



Unter Druck

Für viele Menschen ist das Tauchen ein Hobby, für manche sogar ein Beruf. Die erreichbare Tiefe hängt von verschiedenen Faktoren ab.

Denise Müller-Dum und Jens Kube

Einst sagte der französische Meeresforscher Jacques-Yves Cousteau: „Wer Fische studieren will, muss selbst zum Fisch werden.“ Er lebte zeitweise unter Wasser und wurde mit der Dokumentation seiner Tauchabenteuer berühmt. Um zu tauchen, muss der Mensch mit dem unter Wasser deutlich höheren hydrostatischen Druck umgehen: Dieser nimmt mit der Tiefe viel schneller zu, als er an Land mit der Höhe abnimmt. Die größere Dichte von Wasser sorgt dafür, dass sich der Druck alle zehn Meter um ein Bar erhöht; in der Luft liegt dieser Unterschied zwischen Erdoberfläche und Weltall vor.

Daher kann ein schmerzhafter Druck auf den Ohren bereits entstehen, wenn man nach einem Ring am Grund eines tiefen Schwimmbeckens taucht. Denn das Trommelfell dichtet das Mittelohr ab (**Abb. 1**), welches vor dem Abtauchen mit Luft gefüllt ist. Mit zunehmender Tiefe wächst der Druckunterschied zwischen Mittelohr und Umgebung, was zum Reißen des Trommelfells führen kann. Abhilfe schafft das Ausatmen in die zu-

gehaltene Nase. Dabei öffnet sich die Eustachi-Röhre, die den Rachenraum mit dem Mittelohr verbindet, sodass es zum Druckausgleich kommt.

Ein weiterer luftgefüllter Raum im menschlichen Körper ist die Lunge. Beim Apnoetauchen – dem Tauchen mit angehaltener Luft – füllt sich das Organ unter Atmosphärendruck. Beim Vordringen in die Tiefe presst die Luft die Lunge immer weiter zusammen: Gemäß dem Gesetz von Boyle-Mariotte bleibt bei Gasen das Produkt aus Druck und Volumen konstant, sofern sich Stoffmenge und Temperatur nicht ändern. Das ergibt sich direkt aus der allgemeinen Gasgleichung $pV = nR_m T$ mit dem Druck p , dem Volumen V , der Stoffmenge n , der universellen Gaskonstante R_m und der Temperatur T .

Tauchen bis zur Ohnmacht

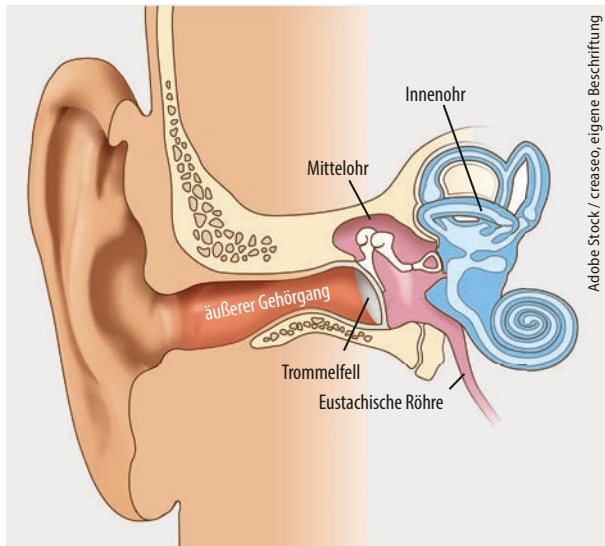
Bei rund 30 Metern Tiefe ist die Lunge auf ein Viertel ihres Volumens geschrumpft. Das entspricht dem Zustand bei maximaler Aus-

atmung, sodass diese Tiefe in der Tauchmedizin lange als Maximum für das Apnoetauchen galt. Dass der Mensch größere Tiefen erreichen kann, beruht auf dem „Bloodshift“: Das Blut fließt aus den Extremitäten vermehrt in den Rumpf und füllt die Blutgefäße der Lungenbläschen. Dadurch verkleinern diese sich und sind gegen den Unterdruck geschützt.

Den Tiefenrekord im Apnoetauchen hält der Österreicher Herbert Nitsch mit 214 Metern (**Abb. 2**). Ein Tauchschlitten katapultierte ihn in weniger als zwei Minuten zur Rekordmarke; der Rückweg aus eigener Kraft dauerte fünf Minuten. Beim Apnoetauchen ist es wichtig, den Atemreflex hinauszuzögern, der mit steigendem Kohlenstoffdioxidgehalt im Blut einsetzt. Doch das kann gefährlich werden: Sinkt der Sauerstoffgehalt unter eine kritische Schwelle, verlieren die Tauchenden das Bewusstsein.

Erschwerend kommt ein Phänomen hinzu, das durch das Henry-Gesetz beschrieben wird. Demnach ergibt sich die Konzentration C_F eines

Abb. 1 Das Trommelfell trennt Mittelohr und äußeren Gehörgang. Die Eustachische Röhre führt zum Nasenrachenraum und sorgt für den Druckausgleich des Mittelohrs mit dem Umgebungsdruck, beispielsweise durch Gähnen, Schlucken oder Ausatmen in die zugehaltene Nase.



Gases in einer Flüssigkeit als Produkt seines Partialdrucks p in der Gasphase und des inversen, stoff- und temperaturabhängigen Henry-Koeffizienten λ : $C_F = \lambda p$ – je höher der Druck, desto mehr Gas löst sich in der Flüssigkeit. Mit zunehmender Tiefe gelangt beim Tauchen also immer mehr Sauerstoff über die Lungenbläschen ins Blut. Beim Auftauchen wird der Sauerstoff entzogen, und eine Ohnmacht droht. Daher müssen sich Apnoetauchende auf den Rückweg machen, lange bevor der Atemreiz einsetzt.

Vorsicht: Tiefenrausch!

Beim Tauchen mit Druckgasflasche lässt sich mehr Zeit unter Wasser verbringen, weil das Atmen weiterhin möglich ist. Darüber hinaus löst der Atemregler das Kompressionsproblem der Lunge, indem er sie mit Gas unter Umgebungsdruck füllt. Doch nicht nur Sauerstoff, sondern auch zusätzlicher Stickstoff wird in die Blutbahn gepresst. Da Stickstoff in hohen Konzentrationen giftig wirkt, kann es zum Tiefenrausch kommen: Mangelndes Urteilsvermögen, Euphorie, aber auch Angstzustände treten auf. Ein erhöhter Sauerstoffanteil im Atemgas ist keine Lösung, da auch Sauerstoff toxisch wirken kann. Um große Tauchtiefen zu erreichen, ist der Sauerstoffanteil in der Druckgasflasche auf weniger als zehn Prozent reduziert – im Vergleich zu 21 Prozent in normaler Atemluft.

Als Stickstoff-Ersatz eignet sich das Edelgas Helium, das Tauchgänge bis 150 Meter ohne Tiefenrausch möglich macht. Berufstaucher nutzen dieses „Heliox“ genannte Gemisch aus Sauerstoff und Helium bei Arbeiten am Grund von Ölbohrinseln. Doch bei manchen beginnen ab hundert Metern Tauchtiefe dennoch, die Finger zu zittern, andere neurologische Symptome wie Kopfschmerz oder Schwindel kommen hinzu. Noch ist nicht geklärt, ob der hohe Druck selbst oder die hohen Helium-Partialdrücke dieses Syndrom auslösen.

Mithilfe unterschiedlicher, auf die jeweilige Tiefe abgestimmter Atemgasgemische gelang es dem Ägypter Ahmed Gabr, innerhalb von 15 Minuten 332,5 Meter tief zu tauchen. Für den Rückweg ließ er sich 14 Stunden Zeit: Denn perlt der übermäßig im Blut gelöste Stickstoff bei zu schnell abnehmendem Druck gemäß dem Henry-Gesetz aus, kommt es zur Dekompressionskrankheit, in deren Folge die Gefäße verstopfen und zerreißen können. Um den Körper langsam wieder an geringere Drücke zu gewöhnen, sind Dekompressionsstopps beim Auftauchen notwendig.

Tierische Tauchprofis

Noch tiefer als 300 Meter sind Menschen bisher nur in Panzertauchanzügen oder U-Booten getaucht, die den Körper vom hohen hydrostatischen Druck der Tiefsee abschirmen. Säuge-

tiere, die im Meer leben, tauchen mit einem Atemzug bis zu zehnmal so tief, beispielsweise Pottwale. Sie schützen sich vor Tiefenrausch und Dekompressionskrankheit, indem sie ihre Versorgung von der Lunge abkoppeln. Ab etwa 80 Metern Tiefe kollabiert ihr Atmungsorgan, und der Gasaustausch kommt zum Erliegen – kein weiterer Stickstoff dringt in die Blutbahn ein. Das verhindert eine Stickstoffnarkose und beim Auftauchen die Blasenbildung im Blut. Darüber hinaus nutzen Wale eine Lungenfüllung Luft sehr effizient, indem sie den Sauerstoff im Blut sowie im Muskel- und Fettgewebe speichern und sich damit während ihres Tauchgangs versorgen. Parallel dazu fahren sie ihren Stoffwechsel auf ein Minimum herunter – ähnlich wie trainierte Apnoetauchende. Dank dieses „Energiesparmodus“ können Wale stundenlang unter Wasser bleiben.

Wenn das Tauchen zum Beruf wird, gelingen aber auch dem Menschen erstaunliche Anpassungen. So ist von den Haenyeo-Taucherinnen in Südkorea bekannt, dass sie die Milz als Sauerstoffspeicher nutzen. Dadurch können sie minutenlang den Atemreiz unterdrücken und in zwölf Metern Tiefe kiloweise Meeresfrüchte ernten, beispielsweise Seegurken.

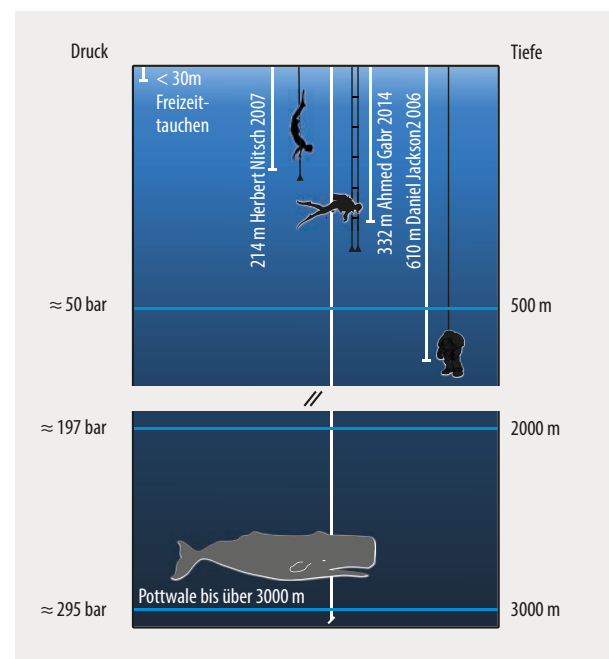


Abb. 2 Die für Menschen erreichbare Tauchtiefe hängt von der technischen Ausrüstung ab. Die aktuellen Weltrekorde im Apnoe- und Gerätetauchen sowie mit Panzertauchanzug übertrifft ein Pottwal mit Leichtigkeit.