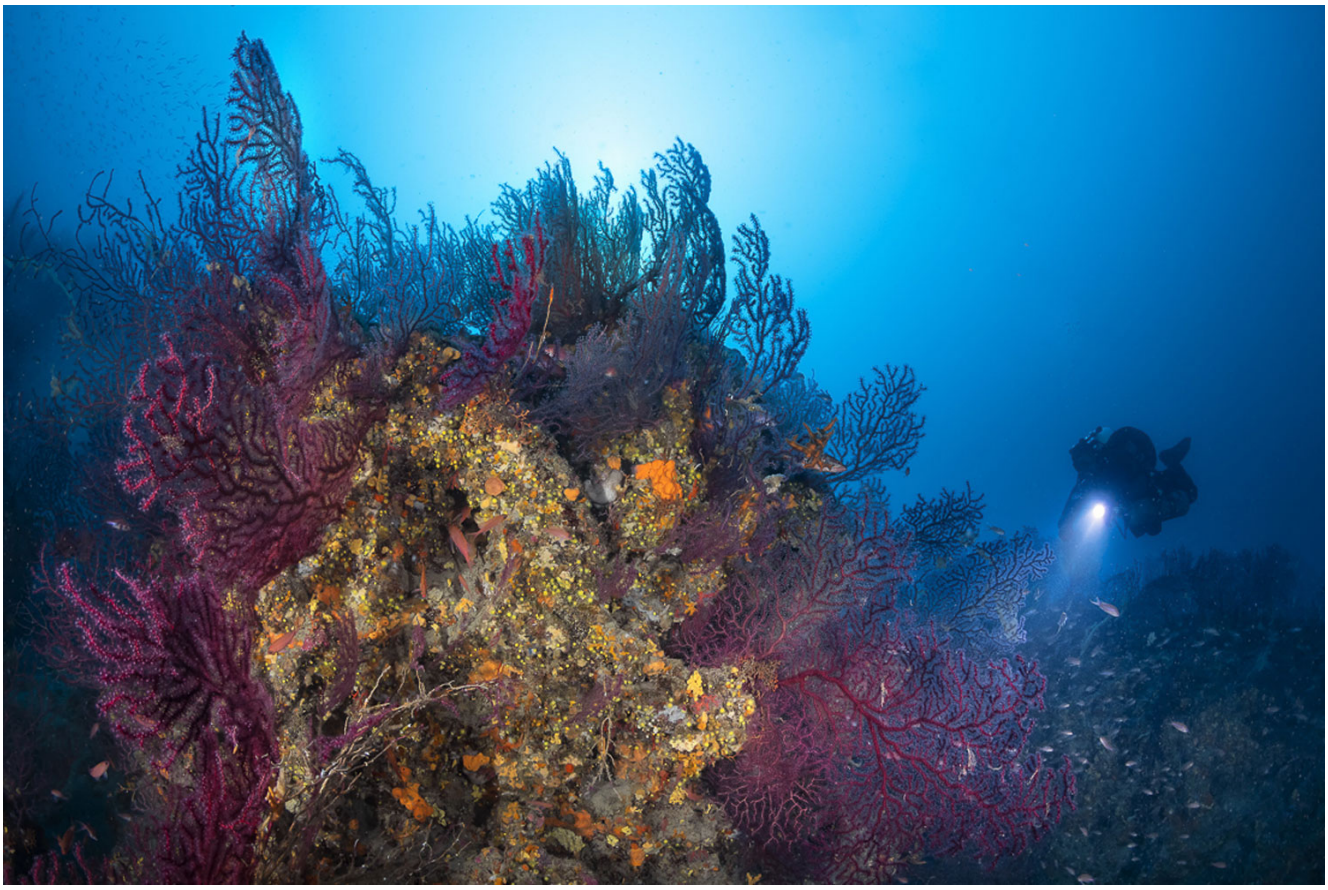
Messverfahren für Inertgas-Narkose

Jacques Cousteau beschrieb sie poetisch als „Tiefenrausch“, und unser Verständnis der genauen Wirkmechanismen befindet sich noch in der Entwicklung. Sicher ist jedoch, dass die Inertgas-Narkose (IGN) in punkto Tauchsicherheit zu den wichtigsten Risikofaktoren zählt. Bei Sporttauchern kommt IGN jedenfalls erheblich häufiger vor als Dekompressionskrankheit (DCI). Obschon Taucher nachweislich keine Toleranz für Narkose entwickeln, können sie trotzdem lernen, mit ihr umzugehen – mit unterschiedlichem Erfolg.

In der Pionierzeit des Tauchens war die Stickstoffnarkose der wesentliche Faktor bei der Festlegung der maximalen Tauchtiefe auf 30 bis 40 Meter. Wer tiefer tauchte, tat dies auf eigene Gefahr. Heutzutage ermöglicht uns der Einsatz von Mischgasen, das operative Risiko der IGN auf einfache Weise zu begrenzen.



In den Fragen, wie viel Narkose noch vertretbar ist, in welchem Umfang Taucher den Umgang mit ihr erlernen können, und ob Sauerstoff zum narkotischen Potential eines Atemgases beiträgt, gibt es jedoch weiterhin Meinungsverschiedenheiten. Daher bestehen **im Bereich des Sporttauchens deutliche Unterschiede in der Praxis der einzelnen Verbände**.

Eine große Herausforderung bei der Erforschung der IGN ist das Fehlen einer objektiven, zuverlässigen Messgröße. Die Einschätzung subjektiver Symptome durch die Taucher selbst hat sich als unzuverlässig erwiesen, und herkömmliche psychologische Tests sind unter Wasser häufig schwer durchführbar.

Im Verlauf des vergangenen Jahrzehnts haben Forscher von DAN Europe jedoch eine Reihe Studien veröffentlicht, in denen die Tauglichkeit eines neuen Werkzeugs zur Messung der so genannten Flimmerverschmelzungsfrequenz (FVF) untersucht wird. Die FVF ist als mögliches objektives Maß der IGN vielversprechend und relativ einfach anzuwenden.

Dieser Artikel konzentriert sich auf zwei Veröffentlichungen, die überraschende neue Einblicke in die Thematik der IGN bieten. Die erste Studie, veröffentlicht 2016 unter dem Titel „Do Environmental Conditions Contribute to Narcosis Onset and Symptom Severity?“ untersucht die Auswirkungen unterschiedlicher hyperbarischer Umgebungen auf die IGN und kommt zu dem Schluss, dass Druck und Atemgas die einzigen externen Einflussfaktoren sein könnten. Ein weiterer Befund ist, dass die GN nach einer kurzen Phase erhöhter geistiger Schärfe während des Abstiegs einsetzt und ihre Auswirkungen bis mindestens 30 Minuten nach Ende des Tauchgangs anhalten.

Die zweite Untersuchung, „Early detection of diving-related cognitive impairment of different nitrogen-oxygen gas mixtures using critical flicker fusion frequency“, vergleicht die IGN bei Tauchgängen mit Luft bzw. Nitrox als Atemgas, und zwar sowohl anhand der FVF als auch mittels herkömmlicher psychologischer Tests. Sie kommt zu dem Schluss, dass höhere Sauerstoff-Partialdrücke ein starker Einflussfaktor für die Auswirkungen der IGN sein können.

Flimmerverschmelzung – das Wichtigste in Kürze

Die Flimmerverschmelzungsfrequenz (FVF) ist die Frequenz, bei der ein flimmerndes Licht als stetig wahrgenommen wird. Die FVF wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts als Mittel zur Erforschung der Physiologie des Sehens entwickelt und etablierte sich im Laufe der Zeit zu einem wichtigen Werkzeug zur Messung geistiger Aufmerksamkeit und Schärfe unter verschiedensten Bedingungen, zu denen unter anderem pathologische Störungen, Anästhesie, und berufliche Belastungen in der Luftfahrt zählen.



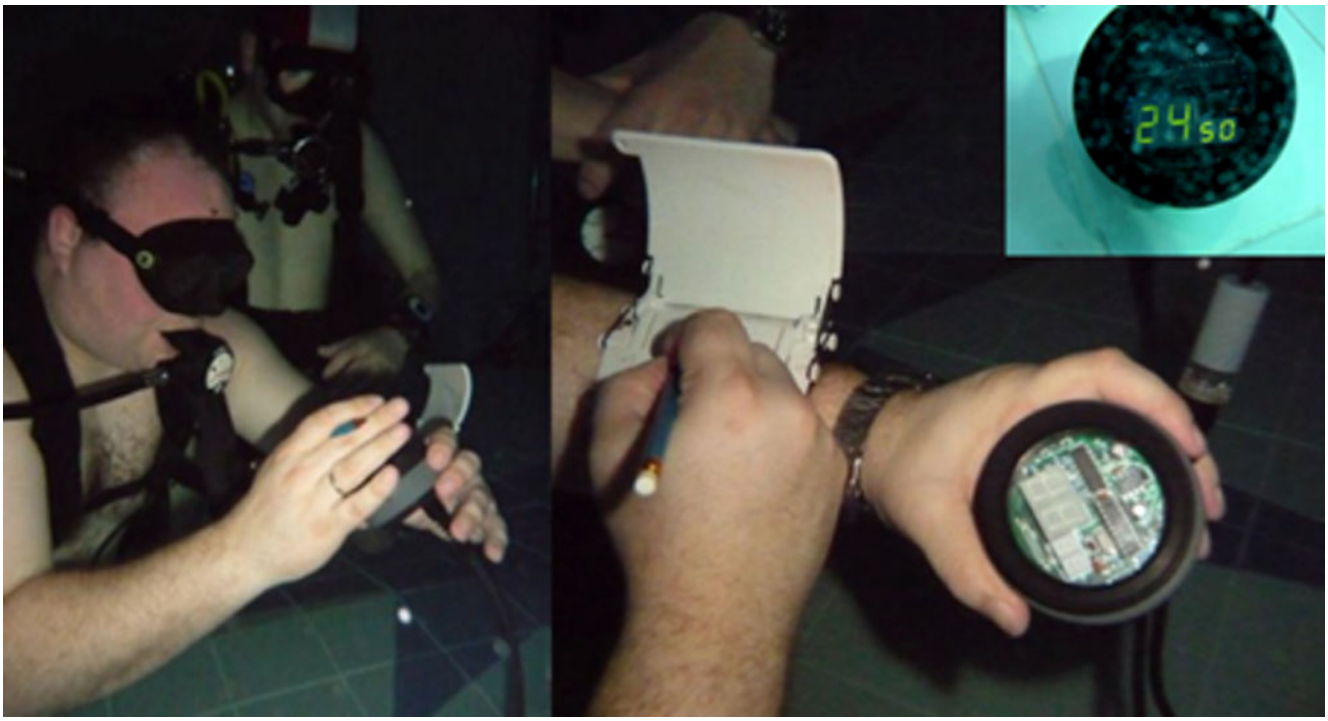
Wenn die kognitiven Funktionen einer Versuchsperson einschränkt sind oder nachlassen, sinkt auch die Frequenz, bei der das Flimmern aufzuhören scheint – die so genannte Fusionsfrequenz. In Phasen erhöhter geistiger Aufmerksamkeit hingegen steigt die Fusionsfrequenz. Da die Wahrnehmung von Flimmerfrequenzen individuell unterschiedlich ist, wird für jede Versuchsperson zunächst ein

Ausgangswert (100%) ermittelt und die FVF als Prozentsatz dieser Ausgangsfrequenz angegeben.

Dr. Peter Bennett, der Gründer von DAN USA, war 1960 der Erste, der auf den Zusammenhang zwischen dem Geisteszustand von Tauchern, der FVF, und mit einem EEG (Elektro-Enzephalogramm) gemessenen Hirnströmen hinwies. Eine weitere Untersuchung fand, dass beim Sättigungstauchen mit Heliox als Atemgas die Änderung der FVF in etwa parallel zu den Veränderungen im EEG verläuft. Dieses Ergebnis stellte sich jedoch als nicht replizierbar heraus, und die Verwendung der FVF wurde nach und nach aufgeben.

In den letzten Jahren haben Forscher von DAN diese obskure Messgröße wiederbelebt, mit vielversprechenden Ergebnissen. Sie zeigten, dass die FVF unter Wasser zuverlässig gemessen werden kann (2012) und bei Umgebungsdruck und mit Luft als Atemgas (2014) für die Bewertung der kognitiven Funktionen von Tauchern ähnliche Ergebnisse liefert wie bestimmte Tests aus der Psychology Experiment Building Language (PEBL).

FVF-Messungen sind unter Wasser generell einfacher durchzuführen als PEBL-Tests, und Vieles spricht dafür, dass der Einfluss der Versuchsperson geringer ist. Zur Messung wird ein kleines, zylinderförmiges Gerät mit einer blauen LED und einem Drehring verwendet, welcher die Flimmerfrequenz ändert. Der Taucher blickt bei dem Test direkt in die LED. Anschließend erhöht oder senkt der Untersuchende die Flimmerfrequenz. Wenn der Taucher einen Übergang des LED-Lichts von Flimmern zu stetigem Leuchten wahrnimmt, wird der Test beendet und die Fusionsfrequenz festgehalten. Anschließend werden die Ergebnisse mit der vor dem Tauchgang gemessenen Ausgangs-FVF der Versuchsperson verglichen. Eine Erhöhung der Fusionsfrequenz wird als Erhöhung der kognitiven Funktion interpretiert, während niedrigere Werte als Anzeichen von IGN gewertet werden.

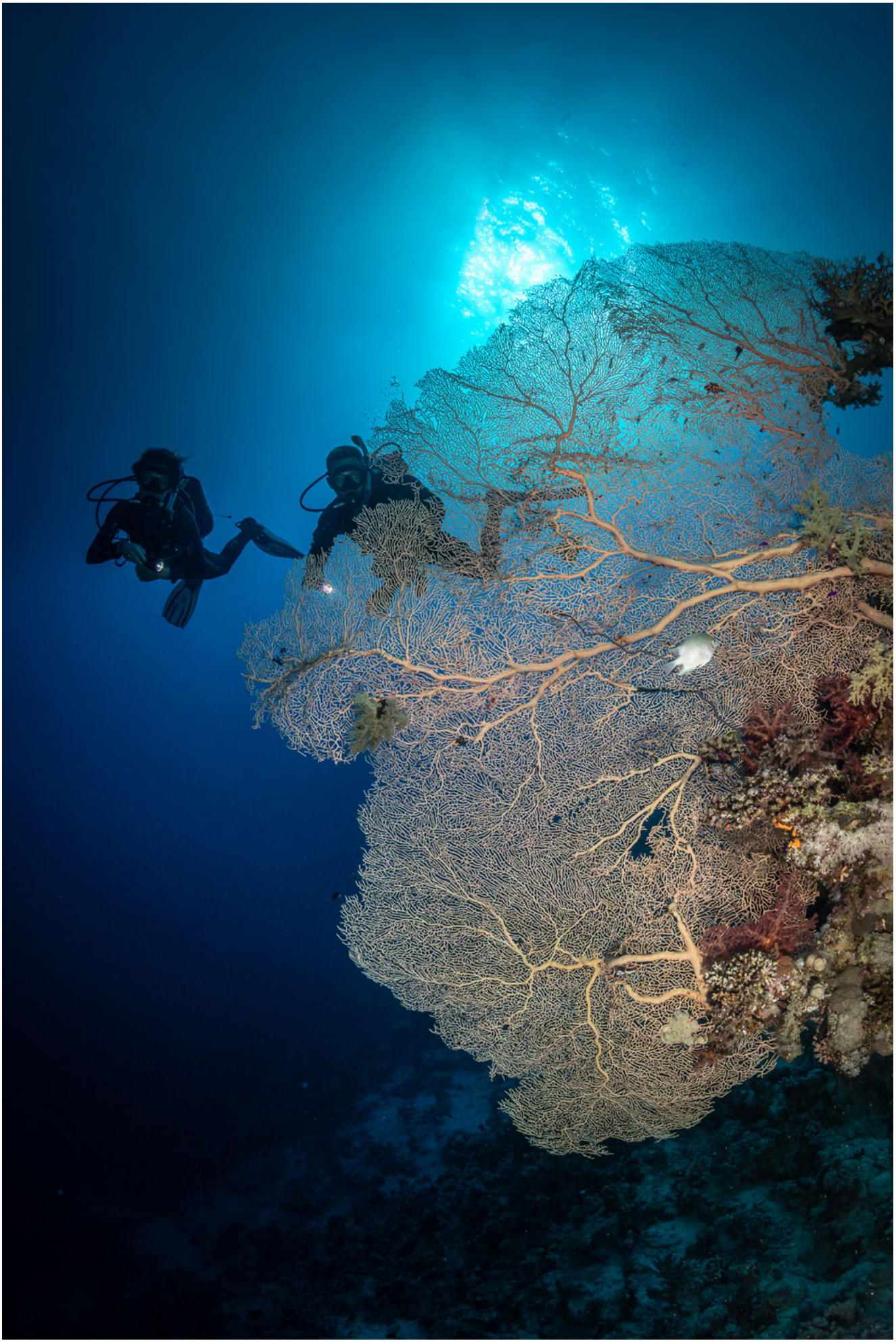


Welchen Einfluss hat die Umgebung?

Da Taucher sich an die Umgebung unter Wasser anpassen, gilt die Umgebung selbst in einer Kombination verschiedener Faktoren als wichtiger Einfluss auf die Leistungsfähigkeit. Zahlreiche Faktoren wurden als mögliche Einflüsse auf das Einsetzen und den Schweregrad der IGN vorgeschlagen.

Zu den Hauptverdächtigen zählt ein durch Anstrengung – Verrichtung von Aufgaben, Schwimmen, Atemarbeit – erhöhter Kohlendioxid-Partialdruck (PCO_2). Erhöhte PCO_2-Werte gelten als Ursache für eine Weitung der Blutgefäße im Gehirn, wodurch sich wiederum die Stickstoffbelastung im Gehirn erhöht. Kälte ist ein weiterer Kandidat: Sie verursacht eine Verengung der peripheren Blutgefäße. Da sich die Blutgefäße im Gehirn jedoch nicht verengen können, entsteht dort eine erhöhte Stickstoffbelastung.

Als weitere Einflussfaktoren für IGN kommen Alkohol-, Drogen- und Medikamentenkonsum in Frage, sowie Alkoholkater, Erschöpfung, Überforderung durch Aufgaben, Stress, schlechte Sicht, die Abstiegsgeschwindigkeit, Schwindelgefühl und Orientierungsverlust. Aus wissenschaftlicher Sicht gibt es jedoch keine sonderlich stichhaltigen Nachweise für diese Faktoren – es werden mehr Daten benötigt. Aus diesem Grund konzentrierte sich die erste Studie auf die Tauchumgebung.



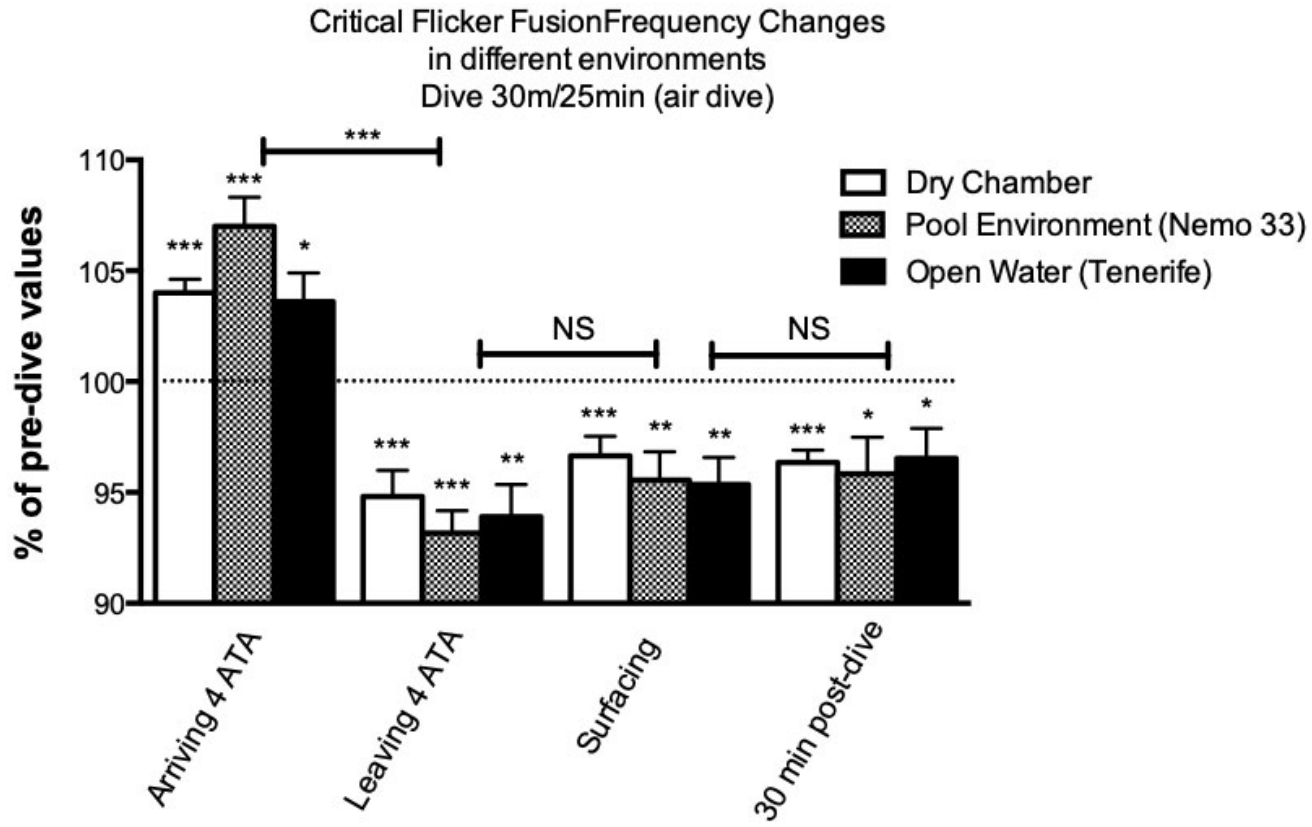
Die Forscher rekrutierten eine homogene Gruppe von 40 männlichen, nicht rauchenden Tauchern im Alter von 30-40 Jahren, die regelmäßig Sport treiben und einen Body Mass Index (BMI) von 20-25 haben. Die Taucher verzichteten für einen Zeitraum von 72 Stunden vor dem Experiment auf Alkohol.

Die Versuchstauchgänge hatten eine Tauchtiefe von 30 Metern mit 20 Minuten Grundzeit und wurden in drei verschiedenen Umgebungen durchgeführt: einer Druckkammer, dem Tiefbecken Nemo 33, und dem Meer. Die Wassertemperatur im Becken betrug 33 °C, so dass Tauchanzüge nicht erforderlich waren. Die Temperatur im Meer betrug 19 °C, und die Taucher trugen geeignete Neoprenanzüge.

Bei jedem Tauchgang wurde die FVF jedes Tauchers fünfmal gemessen, und zwar:

- Vor dem Tauchgang zur Ermittelung des Ausgangswerts
- Bei Erreichen von 30 m Tauchtiefe
- Fünf Minuten vor dem Auftauchen
- Bei Erreichen der Oberfläche
- Dreißig Minuten nach Ende des Tauchgangs

Nach Angaben der Autoren war dies das erste Mal, dass die Auswirkungen von IGN in einer standardisierten Grundgesamtheit unter verschiedenen Umgebungsbedingungen – trocken/unter Wasser, Anzug/kein Anzug, Freiwasser ohne visuelle Referenz für „Oben"/Tauchbecken – gemessen wurden. Der Befund war überraschend.



Wie Abbildung 1 zeigt, waren die Messwerte für die FVF in den unterschiedlichen Umgebungen bemerkenswert konsistent. Die FVF-Werte der Taucher stiegen bei Erreichen des Grundes zunächst an – ein Hinweis auf erhöhte kognitive Funktion. Die 15 Minuten später genommenen Messwerte lagen hingegen deutlich niedriger, was als Anzeichen einer durch IGN bedingten Verringerung der kognitiven Funktion gewertet wurde. Überraschenderweise lag diese Verringerung bei Erreichen der Oberfläche und 30 Minuten nach dem Tauchgang weiterhin vor.

Dieser Fortbestand legt nahe, dass die althergebrachte Praxis, bei Narkose einfach ein paar Meter aufzusteigen, als Gegenmaßnahme möglicherweise ungeeignet ist. Eine weitere Überraschung war der anfängliche Anstieg der FVF-Werte bei Erreichen der Tauchtiefe, der als Anzeichen erhöhter geistiger Aktivität zu werten ist.

Den Forschern zufolge sind diese Beobachtungen konsistent zur Proteintheorie der Narkose, die in jüngerer Zeit gegenüber der herkömmlichen Meyer-Overton-Theorie der Anästhesie an Boden gewonnen hat. Vermutlich sind jedoch beide Wirkmechanismen aktiv. Es wird gemeinhin angenommen, dass IGN und Anästhesie auf den gleichen Prinzipien beruhen.

Die Autoren stellen die Hypothese auf, dass die beobachtete erhöhte Hirnaktivität und ihr nachfolgenden Abfall ein Ergebnis der unmittelbaren pharmakologischen Wirkung und pharmakinetischen Interaktion von Sauerstoff und Stickstoff an den GABA-Rezeptoren sind. Sauerstoff erhöht die Aktivität der Neurotransmitter, während Stickstoff eine hemmende Wirkung hat (siehe Rostain et al. 2011; Balestra et al. 2018).

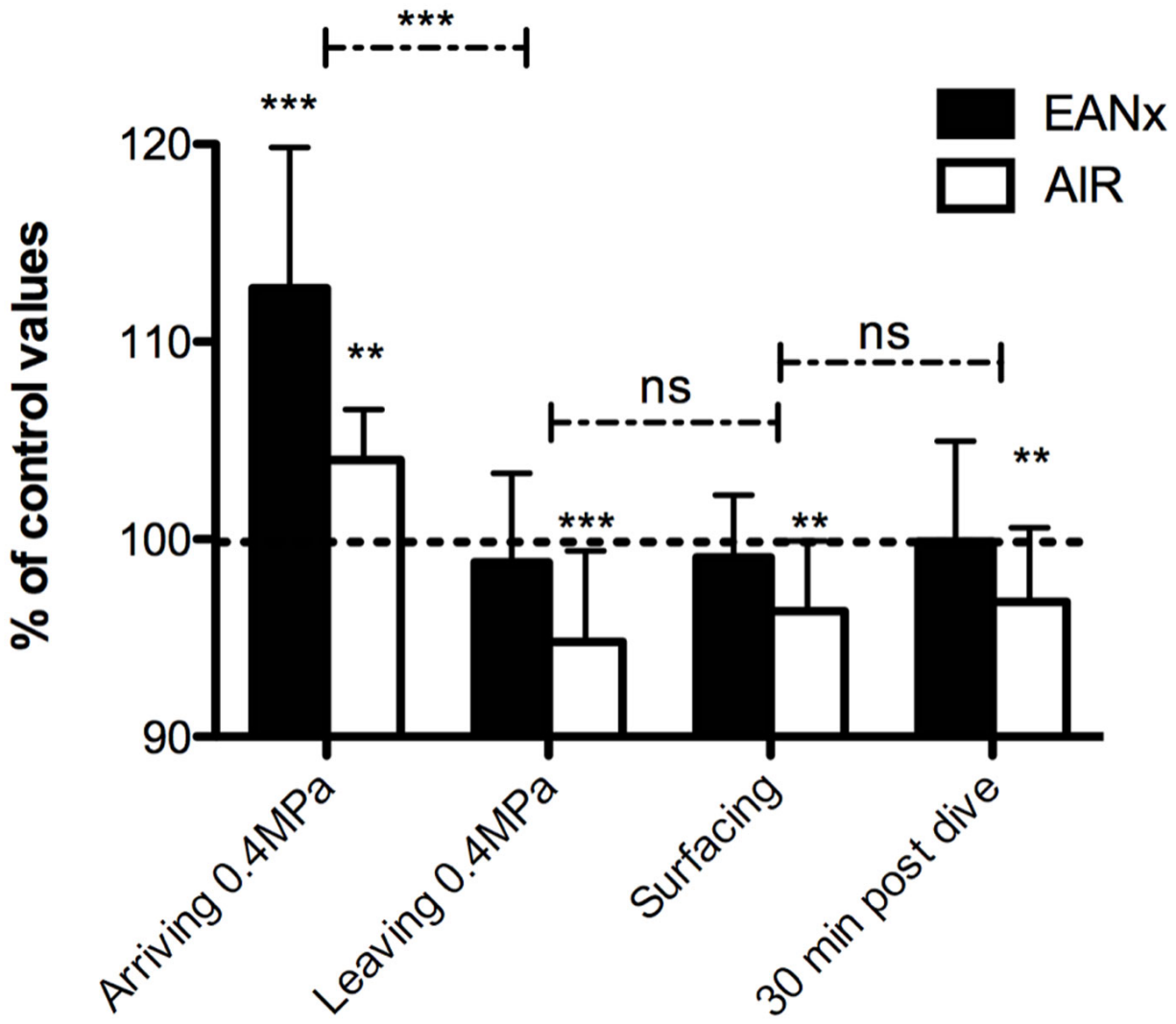
Die Autoren stellen zusammenfassend fest, dass bei objektiver Messung der Umgebungsdruck und das Atemgas die einzigen externen Einflussfaktoren für IGN sein könnten. Da in der Studie jedoch körperliche Anstrengung (d. h. erhöhte PCO_2-Werte) nicht berücksichtigt wurden, ist diese ein wahrscheinlicher weiterer kritischer Faktor.

Luft im Vergleich zu Nitrox

Es gibt nur wenige vergleichbare Studien zur narkotischen Wirkung von Luft und Nitrox als Atemgas. Einige Studien stellten bei O_2 oder Nitrox als Atemgas eine Verschlechterung der psychomotorischen Leistungsfähigkeit fest. Andere wiederum befanden, dass die Einschränkungen gleich bleiben, auch wenn Taucher dies subjektiv anders empfinden mögen. Ziel der Studie war, die kognitive Leistungsfähigkeit bei unterschiedlichen Sauerstoff-Partialdrücken sowie die Effektivität der FVF als Messgröße besser zu verstehen.

Für dieses Studie wählten die Forscher acht männliche Taucher aus, wiederum 30-40 Jahre alt und mit BMIs zwischen 20 und 25. Die Versuchstauchgänge mit Luft bzw. EANx 40 wurden in zufälliger Reihenfolge in einer trockenen Kammer durchgeführt. Die Atemgase wurden über eine Gesichtsmaske verabreicht. Das Tauchprofil war darauf ausgelegt, Narkose hervorzurufen: eine Grundzeit von 22 Minuten auf 30 m Tiefe, gefolgt von einer 12-minütigen linearen Dekompression mit einer Austauchgeschwindigkeit von 3 m/Minute und einem 3-minütigen Sicherheitsstopp auf 3 m Tiefe.

Die Messung der kognitiven Leistungsfähigkeit während der Tauchgänge erfolgte mit dem FVF-Messgerät sowie einer computergestützten Reihe von PEBL-Tests, bestehend aus Rechenaufgaben, Trail-Making (Verbinden von nummerierten Punkten durch Linien), und einem visuellen Aufmerksamkeitstest. Wie in der Studie zuvor wurden die Taucher vor dem Tauchgang, bei Erreichen von 4 atm, bei Verlassen von 4 atm, bei Erreichen der Oberfläche, und 30 Minuten nach dem Tauchgang getestet.



Wie in Abb. 2 zu sehen ist, ist der Verlauf der FVF-Messwerte sowohl für Luft als auch für Nitrox ähnlich dem der ersten Studie. Bei Verwendung von Luft als Atemgas stiegen die Werte bei Erreichen von 4 atm zunächst an und fielen 15 Minuten später ab. Die Verringerung lag bei Erreichen der Oberfläche und 30 Minuten nach dem Tauchgang weiterhin vor. Mit Nitrox als Atemgas stiegen die Werte ebenfalls bei Erreichen der Tauchtiefe an und fielen nach 15 Minuten ab. Auf den Abfall folgte jedoch eine Rückkehr zum Ausgangswert.

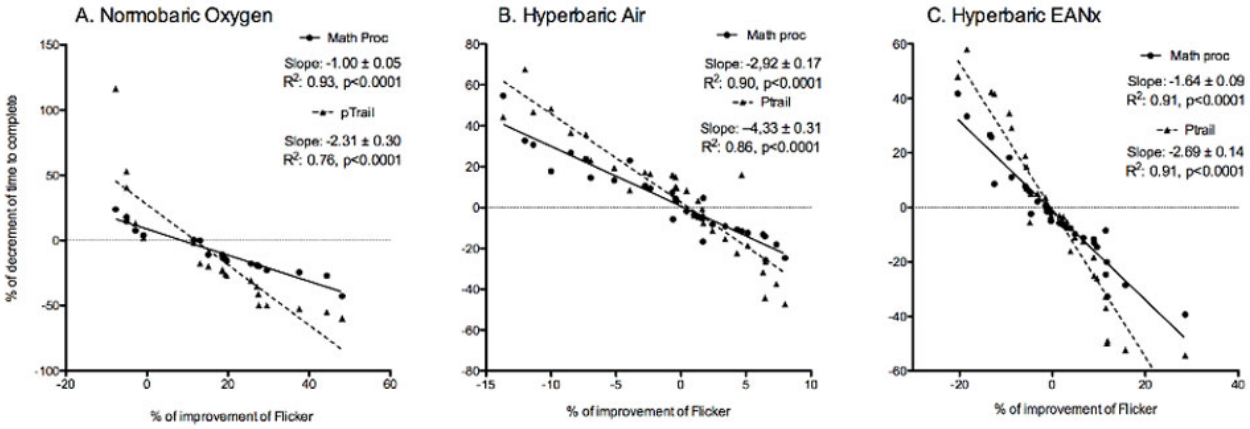


Abbildung 3 zeigt die signifikante inverse Korrelation zwischen der Änderung der FVF-Werte und der für die PEBL-Tests benötigten Zeit. Analog zum Verlauf der FVF-Werte fand bei Erreichen der Tauchtiefe bei beiden Gasen zunächst eine Verbesserung statt, gefolgt von einer Verschlechterung (längere Zeiten), die für die Dauer des Tauchgangs und 30 Minuten danach anhielt. Dies bestätigt die Validität von FVF als Messgröße in hyperbarischen Umgebungen und legt nahe, dass die Ergebnisse von FVF-Messungen mit denen von PEBL-Tests vergleichbar sind.

Druckluft ist für Reifen?

Obschon der Verlauf der Tauchgänge ein ähnliches Muster zeigte, war zwischen den zwei Gasen ein wichtiger Unterschied zu erkennen: Mit Nitrox war die Aktivierung des Hirns deutlicher als bei den Tauchgängen mit Luft, und die Einschränkungen im späteren Verlauf und nach dem Tauchgang waren geringer. Dies ist konsistent zu den Ergebnissen der ersten Studie zu den Umgebungsbedingungen.

Die Autoren stellten die Hypothese auf, dass der höhere Sauerstoffanteil im Atemgas eine positive Wirkung auf Anregungszustand und kognitive Leistungsfähigkeit hat. Dies zeigen auch andere Studien zum Atmen von Sauerstoff. Außerdem liegt die Vermutung nahe, dass Taucher, die für IGN besonders empfänglich sind, auch empfindlicher auf höhere PO_2-Werte reagieren könnten. Darüber hinaus genügte in einer früheren Studie bereits eine geringfügige Senkung des PN2, um die positive Wirkung von EANx 28 (28% Sauerstoff) auf die kognitive Leistungsfähigkeit zu zeigen.

Das Ergebnis? Die Studie verleiht dem von GUE (Global Underwater Explorers) verbreiteten Slogan „Druckluft ist für Reifen“ mehr Gewicht. Mit Nitrox erfahren Taucher weniger Narkose als mit Luft. Darüber hinaus bietet Nitrox Vorteile bei der Dekompression.

Schlüssel-Referenzen

Rocco M, Pelaia P, Di Benedetto P, Conte G, Maggi L, Fiorelli S, Mercieri M, Balestra C, De Blasi RA & Investigators RP. (2019). Inert gas narcosis in scuba diving, different gases different reactions. *Eur J Appl Physiol* 119, 247-255.

Lafere P, Hemelryck W, Germonpre P, Matity L, Guerrero F & Balestra C. (2019). Early detection of diving-related cognitive impairment of different nitrogen-oxygen gas mixtures using critical flicker fusion

frequency. *Diving Hyperb Med* 49, 119-126.

Balestra C, Machado ML, Theunissen S, Balestra A, Cialoni D, Clot C, Besnard S, Kammacher L, Delzenne J, Germonpre P & Lafere P. (2018). Critical Flicker Fusion Frequency: A Marker of Cerebral Arousal During Modified Gravitational Conditions Related to Parabolic Flights. *Front Physiol* 9, 1403.

Lafere P, Balestra C, Hemelryck W, Guerrero F & Germonpre P. (2016). Do Environmental Conditions Contribute to Narcosis Onset and Symptom Severity? *International journal of sports medicine* 37, 1124-1128.

Freiberger JJ, Derrick BJ, Natoli MJ, Akushevich I, Schinazi EA, Parker C, Stolp BW, Bennett PB, Vann RD, Dunworth SA & Moon RE. (2016). Assessment of the interaction of hyperbaric N2, CO2, and O2 on psychomotor performance in divers. *J Appl Physiol (1985)* **121,** 953-964.

Balestra C, Lafere P & Germonpre P. (2012). Persistence of critical flicker fusion frequency impairment after a 33 mfw SCUBA dive: evidence of prolonged nitrogen narcosis? *Eur J Appl Physiol* 112, 4063-4068.

Rostain, J. C., Lavoute, C., Risso, J. J., Vallee, N., and Weiss, M. (2011). A review of recent neurochemical data on inert gas narcosis. *Undersea Hyperb. Med.*38, 49–59.

Zusätzliche Ressourcen:

Die Wissenschaft des Tauchens (DAN Member's link – NON Member's link)

Über den Autor

Michael ist preisgekrönter Journalist und Technikexperte. Er schreibt schon seit Jahrzehnten über das Thema Tauchen und die Technik beim Tauchen. Er hat den Begriff “technisches Tauchen” geprägt. Seine Arbeiten sind in Veröffentlichungen wie dem Alert Diver, DIVER, Quest, Scientific American, Scuba Times, Sports Diver, Undercurrent, Undersea Journal, WIRED und X-Ray erschienen. Er ist Gründer und Chefredakteur von aquaCORPS und hat dabei geholfen, dass das technische Tauchen nun zum Mainstream des Sporttauchens zählt. Er hat außerdem die ersten Tek, EuroTek und AsiaTek Konferenzen veranstaltet.

Über den Übersetzer

Tim Blömeke ist freier Übersetzer für Wissenschaft, Technik und Recht, sowie passionierter Wrack- und Höhlentaucher. Er unterrichtet Tauchen (Sport und Tec) in Taiwan und auf den Philippinen. Man erreicht ihn am besten unter contact@indepth.ltd.