

# Die neuesten Forschungsergebnisse zu Dekompressionskrankheit (DCI) und Tauchphysiologie (Teil 1)

Stickstoffbläschen, die bei Tauchern die sogenannte Dekompressionskrankheit (DCS) hervorrufen, kennt jeder Taucher. Das Gas, das diese Bläschen bildet, gewöhnlicherweise Stickstoff, ist reaktionsträge. DCS ist ein bekanntes Gesundheitsrisiko bei Tauchern. Bei nur leichtem Schweregrad kann es Hautjuckreiz oder Gelenkschmerzen hervorrufen, bei schwereren Ausprägungen kann es jedoch lebenslange Lähmung verursachen oder sogar zum Tod führen. Wenn ein reaktionsträges Gas wie Stickstoff unter zunehmendem Umgebungsdruck in den verschiedenen Körpergeweben einen bestimmten Sättigungsgrad erreicht hat und zu schnell dekomprimiert wird, können zirkulierende oder aus den Geweben ausgasende Gasbläschen entstehen, die wiederum Blutgefäße, besonders kleinere Kapillargefäße, im menschlichen Körper "verstopfen" bzw. blockieren können. Wenn dies im Gehirn, Rückenmark oder im Herz geschieht, können die Folgen gravierend oder sogar katastrophal sein. Bessere Aufklärung und Vorbeugung spielen eine zentrale Rolle bei der Vermeidung dieser Art von Risiken und der Therapie der möglichen Folgen. Im Jahr 2009 rief eine Gruppe aus 14 engagierten Wissenschaftlern ein Projekt ins Leben, das PHYPODE (PHYsioPathology Of Decompression) getauft wurde. Gefördert wurde es von der Europäischen Union unter der Marie Curie Initial Training Networks-Initiative und hatte das Ziel, DCS über seine reinen physikalischen Prozesse hinaus zu untersuchen.

Heute, nach 4 Jahren, ist das Projekt abgeschlossen. Um die Forschungsergebnisse der Öffentlichkeit vorzustellen, hat DAN (Divers Alert Network Europe) am 20. Dezember 2014 die sogenannte Konferenz "The Science of Diving" im ISEK in Brüssel (Belgien) durchgeführt.

## Die Grundannahmen der Wissenschaftler

Weil einige DCS-Fälle scheinbar unverschuldet ohne offensichtlichen Protokollverstoß auftreten und nicht durch reine Übersättigung des Gewebes zu erklären sind, wird angenommen, dass die gegenwärtigen Dekompressionsmodelle, die bei gängigen Tauchcomputern Anwendung finden, nicht sicher genug sind und überarbeitet werden müssen. Eine Grundannahme ist, dass DCS kein rein physikalisches Ereignis, sondern vielmehr ein komplexer patho-physiologischer Prozess ist, der durch mehrere Faktoren, die überdies von Person zu Person variieren können, beeinflusst und/oder getriggert werden kann. Dies führt zu der Annahme, dass jeder Taucher ein ganz individuelles Risiko für eine DCS besitzt. Aufgrund dessen wird sich die zukünftige Forschung in diesem Bereich der Entwicklung fortschrittlicherer Echtzeittauchtechnologie widmen. Ziel soll idealerweise die Entwicklung und Herstellung eines "Super-Tauchcomputers" mit neuem Algorithmus und der Fähigkeit zur Echtzeitüberwachung medizinischer Daten eines Tauchers vor, während und nach einem Tauchgang sein. Der Taucher der Zukunft wird also eine Art "Bionischer Taucher" sein.

## Die Vorträge der Wissenschaftler

Es bedurfte eines multifaktoriellen Ansatzes, um die vielen physiologischen Faktoren und Mechanismen besser zu verstehen. Jegliche Art von Forschung in diesem Bereich, die zur Wissenserweiterung über die exakten Mechanismen und Prozesse einer DCS-Entwicklung beiträgt, ist ein wertvoller Schritt in Richtung Förderung der Tauchsicherheit, wie es schon seit jeher Bestandteil der Mission von DAN war. Deswegen hat DAN im Jahr 1994 das DSL (Diving Safety Laboratory) ins Leben gerufen. Ziel des DSL war und ist die Aufzeichnung von möglichst vielen Daten realer Tauchgänge, einschließlich realer Tauchunfälle. Unter der

Leitung von Professor A. Marroni, Präsident von DAN Europe und einem der führenden Wissenschaftler von PHYPODE, wurden diese Daten unter einem epidemiologischen Ansatz ausgewertet, um so die Risikofaktoren und ihre Marker identifizieren zu können.

Im Jahr 2014 waren in der DSL-Datenbank 39.944 Tauchgänge von 2.615 Tauchern gespeichert (2.176 Männer und 439 Frauen in einem Durchschnittsalter von 33-51 Jahren).

Mittels der Doppler-Ultraschalltechnik wurde die Bläschenbildung in den Blutgefäßen bestimmt. Die Wissenschaftler konnten damit beweisen, dass die Bläschen 30 bis 75 Minuten nach dem Auftauchen auftraten, ihre Produktion nach 1,5 Stunden deutlich abnahm. Die Forscher fanden heraus, dass die Bläschenbildung mit zunehmendem Alter verstärkt auftrat, jedoch nicht mit dem Geschlecht korrelierte.

Ebenfalls vorgestellt wurden neue interessante Forschungsergebnisse im Zusammenhang mit **Fliegen nach dem Tauchen**. Im Flug durchgeführte Echokardiographie-Messungen an Tauchern, die von einer einwöchigen Tauchreise zurückkehrten, zeigten, dass Taucher mit der Neigung nach ihren Tauchgängen hochgradig Bläschen zu bilden, nach ihrem letzten Tauchgang bevor sie ihren Flug antreten möglicherweise länger warten müssen (36 - 48 Stunden statt nur 24 Stunden).

Hinsichtlich anderer Risiken im Zusammenhang mit Tauchen gibt es gute Nachrichten für die **Diabetiker unter den Tauchern**. Und zwar ermöglicht die jüngste Entwicklung neuer Technologien die kontinuierliche Überwachung des Blutzuckers (BG) während des Tauchens. Getestet wurde dies mittels wasserdichter Monitore mit an der Innenseite des Tauchanzuges platzierten Sensoren.

Die Forschung bezüglich **induzierter Lungenödeme bei Freedivern** ergab Erkenntnisse über eine genetische Prädisposition (Veranlagung), die Einfluss auf die DCS bei Gerätetauchern haben könnte. Mehreren kürzlich durchgeführten Studien zufolge produzieren bestimmte Genotypen ein Enzym, das e-NOS heißt und die Bildung von Glutaminsäure anstelle von Asparaginsäure katalysiert. Dies führt zu einer höheren Produktion von Stickoxid (NO), welches wiederum vermutlich eine schützende Wirkung gegen DCS hat.

Grundsätzlich wissen wir viel über **Bläschen**. Der genaue Mechanismus der Bläschenbildung ist bis vor kurzem jedoch noch ziemlich unklar gewesen. C. Balestra, Vollzeit-Professor und Leiter des Laboratoriums für Integrative Physiologie an der Haute-Ecole Paul Henri Spaak in Brüssel, Belgien, führte unter den Bedingungen der hyperbaren Dekompression Untersuchungen zur Bläschenbildung durch. Er untersuchte die Bildung von Stickstoffbläschen im Gefäßsystem von Tauchern nach dem Gerätetauchen sowie die damit verbundenen interaktiven physikalischen und physiologischen Prozesse. Um das Bläschenwachstum und die Bläschendichte sichtbar zu machen sowie den genauen Bildungsmechanismus im Detail untersuchen zu können, benutzte Balestra einen experimentellen Aufbau zur optischen Aufzeichnung. Dabei untersuchte er die Oberflächen zweier verschiedener Gewebetypen: hydrophile und hydrophobe bzw. Muskel- und Fettgewebe. Was er fand waren signifikant mehr Bläschen am Fettgewebe (hydrophob) als im Vergleich dazu am Muskelgewebe (hydrophil). Balestra nahm an, dass dies im Zusammenhang mit den sogenannten hydrophoben Nukleinstellen steht, an denen sich die Bläschen bilden können. Das Alter scheint einen Einfluss bei der Ausbreitung dieser hydrophoben Stellen im Gefäßsystem des Menschen zu haben. Dies erklärt möglicherweise das altersbedingte erhöhte Risiko für DCS, aber auch das erhöhte Risiko, an Erkrankungen wie Alzheimer, entzündlichen Darmerkrankungen, Allergien, Diabetes und Krebs zu erkranken. Diese hydrophoben Stellen an der inneren Wand der Blutgefäße, an denen sich eine sogenannte Gasphase bilden kann, sind daher von weitreichender, interdisziplinärer Wichtigkeit. Möglicherweise kommen die Forschungsergebnisse dieses Projektes auch Patienten mit anderen Krankheiten und nicht nur den Tauchern zugute.

Peter Germonpré (Medizinischer Direktor am Zentrum für Hyperbare Sauerstofftherapie am Militärkrankenhaus von Brüssel in Belgien) hob die Wichtigkeit des sogenannten **Preconditioning (Vorbehandlung, Präkonditionierung)** hervor. Dabei handelt es sich um Maßnahmen, die jeder Taucher selbst in der Hand hat, um sein DCS-Risiko gering zu halten. Insgesamt nimmt man zwei mögliche Bläschen-reduzierende Mechanismen an: einen biochemischen Mechanismus, d.h. die Einflussnahme auf die oxidative Entzündungsreaktion, die durch das Auftreten von Dekompressionsbläschen induziert wird, und einen mechanischen Mechanismus, d.h. die Senkung der Anzahl von Bläschen-“Kondensationskeimen” in den Blutgefäßen. Um die Anzahl der Bläschen zu vermindern, empfiehlt sich vor dem Tauchen: Fitnesstraining, Hitze/Wärme, Hydrierung (ausreichend geeignete Flüssigkeit trinken), das Atmen von Sauerstoff, Vibration und der Verzehr von antioxidanten Nahrungsmitteln.

Die venöse oder vaskuläre Gasembolie (**VGE**) ist seit jeher als Ursache von und Anzeichen für DCS bekannt. Je mehr Bläschen sich im Blut befinden, um so wahrscheinlicher stellten sich Symptome einer DCS ein. Wie zuvor beschrieben bilden sich Bläschen an hydrophoben Nukleinstellen auf der Oberfläche der Innenseite der Blutgefäße. Demzufolge kann man sein DCS-Risiko dadurch verringern, dass man seine Blutgefäße durch geeigneten Lebenswandel in Schuss und sich selbst fit hält.

Grundsätzlich werden durch **Fitnesstraining/Sport** die Atmung und Kreislauf in Schwung gebracht, wodurch Bläschen “ausgeschüttelt” werden. Hitzestress produziert die Bildung von Heat-Protection-Proteinen (Hitzeschutzproteinen), die möglicherweise die Bläschenbildung verhindern. Ausreichende **Hydrierung** hat bekanntermaßen einen präventiven Effekt. Dabei ist allerdings darauf zu achten, dass mit der Hydrierung bereits einige Zeit vor dem Tauchgang begonnen werden muss, damit das Wasser die Gewebe im Körper rechtzeitig erreichen kann. Direkt vor dem Tauchgang eine große Menge Wasser “herunterzustürzen” ist nicht ratsam und hilft auch nicht; es bewirkt eher das Gegenteil, da es nur das Flüssigkeitsvolumen in den Gefäßen erhöht, was zu einem plötzlichen Flüssigkeitsverlust noch während des Tauchgangs führt und somit sogar das DCS-Risiko noch erhöhen kann. Vor dem Tauchgang durchgeführte ganzkörperliche, äußere mechanische **Vibration** vermindert das DCS-Risiko – möglicherweise durch das “Ausschütteln” von bereits bestehenden Mikrobbläschen. Das erklärt, warum manche Tauchbasen den Weg zu den Tauchplätzen mit einer schnellen Bootsfahrt verbinden. Nichtsdestoweniger übernimmt aber auch unser Lymphsystem mittels lymphatischer Drainage eine wichtige Rolle bei der Entfernung der bläschenbildenden Mikronuklei. Dies wird zudem durch Vibration vor dem Tauchgang verstärkt. Und nicht zuletzt ist das Atmen von 100%igem **Sauerstoff** vor dem Tauchen eine effektive Methode, die kleinen Stickstoff-Bläschenkerne aus seinem Körper zu entfernen.

Es ist also durchaus so, dass vor dem Tauchen durchgeführtes leichtes Fitnesstraining einen schützenden Effekt hat. **Starke körperliche Belastung** in Kombination mit Tauchen ist jedoch ein Hauptrisikofaktor bei der Entwicklung von DCS, und zwar aufgrund der entzündlichen Wirkung, die dabei auf die Blutgefäße ausgeübt wird. Die Wirkung verschiedener Fitnesstrainings-Intensitäten vor, nach und zwischen den Tauchgängen wurde von Z. Dujic von der Medizinischen Fakultät der Universität Split in Kroatien näher untersucht.

Fitnesstraining bzw. Sport nach dem Tauchen kann eine Arterialisierung venöser Gasbläschen hervorrufen – das Öffnen Kurzschlüssen – und dadurch die Passage von Bläschen vom venösen ins arterielle Blut ermöglichen. Dies ist ein Phänomen, das auch als “Shunting” oder “Shunts” bekannt ist und mit einem erhöhten relativen DCS-Risiko verbunden ist. Diese Arterialisierung ist von Mensch zu Mensch verschieden. Bei manchen Menschen kann bereits einfaches Schwimmen an der Wasseroberfläche oder das Tragen der Ausrüstung nach dem Tauchen intensiv genug sein, um die Schwelle zu überschreiten und die Arterialisierung auszulösen.

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Arterialisierung während des Fitnesstrainings/Sports durch das Einatmen von 100% O<sub>2</sub> vermeidbar ist. O<sub>2</sub> ist ein Vasokonstriktor und kann Shunts schließen. Dies erklärt

möglicherweise auch den den positiven Effekt bei der Atmung von 100 % O<sub>2</sub> als Erste-Hilfe-Maßnahme nach DCS.

In zwei Vergleichsstudien hatte aerobes Lauftraining und anaerobes Radtraining (Cycling) vor dem Tauchen eine schützende Wirkung und reduzierte die Zahl der Mikropartikel (d.h. die Kondensationskeime für die Bläschenbildung). Fitnesstraining bzw. Sport nach dem Tauchen führte jedoch zu offenen Shunts und daher in 50% der Fälle eine Arterialisierung. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Taucher, die "hochgradige Bläschenbildner" (high-grade bubblers) und "schnelle Shunter" (easy shunters) sind, einem sehr hohen individuellen DCS-Risiko ausgesetzt sind.

Weitere interessante Forschungsergebnisse wie zum Beispiel die Bedeutung im Detail, die das Gefäßendothel in Zusammenhang mit DCS spielt, Sauerstofftoxizität und das Konzept des "Bionischen Tauchers" werden im zweiten Teil des Artikels vorgestellt, der in der nächsten Ausgabe von Alert Diver zu lesen sein wird.

---

## Vorgestellte Publikation

### **"The Science of Diving, Things your instructor never told you"**

Veröffentlicht wurde dieses Buch von Lambert Academic Publishing. Käuflich zu erwerben ist es online [hier](#) oder kann in jedem Buchladen über seine ISBN-Nummer 978-3-659-66233-1 bestellt werden. Das Buch kostet 49.90 €. Alle Autorenhonorare aus dem Verkauf dieses Buches fließen zur weiteren Förderung der Tauchmedizinforschung als Spende an die EUBS.

### **Fortbildungsmöglichkeiten: ein Vorteil der DAN-Mitgliedschaft**

DAN-Mitglieder erhalten regelmäßig Informationen über und Einladungen zu interessanten Konferenzen, Seminaren und Veranstaltungen, die zum Schwerpunkt das Thema Tauchsicherheit haben. Ermäßigte Eintrittspreise oder die freie Teilnahme an diesen Veranstaltungen ist nur einer der vielen [DAN-Mitgliedervorteile](#).

Wer über Veranstaltungen ähnlich der PHYPODE-Konferenz von uns auf dem Laufenden gehalten werden möchte, [registriere sich bitte auf der DAN Europe-Webseite](#). Unser Newsletter informiert dann regelmäßig über wertvolle Informationen zu Erste-Hilfe-Trainingsmöglichkeiten, Tauchversicherungspläne, Online-Webinare und zahlreiche andere Dinge oder Aktivitäten.