßt würde und so das klinische Bild eines Lungenödems entstünde.

Henry'sches Gesetz

Die Menge eines jeden Gases, welches sich in Flüssigkeit löst, ist direkt abhängig vom Partialdruck des Gases, welches die Flüssigkeitsoberfläche berührt, sowie vom Löslichkeitskoeffizienten des betreffenden Gases in der betreffenden Flüssigkeit.

Dies bedeutet, daß ein Mensch unter normalen Umgebungsbedingungen von jedem in der Atemluft vorhandenen Gas eine dem Gaspartialdruck entsprechende Menge im Blut sowie den Körpergeweben gelöst enthält. Begibt sich der Mensch in eine Wassertiefe, die einer Partialdruckverdoppelung entspricht, so verdoppelt sich auch die im Blut und den Geweben gelöste Gasmenge.

Umgekehrt wird die entsprechende Gasmenge beim Aufsteigen aus der Tiefe und der damit einhergehenden Druckminderung wieder frei: Geschieht dies zu schnell, so bilden sich dabei Gasblasen, vergleichbar den Gasblasen beim Öffnen einer Mineralwasserflasche. Dabei kommt es zu einer Gasembolie - auch als Dekompressionskrankheit bezeichnet - mit besonderen Schädigungen im Bereich des Zentralnervensystems.

Gasblasen treten immer dann auf, wenn ein tolerables Maß der "Übersättigung" einer wäßrigen Lösung mit Gas überschritten wird. Früher nahm man an, daß dieser Übersättigungsfaktor im menschlichen Blut etwa 2 beträgt, d.h., daß ein Aufstieg aus 10 m Wassertiefe = 2 bar Druck an die Wasseroberfläche gerade noch ohne Auftreten von Gasblasen möglich wäre.

Aus heutiger Kenntnis heraus ist dieser Übersättigungsfaktor aber deutlich kleiner; schon beim schnellen Auftauchen aus nur 6 m Wassertiefe lassen sich mit empfindlichen diagnostischen Techniken Gasblasen nachweisen.

Die rechnerische Erfassung dieser Phänomene im menschlichen Organismus wird dadurch höchst kompliziert, daß die verschiedenen Körpergewebe (anders als die Blutflüssigkeit in den Lungenkapillaren, die sich binnen Sekundenbruchteilen mit der Luft in den Lungenbläschen ins Gleichgewicht setzt) unterschiedliche Zeiten für das Erreichen eines Gleichgewichtszustandes benötigen. Beispielsweise beträgt diese Zeit für Fettgewebe Stunden, so daß auch bei einem längst an die Wasseroberfläche aufgetauchten Taucher noch in den Stunden nach einem längeren und tieferen Tauchgang soviel Stickstoff in seinem Fettgewebe physikalisch gelöst sein kann, daß dieser Stickstoff zur Bildung von Gasblasen im Blut führen kann.

Entsprechend ist es verständlich, daß das Risiko hierzu bei Tauchern mit hohem Körperfettanteil größer ist, was bei der Beratung und Beurteilung der Tauchtauglichkeit übergewichtiger Personen berücksichtigt werden sollte.

Gefahren, die von den Gaspartialdrücken ausgehen, ergeben sich beim Tauchen in mehrerlei Hinsicht: Wird mit normalen Preßlufttauchgeräten in größere Tiefen getaucht, so steigt der Stickstoffpartialdruck (Stickstoffteildruck) auf Werte an, bei denen Stickstoff giftig wirkt: So beträgt der Stickstoffpartialdruck in 40 m Wassertiefe ($5 \text{ bar} \times 0,78 =$) 3,9 bar.

Dieser Stickstoffpartialdruck kann bereits zu einer Stickstoffnarkose, in der Tauchmedizin auch als **Tiefenrausch** bekannt, führen: Dies zeigt sich zunächst in einer euphorischen und der Situation unangemessen unkritischen Bewußtseinslage des Tauchers, die zu unkontrollierten Reaktionen und der Gefahr des Absteigens in größere Tiefen mit Verstärkung der Symptomatik und Ertrinken führt.

Wird dagegen mit reinem Sauerstoff getaucht, wie dies für Sporttaucher unzulässig ist, aber z.B. im militärischen Bereich genutzt wird, so wird auf Grund des (gegenüber den sonst üblichen Lebensbedingungen des Menschen an Land) massiv gesteigerten Sauerstoffpartialdrucks rasch die Sauerstofftoxizitätsgrenze überschritten.

Wird in 10 m Tiefe reiner Sauerstoff geatmet, so entspricht dies einem Sauerstoffpartialdruck von ca. 2 bar und damit dem fast zehnfachen des an Land üblichen Sauerstoffpartialdrucks in der Atemluft auf Meereshöhe (0,21 bar). In diesem Druckbereich (und mehr noch bei 15 m Tiefe) sind - vor allem unter den Bedingungen körperlicher Arbeit - bereits sauerstofftoxische Effekte mit Erregungsstadium und schließlich Bewußtlosigkeit möglich.

Vom Absolutdruck eines Gases abhängige Risiken ergeben sich aber auch z.B. in ganz anderem Zusammenhang: Taucht ein Mensch, der nur den Atem angehalten hat, wieder an die Wasseroberfläche auf, so sinkt der Umgebungsdruck beim Auftauchen aus 10 m Wassertiefe auf die Hälfte; entsprechend sinken alle Gaspartialdrücke im Körper - selbst wenn in dieser Zeitspanne keinerlei Gas verbraucht wird - ebenfalls auf die Hälfte: Ein auf die Hälfte sinkender Sauerstoffpartialdruck kann aber binnen Sekunden (aufgrund von Sauerstoffmangel im Gehirn) zur Bewußtlosigkeit mit anschließendem Ertrinken führen: Dies ist in der Tauchmedizin als "Flachwasserertrinkungstod" bekannt.

Die Gefahr hierzu wird größer, wenn vor dem Tauchen in Atemanhalteteknik (= Apnoe-Tauchen) hyperventiliert (Hyperventilation: sehr schnelles Ein- und Ausatmen über längere Zeit) und dadurch vermehrt Kohlendioxid abgeatmet wird: Damit wird der Atemreiz durch ansteigenden Kohlendioxidpartialdruck zeitlich auf einen späteren und dann u.U. zu spätem Zeitpunkt verschoben. Entsprechend muß vor der Anwendung einer Hyperventilation vor einem Apnoe-Tauchgang dringend gewarnt werden.

Gesetz von Gay Lussac

Für jedes Gas unter konstantem Druck ist das Volumen direkt proportional der absoluten Temperatur: für jedes Gas unter konstantem Volumen ist der Druck direkt proportional der absoluten Temperatur. Auch dies spielt beim Tauchen in kaltem Wasser eine Rolle: Der Druck in einer von der Sonne aufgeheizten Preßluftflasche sinkt beim Eintauchen in kaltes Wasser auch ohne Atemgasentnahme, der verfügbare Luftvorrat wird kleiner.

Auf Grund der Toxizität sowohl von Stickstoff als auch von Sauerstoff ist ein Tauchen sowohl mit Preßluft als auch mit reinem Sauerstoff tiefenmäßig begrenzt.

Für tiefere Tauchgänge müssen deshalb die Partialdrücke sowohl von Sauerstoff als auch von Stickstoff relativ niedrig gehalten werden, was die Verwendung eines weiteren Gases, z.B. Helium, in speziellen Gasmischungen (z.B. Heliox oder Trimix) erforderlich macht.

Bei größeren Tiefen kommen dann weitere Risiken hinzu: In großen Tiefen wird die Dichte der Luft hinsichtlich der zu leistenden Atemarbeit, die entsprechend der Dichte des Atemgases ansteigt, größer. Helium hat zudem eine sechsfach höhere Wärmeleitung als Luft, so daß es bei Benutzung von heliumhaltigen Atemgasen auch zu einer vermehrten "inneren" Auskühlung über die Atmung kommt.

Weitere Risiken ergeben sich z. B. aus Verletzungen, die trotz auftretender Blutung auf Grund des Kälteeinflusses unbemerkt bleiben und zum Blutungsschock führen können bis hin zu Verletzungen z.B. durch angreifende Tiere oder durch allergische Reaktionen durch Berührung mit Quallen.

Sehen und Hören

Weitere Besonderheiten des Aufenthaltes unter Wasser ergeben sich auf Grund geänderter physikalischer Bedingungen des Sehens und Hörens. So wird Licht beim Eintritt von Luft in Wasser gebrochen und gestreut, so daß in größere Tiefen (über 100 m Tauchtiefe) selbst bei klarem Wasser praktisch kein sichtbares Licht mehr von der Wasseroberfläche hierher vordringt. Brechungen entstehen an der Wasseroberfläche, an der Wasser-Maskenglas-Grenze sowie an der inneren Maskenglasoberfläche.

Dies führt dazu, daß Gegenstände unter Wasser um ein Drittel größer als in der Luft und um ein Viertel näher erscheinen, was für ungeübte Taucher erhebliche Probleme beim gezielten Ergreifen von Gegenständen unter Wasser bewirkt. Auch werden die unterschiedlichen Farbanteile weißen Lichtes im Wasser in abnehmender Reihenfolge von rot über orange, gelb, grün hin zu blau unterschiedlich stark absorbiert, so daß bereits in mäßiger Tiefe kein rotes Licht mehr vorhanden ist und rote Gegenstände nicht mehr richtig gesehen werden. In größerer Tiefe ist nur noch hellblaues Licht vorhanden.

Zusätzliche Probleme der Orientierung treten durch Wassertrübungen wie Verschmutzungen oder Plankton auf, die zu Minderungen der Sichtweite bis auf weniger als 1 m mit entsprechend schwerer Orientierung führen.

Auch die Akustik ist unter Wasser erheblich geändert, da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls im Wasser ca. 1000 Meter pro Sekunde (im Gegensatz zu ca. 330 m/sec in Luft) beträgt: Dies macht ein Richtungshören unter Wasser kaum möglich, da der Zeitunterschied zwischen beiden Ohren im Wasser dreimal kürzer als an Land ist.

Auftrieb

Eine weitere wichtige physikalische Grundlage sowohl für Schwimmen als auch Tauchen beruht auf dem Archimedischen Prinzip des Auftriebs: Das Gewicht eines Körpers in einer Flüssigkeit wird um soviel leichter wie die verdrängte Flüssigkeit wiegt.

Für den Menschen bedeutet dies, daß das spezifische Gewicht des Körpers bei tiefer Einatmung und Luftanhalten etwa im Bereich des spezifischen Gewichtes von Wasser liegt, so daß in diesem Zustand etwa ein Schwimm- oder Schwebezustand auch ohne nennenswerte Schwimmbewegungen möglich ist, während im Zustand tiefer Ausatmung das spezifische Gewicht höher als von Wasser ist und der Körper ohne Schwimmbewegungen nach unten sinkt.

Bei sehr salzhaltigem Wasser liegt das spezifische Gewicht des Wassers höher, entsprechend ist dann auch der Auftrieb größer, so daß hier ein Schwimmen auch in der Ausatemphase möglich ist (Beispiel: Totes Meer).

Für den Taucher bedeutet das Archimedische Prinzip, daß durch mitgeführte Tariergewichte oder eine entsprechende Tarierweste bei mittlerer Atemlage ein Schwebezustand ohne Schwimmbewegung möglich sein sollte.

Gefahren erwachsen daraus, daß es sowohl durch Bleigewichte als auch durch das Zusammenpressen von luftgefüllten Hohlräumen in Neopren-Anzügen zu einem ungewollten Absinken in größere Tiefen oder durch das plötzliche Aufblasen einer Tarierweste aus einer Gasflasche zu einem unkontrolliert schnellen Aufstieg kommen kann.