

Tauchen und Blasenbildung

Aktuelles aus der Tauchmedizin und der Dekompressionsphysiologie
von Lothar Apke (7/2009)

Mikrogasblasen

Aus Untersuchungen von Tauchern mit der Dopplersonographie ergibt sich, dass bei fast allen Tauchgängen kleine, „stumme“ Gasblasen im Blut vorhanden sind. DAN-Studien zeigen bei über 50 % aller untersuchten Tauchgänge diese sog. Mikrogasblasen. Je nach Tauchverhalten treten hierbei mehr oder weniger auf. Die Existenz der Mikrogasblasen allein führt jedoch nicht zwangsläufig zu Symptomen. Man vermutet aber, dass diese kleinsten Bläschen unter bestimmten Umständen als Blasenkeime fungieren und / oder sich mit Hilfe von lokalen Strukturen in den Blutgefäßen akkumulieren können. Die möglichen Folgen sind dann Gasembolien in den Organen und Gefäßen (Dekompressionserkrankung).

Die modernen Stickstoff - Sättigungs- und Entsättigungsberechnungen beim Sporttauchen (z.B. nach Bühlmann) basieren auf dem Haldane'schen Gewebemodell. Berücksichtigt wird hierbei die druck- und zeitabhängige Zunahme bzw. Abnahme der Stickstoffkonzentration in den Geweben. Abhängig ist diese insbesondere von der Durchblutung und der

Modell	Art	Jahr
Haldane	Gewebe Modell (Gewebesättigung)	1908
US Navy I	Gewebe Modell (Gewebesättigung)	ab 1960
VPM (Yount, Strauss)	Bläschen Modell	ab 1975
ZH-L 16 (Bühlmann)	Gewebe Modell (Gewebesättigung)	ab 1980
RGBM (Wienke)	Bläschen Modell	ab 1991

Stickstoffaffinität. Man geht aber inzwischen davon aus, dass nicht nur die Sättigungskinetik der Inertgase in den Geweben sondern auch das Verhalten der vorhandenen (Mikro-) Gasblasen in Blut und Geweben einen wichtigen Faktor für die Dekompressionsphysiologie darstellt. Bereits seit Mitte der 70er Jahre

gibt es erste so genannte Bläschenmodelle, welche die Entstehung, das Verhalten und den Abbau von Gasblasen in den Geweben beschreiben (Yount und Strauss). Diese Modelle benötigten aber immense Rechenkapazitäten, welche von den damaligen Computern, wie auch den heutigen Tauchcomputern, (noch) nicht geleistet wurden / werden. Anfang der 90er Jahre hat *Wienke* ein vereinfachtes Bläschenmodell entwickelt (**Reduced Gradient Bubble Modell**, welches z.B. bei Suunto, Mares, u.a. verwandt wird). Die Kinetik der Gasblasen wird sich auch zukünftig in weiteren neuen Rechenmodellen niederschlagen, die eben nicht mehr nur die Haldane'schen Sättigungsfaktoren der Gewebe sondern auch die Bläschenkinetik mit einbeziehen. Probleme sind dabei u.a. aber immer noch die komplexen mathematischen Gleichungen mit entsprechenden Hardwareleistungen und auch diverser Forschungsbedarf bezüglich der Blasenphysiologie mit empirischen Daten.

Tauchpraxis/Auftauchgeschwindigkeit

Für das Tauchverhalten ergeben sich damit aber bereits neue Aspekte. Der Unterschied der Modelle zeigt sich in der Tauchpraxis z.B. an der maximalen Aufstiegs geschwindigkeit, die sich heutzutage umso mehr verringert, je näher man der Oberfläche kommt. Man geht z.Zt. von der Faustregel der maximalen Druckhalbierung pro 2 Aufstiegsminuten aus. Das bedeutet z.B. eine Aufstiegszeit von 5 m Wassertiefe bis zur Oberfläche von 2 min. Diese Erkenntnis deckt sich mit den DAN-Untersuchungen der Mikrogasblasen, deren Vorhandensein deutlich abnimmt, wenn die Austauschphase im Flachbereich verlängert wird. Das heißt, der Aufstieg muss idealerweise so langsam erfolgen, dass genügend Zeit besteht, die bereits vorhandenen Blasen abzuatmen, bevor diese wachsen und sich akkumulieren können. Hierzu werden auch sog. Tiefenstopps diskutiert, die aktuell durch eine weitere Studie von

Marroni et.al. (DAN) gestützt werden. Im Sporttaucherbereich ab 20 m Tauchtiefe gibt es daher eine Empfehlung von 2,5 min Tiefenstopp auf halber maximaler Tauchtiefe.

Es wird hier deutlich, dass zwei unterschiedliche „Austauchstrategien“ miteinander in Einklang gebracht werden sollen. Zum einen aus der Haldan´schen Sättigungsphilosophie, die ein relativ zügiges Auftauchen im Rahmen der Austauschregeln fordert, um eine zusätzliche Gewebeaufsättigung zu minimieren. Zum anderen das Bestreben, der Bläschenkinetik und dem Abatmen der Mikroblasen über den Lungenfilter gerecht zu werden und das Auftauchen daher abhängig vom Umgebungsdruck zu verlangsamen. Das **RGB-Modell von Wienke** versucht nun gerade diese beiden Strategien zu kombinieren und daraus ein praktikables Austauschverhalten zu berechnen. Auch in den neuen Rechenmodellen nach Bühlmann (Gewebeaufsättigung) sind inzwischen Faktoren eingearbeitet, die ab 10 m Wassertiefe eine maximale Auftauchgeschwindigkeit von nur noch 6 m pro Minute zulassen. Das entspricht noch nicht den hier geforderten Geschwindigkeiten, ist aber bereits eine Annäherung. Tiefenstopps sind ebenfalls neuerdings bereits integriert.

Beispiele für Aufstiegsgeschwindigkeiten bei Druckhalbierung / 2 min

Tiefe (m)	Druck (bar)	½Druck (bar)	Tiefe mit ½ Druck (m)	Aufstiegsgeschwindigkeit	
50	6,0	3,0	20	30 m / 2 min	15,0 m / min
40	5,0	2,5	15	25 m / 2 min	12,5 m / min
30	4,0	2,0	10	20 m / 2 min	10,0 m / min
20	3,0	1,5	5	15 m / 2 min	7,5 m / min
10	2,0	1,0	0	10 m / 2 min	5,5 m / min
5	1,5	1,0	0	5 m / 2 min	2,5 m / min

(nach Scholz; Sporttaucher 2007 und Klingmann et al.; Moderne Tauchmedizin 2007)

Der Flachbereich oberhalb von 5 bzw. 3 Metern ist aufgrund der hohen relativen Druckänderung der sensibelste Bereich bezüglich Blasenbildung und Blasenwachstum, und deshalb ist nach Ansicht von Tauchmedizinern hier eine möglichst langsame Auftauchgeschwindigkeit nötig. Im Bereich der letzten 3 Meter wird z.B. von Scholz (in Klingmann et. al., s.o.) eine maximale Geschwindigkeit von 1 m /min gefordert. Im „Tec-Tauch.-Bereich“ des Mischgasatmens hat sich aktuell bereits eine Absenkung auf 3 m /min ab einer Tiefe von 6 m als verbindliche Austauschregel etabliert.

Sowohl die geforderte lange Austauschphase am Ende des Tauchgangs, als auch das extrem langsame Auftauchen, können unter manchen Tauchgangsbedingungen und abhängig von der Erfahrung und Tarrierfähigkeit (z.B. im Freiwasser oder bei Wellengang und starker Strömung) schwierig bis nahezu unmöglich sein. Die jederzeitige Kontrolle der sich tiefenabhängig verändernden Auftauchgeschwindigkeit ist dabei auch ein technisches Problem (Tiefenmesser, Computer).



Dennoch sollten wir uns klarmachen, dass dann nach den modernen dekompensationsphysiologischen Erkenntnissen bereits ein Risikoverhalten vorliegen kann. Die Kontrolle der maximalen Auftauchgeschwindigkeit ist zudem nur möglich, wenn wir diese für den Tiefenbereich zwischen 25 und 5 Meter annähernd kennen (siehe Tabellen).

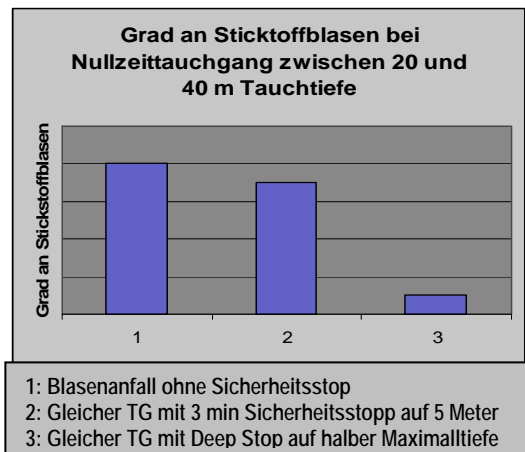
(Graphik nach Klingmann et al.: Moderne Tauchmedizin, 2007)

Ein konsequentes Einhalten der Regel „maximale Druckhalbierung in 2 min.“ (gestrichelte, blaue Linie) würden eine sich vergrößernde Aufstiegsgeschwindigkeit in zunehmender Tiefe und eine sich immer weiter verringernde Geschwindigkeit beim Auftauchen bedeuten. Um

ein sicheres aber noch praktikables Auftauchverhalten zu ermöglichen, wird daher sowohl die maximale, als auch die minimale Aufstiegs­geschwindigkeit begrenzt (siehe rote Kurve in der Graphik, oben). Dabei sind Vereinfachungen sinnvoll. In der Praxis können wir bis 10 m Tiefe wie gewohnt nach Computer austauschen, wobei eine Verlangsamung oberhalb 25 m günstig ist. Oberhalb von 10m Tiefe, bis zum 5m-Stop wird dann mit 6m /min (neue Computer begrenzen dieses bereits). Bei älteren Modellen müssen wir den Aufstieg oberhalb 10m aktiv verlangsamen. Eine Hilfe sind hier sicherlich graphische Aufstiegsanzeigen, sonst muss man eben rechnen (10m Tiefe bis 5m Tiefe = 5m) und die 5 Meter Distanz in einer Minute zurücklegen. Die letzten 5 Tiefenmeter nach dem Sicherheitsstopp soll dann betont langsam Auftauchen (idealerweise in 2 Minuten). Natürlich kann man hier nicht auf die Sekunde und den Dezimeter „timen“. Wir sollten dennoch bestrebt sein, mit unserer Auftauchgeschwindigkeit den oben beschriebenen Anforderungen möglichst nahe zu kommen.

Tiefenstops (Deep Stops)

Diese begründen sich ursprünglich auf den Erfahrungen eines Richard Pyle, der aus subjektiven Taucherfahrungen ableitete, das Pausen in größerer Tauchtiefe Müdigkeit und z.T. auftretende Dekompressionskrankheit abmildern, bzw. verhindern konnten. Er entwickelte daraus ein System von Deep Stops (sog. Pyle Stops), das besonders von der ebenfalls relativ tief tauchen „Tec-Taucherszene“ aufgenommen und variiert wurde (Tiefe - Druck, etc.). Aus diesen Varianten wurde in den letzten Jahren für Sporttaucher die vereinfachte Regel abgeleitet, auf der halben maximalen Tauchtiefe einige Minuten zu verharren. Studien von DAN (Divers Alert Network) zeigen, dass zumindest für den Bereich zwischen 20 und 40 m Tauchtiefe genau dieser vereinfachte Deep Stop von 2,5 Minuten auf der halben maximalen Tauchtiefe eine enorme Verringerung der Mikroblasenbelastung bewirkt, die sogar eine Ausweitung von Sicherheits-Stops oder flachen Deko-Stops weit übertrifft. Daher wird von einigen Tauchverbänden (DAN, Barakuda) inzwischen die Empfehlung für Tiefenstops gegeben. Der VDST hat sich aktuell, nachdem er zunächst diesem Konzept zugestimmt hatte, doch wieder zurückhaltend gezeigt, da die Studien aufgrund der Studienbedingungen und Probandenzahl (noch) nicht aussagekräftig genug seien. Von Tauchmedizinern wird derzeit, neben der generellen Gültigkeit, u.a. die Aussagekraft für längere Tauchgänge und auch größere Tauchtiefen diskutiert.

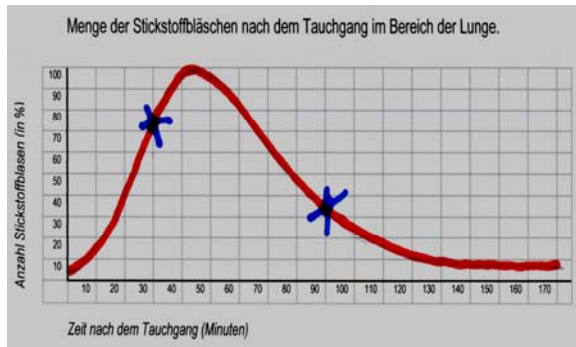


Die Bildung von Mikrogasblasen wird jedoch im oben geschilderten Rahmen deutlich gemindert, was nach heutigen Erkenntnissen zu einer besseren N-Entsättigung der mittelschnellen Gewebe führt. Obwohl sich zwar im schlimmsten Fall die Grundzeit - damit die N-Auffsättigung bestimmter Gewebetypen ebenfalls - geringfügig vergrößern kann, ist ein schädlicher Effekt von Deep-Stops z.Zt. nicht erkennbar. Diverse Computerprogramme haben bereits Deep Stops – mit z.T. unterschiedlichen Rechenmodellen – integriert. Der / die mündige Taucher / in ist also im Moment aufgefordert selber zu entscheiden, nach welchen Empfehlungen ausgetaucht wird. Als Entscheidungshilfe kann hier auch die gute Abhandlung dieses Themas im DIVEMASTER, 2009, Ausgabe 61 dienen.

Stickstoffdynamik und Mikrogasblasen

Eine Erkenntnis aus Doppleruntersuchungen nach dem Tauchgang ist, dass die ersten 90 Minuten nach dem Tauchgang (durchschnittliche Ersttauchgänge) den höchsten Blasenanstieg im Blut beinhalten. Die anfallenden Mikrogasblasen treten in ihrer Häufigkeit in Form einer

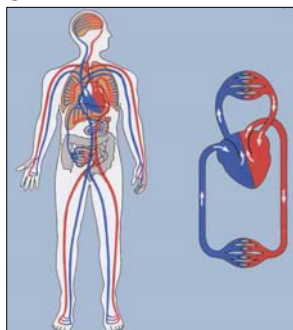
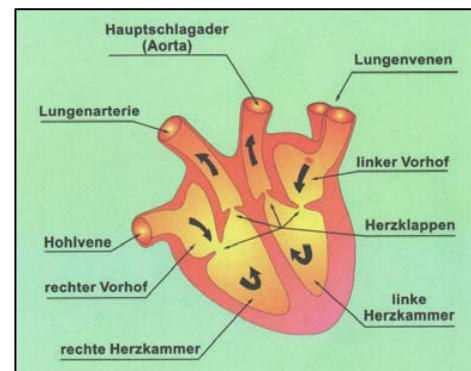
Kurve auf, die ihr Maximum gut 45 Minuten nach Beendigung des Tauchganges erreicht. Das bedeutet, dass eine deutliche Oberflächenpause von mindestens 1,5 Std. sinnvoll ist - und auch gefordert wird -, da erst danach die Stickstoffbelastung niedriger wird (siehe Abb.). Um die Stickstoffaufnahme, aber auch die Abgabe nicht künstlich zu beschleunigen, sollen kurz vor und insbesondere nach den Tauchgängen keine sportlichen Aktivitäten mit starker Anstrengung erfolgen (Anstieg der Muskeldurchblutung). Ebenso verfälschend ist die Anwendung von Wärme (Sauna, heiß Duschen). Dieses gilt ganz besonders in dem Zeitrahmen bis 90 min nach dem Tauchgang. Durch die vermehrte Körperdurchblutung und damit einhergehender Kreislaufaktivierung wird beim Tauchen mehr Stickstoff aufgenommen und/oder in der Entsättigungsphase durch Gefäßweitstellungen vermehrt ins Blut abgegeben. Ein weiteres Problem kann die Auskühlung des Körpers beim Tauchgang sein. Hier wird durch die Engstellung der peripheren Gefäße und auch durch Veränderung der Muskulaturdurchblutung eine Änderung der Stickstoffaufnahme bzw. -abgabe bewirkt, die sich je



nach Ausmaß und Expositionsbedingungen durchaus ungünstig auf die Dekompression auswirken kann. Deswegen gibt es bei Kälte und/oder Anstrengung beim Tauchen Zuschläge für die berechnete Tauchzeit bzw. Abschläge der Nullzeit.

Rechts-Links-Shunt

Shunt = Kurzschluß. Eine Möglichkeit für einen Übertritt von venösem Blut und damit evtl. (Mikro-) Gasblasen in den arteriellen Teil des Kreislaufs ist im Bereich der Lungenkapillaren selbst nachgewiesen. Hier existieren neben den Kapillargefäßen, die direkt am Gasaustausch beteiligt sind, noch Kurzschlussgefäße, die bei einer Überlastung des Systems Blut direkt (quasi an den Alveolen vorbei) in die Lungenvenen leiten. Diese Gefäße sind normalerweise geschlossen, können sich jedoch bei Druckerhöhungen öffnen, um die rechte Herzseite zu entlasten. Wenn die Alveolarkapillaren nun mit vielen Blasen verstopft sind, wird hier durch kurzzeitige Druckerhöhung im Lungenkreislauf der Shunt geöffnet und venöses Blut gelangt vermehrt direkt in den arteriellen Teil des Kreislaufs. Der



physiologische (normale) Shunt liegt bei ca. 2-3 % des gesamten Blutdurchflusses, kann aber nach Einschätzung von Taucherärzten bis auf 10 oder 20 % ansteigen. Das ist z.B. dann der Fall, wenn eine große Zahl von Mikrogasblasen anfällt, also z.B. bei Risikoverhalten, wie Jojo-TG, kurzfristigen, exzessiven Wiederholungstauchgängen, Aufsättigungen der Langzeitgewebe und / oder entsprechend tiefen Tauchgängen. Diskutiert werden z.Zt. auch Shuntvorgänge die durch das sog. Foramen ovale (PFO), einen Spalt in der Herzscheidewand, auftreten können. Man kann sicher davon ausgehen, dass sich durch die Mikrobblasen, in

Verbindung mit Shuntvorgängen die medizinisch-biologischen Grundlagen der Algorithmen der Dekompressionsberechnungen (Tauchtabelle und Computer) verändern. Das Sättigungs- und Entsättigungsverhalten der Gewebe ändert sich - die Dekompressionsberechnungen sind nun fehlerhaft. Mit jedem weiteren Wiederholungstauchgang vergrößert sich diese Falschrechnung. Das bedeutet auch, dass nach Wiederholungstauchgängen und /oder TG mit Risikoprofilen die Wahrscheinlichkeit eines Dekounfalls - trotz vorschriftsmäßigen Verhaltens - in unbekannter Größenordnung wächst.

Zusammenfassung und Empfehlungen für das Tauchverhalten:

Risikosenkendes Tauchverhalten in Bezug auf eine Dekompressionserkrankung zielt zum einen darauf ab, die N-Aufsättigung und Entstehung von (Mikro) Bläschen möglichst gering zu halten, und zum anderen, die dennoch entstehenden Bläschen komplikationslos wieder loszuwerden, - abzuatmen. Dieses kann bereits während und auch nach dem Tauchgang geschehen. Die Entstehung von Mikroblasen beim Tauchen ist bekannt und quantitativ mit unserem Tauchverhalten gekoppelt. Die Menge der Mikroblasen ist tauchtechnisch im Wesentlichen abhängig von der Tauchtiefe der Tauchzeit dem Tauchprofil und dem Auftauchverhalten (Geschwindigkeit, Abatmungsfaktor). Das Abatmen von Stickstoff incl. Mikrogasblasen wird dabei von entsprechend langsamem Austauschen mit Tiefen- und Sicherheitsstopp deutlich begünstigt. Nach dem Tauchgang sind dann die Oberflächenpausen entscheidend (und unser sonstiges Verhalten). Natürlich rechnet ein moderner Tauchcomputer auch Risikoprofile und exzessive Wiederholungstauchgänge weiter. Und auch beim Saunagang oder heißer Dusche direkt nach dem Tauchgang rechnet unser Computer ebenfalls „seinen gewohnten Gang“ weiter. Ob die Berechnungen jedoch halbwegs stimmen, hängt zum einen von unserer individuellen physiologischen Variabilität und den sich daraus potenzierenden Fehlerquellen, von Shuntvorgängen, aber eben auch von unserem jeweiligen Verhalten vor, während und nach dem Tauchen ab.

Wir sollten im eigenen Interesse unser Verhalten beim Tauchen darauf abstellen, die unserem Einfluss unterliegenden Risikofaktoren – nach dem heutigen Wissensstand – so gering wie möglich zu halten und möglichst nicht zu akkumulieren. Es werden sich in der Zukunft weitere und möglicherweise auch andere Erkenntnisse ergeben. Eine vollständige Sicherheit kann es auch beim Tauchsport nicht geben, dennoch - oder gerade deswegen - sollten die folgenden aktuellen Sicherheitsregeln berücksichtigt werden.

Allgemeine Maßnahmen:

- Große Tauchtiefen vermeiden bzw. Aufenthaltszeit dort verringern** (wer größere Tiefen mit langen Tauchzeiten aufsuchen möchte, sollte auf alternative Gasgemische des Technischen Tauchens wechseln)
- Jojetauchverhalten vermeiden** (auch im Flachbereich)
- Das Tauchverhalten den jeweiligen aktuellen Bedingungen anpassen** (z.B. viele TG in kurzer Zeit → Tiefe reduzieren; Tauchpausen einlegen)
- Kälte oder Anstrengungen unter Wasser beachten** (Zeitzuschlag bzw. Tabellenzuschlag)
- Anstrengungen und Wärmeanwendung, insbesondere nach dem TG unterlassen** (mindestens 90 bis 120 min warten)
- Oberflächenpause von minimal 90 min einhalten**

Neuere Tauchregeln:

- Tiefenstopps (20-40m Tauchtiefe, 2,5 min. auf halber maximaler Tauchtiefe)**
→ wird z.Zt. noch diskutiert
- Max. Auftauchgeschwindigkeit einhalten** (Druckhalbierung pro 2 min, siehe Tabelle)
Vereinfachung: → Aufstieg bis 10m Tiefe mit 10m/min, nach Computer (*ab 25 m Tiefe idealerweise verlangsamt*)
→ Von 10m bis 5m Tiefe mit 5 m/min (*also minimal in einer Minute*)
→ Von 5m zur Oberfläche innerhalb 2 min (*oder länger*)
- Aufenthalt im Flachbereich zum Ende des TG generell verlängern** (10-5 m Bereich)
- Sicherheitsstopp von 3 min auf 5 m** (obligatorisch)
- Die Auftauchzeit für die letzten 5 m auf 2 min ausdehnen**

In diesem Sinne, allen viele schöne und vor allem sichere Tauchgänge
Lothar Apke