

# Die physikalisch, physiologisch und mathematisch korrekte Berechnung von EAD und END



Beat Müller  
V4 / 08.08.2022

# Die physikalisch, physiologisch und mathematisch korrekte Berechnung von EAD und END

## 1. Einleitung

Die beiden Grössen EAD (equivalent air depth) und END (equivalent NITROGEN depth oder equivalent NARCOTIC depth) sind zwei wichtige und oft benutzte Kenngrössen im Nitrox-, Heliox- und Trimix-Bereich.

### a) EAD

Die erste Kenngrösse wird verwendet, um bei Verwendung eines EANx Gemisches die Dekompression mit einer Lufttabelle durchführen zu können. Wir vergleichen also den N<sub>2</sub>-Partialdruck in unserem EANx Gemisch auf der Tauchtiefe mit einem gleich grossen Wert, der Luft auf einer anderen (geringeren) Tiefe hätte.

Je höher der O<sub>2</sub>-Anteil (und je kleiner der N<sub>2</sub> Anteil), desto kleiner wird die EAD gegenüber der tatsächlich getauchten Tiefe. Der Lohn: längere Nullzeiten, kürzere Dekozeiten. Der Preis: die Tiefenbegrenzung wegen dem O<sub>2</sub> (pO<sub>2</sub>\_max, MOD).

Noch zu beachten: die EAD kann einzig und alleine für Nitrox Gemische (O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>) berechnet werden. Für Heliox (He-O<sub>2</sub>) oder Trimix (also mit He als weiterem Inertgas) gibt es KEINE EAD. He hat ein anderes Sättigungs-/Entsättigungsverhalten als N<sub>2</sub>!

### b) END

Diese Kenngrösse sagt etwas aus über die narkotische Wirkung eines Gasgemisches *im Vergleich mit Luft*. Das kann ein Nitrox (EANx) sein, aber auch ein He-Ox oder Trimix (Tmx). Auch hier machen wir einen Vergleich mit unserem «Standardgemisch» LUFT.

Allerdings wird das Akronym «END» in zwei verschiedenen Bedeutungen verwendet:

#### 1) im Sinne von «Equivalent NITROGEN Depth»

Hier wird nur N<sub>2</sub> als narkotisch wirkendes Gas einbezogen und dessen Gehalt mit demjenigen von Luft verglichen. Das führt zwar zu einer einfachen Gleichung («Formel») zur Berechnung, ist aber physiologisch gesehen nicht korrekt. Es wäre dann eventuell akzeptierbar, wenn alle anderen Gemischanteile (O<sub>2</sub>, He) und deren narkotisches Potenzial im Vergleich zu N<sub>2</sub> vernachlässigbar klein wären.

**Haben wir gar kein N<sub>2</sub> in unserem Gemisch (Heliox), so gibt es logischerweise auch keine Equivalent Nitrogen Depth!**

#### 2) im Sinne von «Equivalent NARCOTIC Depth»

Hier werden alle narkotisch wirkenden Gase im Gemisch einbezogen, also auch O<sub>2</sub> und He (oder andere benutzte Inertgase). Wenn wir das aber tun, so müssen wir dies sowohl für das untersuchte Gemisch UND für das Referenzgas (Luft) tun! Auch Luft enthält z.B. O<sub>2</sub> (Gott sei Dank!).

#### Zum physiologischen Hintergrund:

Es ist physiologisch nachgewiesen (und die meisten unter uns haben es auch schon erlebt), dass N<sub>2</sub> (in der Luft oder generell in einem Atemgas) eine narkotische Wirkung («narkotisches Potenzial») hat. Ebenfalls Helium, wenn auch in viel geringerem Ausmass. Dort gibt es dafür als Danaergeschenk bei grossen Tiefen das HPNS (Heliumzittern, High Pressure Nervous Syndrome) und problematischer Wärmeverlust. Und zu guter Letzt eben auch Sauerstoff, aber auch hier in einem geringeren Ausmass. Es stellt sich nur die Frage: im welchem Ausmass / in Vergleich zu was?

Da zumindest in Luft der Stickstoffanteil (N<sub>2</sub>) am grössten ist, hat man sinnvollerweise dieses Gas als REFERENZ herangezogen und ihm das narkotische Potenzial 1 zugeordnet. Die narkotischen Potenziale anderer Inertgase werden also immer als Verhältnis zur Referenz N<sub>2</sub> dargestellt, sie sind also *relativ*! Hat ein Gas ein relatives narkotisches Potenzial von 2 heisst das, dass es doppelt so narkotisch wirkt wie N<sub>2</sub>. Hat ein Gas hingegen ein relatives narkotisches Potenzial von 0.2 so heisst das, dass es nur einen Fünftel so narkotisch wirkt wie N<sub>2</sub>.

## 2. Verwendete Größen zur Berechnung

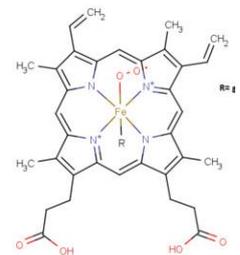
|             |   |
|-------------|---|
| psurf       | Oberflächendruck (bar)  |
| dpdT od. fp | hydrostatische Druckzunahme (bar/m); zw. 0.098...0.101 bar/m  |
| T od. T-Mix | (Tauch)-Tiefe (m) allgemein / Tauchtiefe mit Gemisch (EANx, He-Ox od. Tmx)  |
| f_O2-xxx    | (dimensionsloser) Anteil O2 im Atemgas (---); Luft, EANx, He-Ox, Tmx  |
| f_N2-xxx    | (dimensionsloser) Anteil N2 im Gesamtgemisch (---); Luft, EANx, He-Ox, Tmx  |
| f_He-xxx    | (dimensionsloser) Anteil He im Gesamtgemisch (---); Luft, EANx, He-Ox, Tmx  |
| nP_O2       | relatives narkotisches Potenzial von O2; dimensionslos, ca. 0.20...0.26   |
| nP_N2       | relatives narkotisches Potenzial von N2; dimensionslos, 1.0 (=Referenz)   |
| nP_He       | relatives narkotisches Potenzial von He; dimensionslos, ca. 0.10...0.20   |
| EAD         | equivalent air depth (m); die Tiefe, auf der man mit Luft denselben N2-Partialdruck hätte wie im benutzten EANx auf der effektiven Tauchtiefe                             |
| END         | equivalent narcotic depth (m); die Tiefe, auf der man mit Luft denselben «narkotischen Gasdruck» hätte wie im benutzten EANx oder Tmx auf der effektiven Tauchtiefe T-Mix |
| EADD        | equivalent air density depth (m): Tiefe, auf welcher Luft dieselbe Dichte hat wie das Atemgasgemisch auf T-Mix  |

## 3. Ein Wort zum *relativen* narkotischen Potenzial von O2 und He

Merke: Man kann das narkotische Potenzial eines Gases nicht mit einer «Formel» berechnen, obwohl es dazu immer wieder – nicht von Erfolg gekrönte - Versuche gegeben hat (meist basierend auf der Löslichkeit in Lipiden, also Meyer-Overton, s. unten)! Man nimmt deshalb Luft, resp. N2 als Referenzgas und vergleicht die anderen Gase mit dieser Referenz. Es handelt sich also immer um *relative* narkotische Potenziale.

**In unzähligen Unterrichtshilfsmitteln und Laienforen wird nun das narkotische Potenzial von O2 ebenfalls gleich 1 (wie für N2) gesetzt. Dies ist – höflich gesagt – physiologischer Unsinn.**

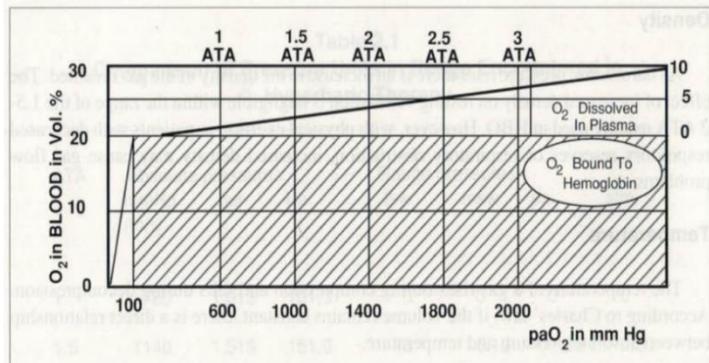
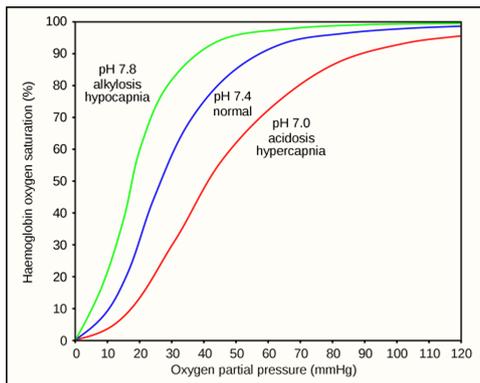
Es wird dabei auch immer mit der Meyer-Overton Hypothese argumentiert (das narkotische Potenzial eines Gases sei proportional zur Löslichkeit dieses Gases in Lipiden, also die Fettlöslichkeit, s. dazu Anhang 1. Die Betreffenden sollten sich besser einmal mit der Blutchemie auseinandersetzen: das O2 im Blut ist zuerst einmal als HbO2 (Oxyhämoglobin) chemisch an das Hämoglobin (Hauptprotein der Erythrozyten) gebunden, und zwar an das 2-wertige Eisenatom. Bei Vollsättigung sind das in vivo bei 1 g Hämoglobin ca. 1.34 ml O<sub>2</sub> (Hüfner-Zahl). Es kann in dieser Form also nichts zum pO<sub>2</sub> (Partialdruck) im Blut beitragen. Zudem wird O<sub>2</sub> laufend vom Körper metabolisiert.



Erst bei relativ hohen pO<sub>2</sub> auf der alveolären Seite – quasi, wenn alles Hämoglobin mit O<sub>2</sub>-Molekülen «besetzt» ist - geht der «überschüssige» Teil in das Blutplasma über und trägt zum pO<sub>2</sub> bei. Und es ist auch nur dieses im Plasma gelöste O<sub>2</sub>, zudem nach Abzug des laufenden Verbrauchs, welcher im Körper zum narkotischen Effekt beitragen kann, sich z.B. an den Synapsen anlagern kann. Dies ist erst ab einem pO<sub>2</sub> von 2 bar und höher der Fall. Dies sind aber pO<sub>2</sub>, in deren Nähe kein einziger Tec-Taucher je kommt, resp. kommen sollte, s. Graphiken unten und **Anhang 2**, sowie **Anhang 5**).

**Und deshalb stimmt die Meyer-Overton Hypothese für O2 eben NICHT.**

Man schaue sich dazu einmal die O<sub>2</sub>-Dissoziationskurve des Blutes an, dann wird das soeben Gesagte (hoffentlich) sofort einleuchten (s. dazu auch Anhang 2).



Aus dem 2. Diagramm (rechts) kann man schlussfolgern, dass es erst ab einem pO<sub>2</sub> von 1.5....1.6 bar überhaupt genügend O<sub>2</sub> in gelöster Form im Plasma hat, damit eine spürbare narkotische Wirkung möglich sein könnte. Im Umkehrschluss könnte man auch sagen, dass man sich im Bereich Tek-Tauchen so gut wie nie oberhalb dieses Bereiches bewegt, der Effekt also vernachlässigt werden kann.

*Eine Einschränkung dieser Feststellung gibt es: damit chemisch gebundenes O<sub>2</sub> von einem Organ «verbraucht» werden kann, muss es zuerst aus der Bindung herausgelöst werden, um in gelöster Form für die metabolischen Prozesse zur Verfügung zu stehen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass es dann in dieser Phase eine gewisse narkotische Wirkung entfaltet. Aber eben in sehr viel geringerem Ausmass.*

Nicht erst heute kommt man in der Wissenschaft deshalb zum Schluss, dass die relative narkotische Potenz von O<sub>2</sub> im Bereich 0.20....0.26 (im Vergleich zu N<sub>2</sub>) liegt. Es sei auf die einschlägigen wissenschaftlichen Publikationen verwiesen (und ausdrücklich NICHT auf einschlägige Laienforen!), s. dazu auch Pkt. 9 (Literatur) sowie Anhänge 3 und 4. Denn hier sind nicht Meinungen und Glauben gefragt, sondern wissenschaftlich untersuchte und belegbare Fakten!

Dass He eine sehr kleine relative narkotische Potenz (im Vergleich zu N<sub>2</sub>) hat, ist seit über 50 Jahren hinreichend bekannt und wissenschaftlich erforscht. Sie dürfte im Bereich von 0.1....0.20 (im Vergleich zu N<sub>2</sub>) liegen. Anwendungen: s. Off-Shore Taucherei. Auch hier stimmt also die Meyer-Overton Hypothese nicht ganz: He hat erwiesenermassen eine geringere relative narkotische Potenz gegenüber N<sub>2</sub> (ca. 1:10, also ca. 0.10...0.15), als dass dies der Vergleich der Lipid-Löslichkeiten (ca. 1: 4.5, also 0.222) ergeben würde. Bei Extrem-Tieftauchversuchen im 700m Bereich hat man dann sogar auf Wasserstoff zugegriffen.

#### 4. Physikalische Grundlagen zu den Berechnungen

Es gilt allgemein:  $p_{tot}(T) = p_{surf} + dpdT * T$

aber auch:  $p_{tot}(\text{Gasgemisch}) = \text{Summe}(p_{\text{Einzelgase im Gemisch}})$  nach dem Gesetz von Dalton

sowie:  $p_{\text{Einzelgas}} = p_{tot} * f_{\text{Einzelgas}}$

Ferner gilt unter Vernachlässigung der Spurengase:

- a) bei EANx:  $f_{O_2} + f_{N_2} = 1$
- b) bei He-Ox:  $f_{O_2} + f_{He} = 1$
- c) bei Tmx:  $f_{O_2} + f_{He} + f_{N_2} = 1$

#### 5. Berechnung der EAD

Dies sollte jeder Absolvent eines akzeptablen Nitrox 1 Kurses im Schlaf berechnen können (sollte....). Der Vollständigkeit halber zeigen wir hier auch die mathematische Herleitung auf.

Wir suchen diejenige Tiefe (=EAD) auf der Luft denselben pN<sub>2</sub> hat wie unser Gemisch auf der reellen Tauchtiefe T-Mix .

$$p_{N_2}\text{-Luft (EAD)} = (p_{surf} + dpdT * EAD) * f_{N_2}\text{-Luft} = p_{N_2}\text{-Mix (T-Mix)} = (p_{surf} + dpdT * T\text{-Mix}) * f_{N_2}\text{-Mix}$$

also:

$$(p_{surf} + dpdT * EAD) * f_{N_2}\text{-Luft} = (p_{surf} + dpdT * T\text{-Mix}) * f_{N_2}\text{-Mix}$$

Aufgelöst nach der Unbekannten EAD:

Daraus resultiert:

$$EAD = \left( \frac{(p_{surf} + dpdT * T\text{-Mix}) * f_{N_2}\text{-Mix}}{f_{N_2}\text{-Luft}} - p_{surf} \right) / dpdT \quad \text{Gl. 1}$$

Einheitenkontrolle:

$$EAD [m] = \left( \frac{[bar] + [bar/m] * [m]}{[1]} - [bar] \right) / [bar/m] = [m] \quad \text{q.e.d!}$$

Dies ist die einzige physikalisch-mathematisch korrekte UND allgemeingültige Gleichung zur Berechnung der EAD eines EANx-Gemisches.

Eine EAD kann ausschliesslich nur für EANx-Gemisch gerechnet werden, also mit N2 als einzigem Inertgas im Gemisch!

**Zahlenbeispiel:**

Gas: EAN36

f<sub>O2-Mix</sub> = 0.36

f<sub>N2-Mix</sub> = 0.64

f<sub>N2-Luft</sub> = 0.791

psurf = 1.000 bar (ca. Meereshöhe)

d<sub>p</sub>dT = 0.10 bar/m

T-Mix (effekt. Tauchtiefe) = 30m

$$EAD_{(EAN36, 30m)} [m] = \left( \frac{(1.000 \text{ bar} + 0.10 \text{ bar/m} * 30 \text{ m}) * 0.64}{0.791} - 1.000 \text{ bar} \right) / 0.10 \text{ bar/m} = \underline{\underline{22.4m}}$$

**Damit könnten wir nun mit einer Deko-Tabelle für Luft arbeiten (fiktive Tauchtiefe, eben die EAD = 24m, statt 30m wie bei Luft).**

Natürlich gilt der Gebrauch von Tabellen als mega-out und anachronistisch. Aber wie war das doch gleich mit Mr. Murphy und der blinkenden Meldung «low bat» auf dem Computer-Display auf 40m?

## 6. Berechnung der END

Hier geht es jetzt nicht mehr um die Dekompression, sondern einzig und alleine um die **narkotische Wirkung** unseres Atemgases.

**Der Autor musste bei der Durchsicht von Dutzenden von Unterrichtsunterlagen der verschiedensten Verbände mit Bedauern feststellen, dass die meisten hier fehlerhaft waren, sogar in wikipedia!**

Das hat sowohl physikalische/physiologische, aber auch mathematische Gründe.

Meist wird zur Berechnung der END bei EANx-Gemischen folgende Gleichung benutzt (wobei O2 oft «vergessen» wird):

$$END = \left( p_{tot} (T-Mix) * \frac{(n_{P\_O2} * f_{O2-Mix} + n_{P\_N2} * f_{N2-Mix})}{f_{N2-Luft}} - p_{surf} \right) / d_{p}d_{T} \quad \text{Gl. 2}$$

### a) physiologisch/physikalischer Fehler

Als Erstes muss man feststellen, dass diese Gleichung nur für EANx mit N2 als einzigem Inertgas gelten kann, nicht aber für He, da jeglicher Term dazu fehlt. Das ist schon mal ein Mangel.

Zudem wird «der Einfachheit halber» oder wohl mehr wegen fehlendem Fachwissen in der obigen Gleichung  $n_{P\_O2} * f_{O2-Mix} + n_{P\_N2} * f_{N2-Mix} = 1$  gesetzt, quasi so als würde der Atemgasmix nur aus N2 bestehen. Damit haben wir im Zähler des Bruchs immer 1, d.h. den Totaldruck.

Das ist Unsinn, weil damit auch impliziert wird, dass die narkotischen Potenziale von O2 UND von N2 jeweils 1 betragen, was im Falle von O2 eben überhaupt nicht stimmt.

Kommt dazu, dass der Wert von f<sub>N2-Luft</sub> im Nenner immer kleiner als 1 sein muss, damit muss zwangsläufig der Kehrwert grösser als 1 sein....

Numerisch bedeutet dies nichts anderes, als dass die so berechnete END immer zu gross ist. Man könnte nun argumentieren, dass dies ja niemandem schaden würde, man bliebe damit eher auf der sicheren Seite.

Das ist nicht ganz von der Hand zu weisen, allerdings wäre es oberpeinlich, wenn zufälligerweise unter den Kursteilnehmern ein Physiologe oder Physiker sein sollte, der dann den Instruktor mit einem Lächeln auf den

berühmten Stockzähnen darauf aufmerksam macht, dass der von ihm vermittelte Stoff fehlerhaft sei. Denn dies könnte ja auch in einem anderen Bereich so sein....Vom Vertrauensverlust in die Fachkompetenz des Instructors oder gar in die von ihm repräsentierte Ausbildungsorganisation wollen wir gar nicht erst sprechen.

### b) mathematischer Fehler

Es kommt noch ein weiterer Grund mathematischer Art dazu: Oberhalb des Bruchstrichs (also im Zähler) in obiger Gleichung steht eigentlich nichts anderes als der gesamte «narkotische» Gasdruck des EANx- (oder ggf. He-Ox- oder Tmx-Mix) auf der Tauchtiefe (T, T-Mix). Diesen möchten wir vergleichen mit dem «narkotischen» Gasdruck von Luft als Referenzgas.

Unter dem Bruchstrich (also im Nenner) steht aber nur  $f_{N2\_Luft}$ . Der Bruch sollte aber – wie oben ausgeführt - nichts anderes darstellen als das VERHAELTNIS zwischen den «narkotischen» Gasdrücken von EANx-, He-Ox-, oder Tmx-Gemisch (Zähler, oben) und Luft (Nenner, s. Gl. 8b unten).

Genau dies erreichen wir mit obiger Gleichung *eben nicht*, da wir ja wissen, dass Luft auch O2 enthält, welches ebenfalls narkotisch wirkt, d.h. im Nenner des Bruchs müsste deshalb derselbe Ausdruck stehen wie im Zähler, allerdings für Luft!

**Wir vergleichen also Äpfel mit Birnen, die obige Gleichung ist schon mal per se mathematisch falsch, zumindest dann, wenn auch O2 korrekt miteinbezogen werden soll!**

Den mathematischen Beweis liefern wir gleich weiter unten. Ein kleines numerisches Beispiel vorerst, sozusagen die Nagelprobe und als Appetizer, kann dies aber schon mal verdeutlichen.

**Wir sind uns sicher darüber einig, dass bei der Verwendung von LUFT dessen END immer identisch sein muss mit der effektiven Tauchtiefe. Wir nehmen bei der Berechnung der END ja Luft als Referenz, ergo kann per definitionem die END von Luft nie grösser sein als die effektive Tiefe....**

Mit dem folgenden numerischen Beispiel können wir das verdeutlichen, noch nicht aber beweisen (ein Beweis kann nur mathematisch, nicht numerisch geführt werden!):

*Wir machen mit Luft einen TG auf irgendeiner Tiefe, z.B. 40m, und berechnen nach obiger Gleichung 2 die END, sogar unter Verwendung der wirklichkeitsnahen narkotischen Potenziale:*

$$p_{surf} = 1 \text{ bar}, dpdT = 0.10 \text{ bar/m}$$

$$\rightarrow p_{tot} (40m) = 5 \text{ bar}$$

Mix = Luft:

$$f_{O2-Mix} = f_{O2-Luft} = 0.209$$

$$f_{N2-Mix} = f_{N2-Luft} = 0.791$$

$$nP_{O2} = 0.23$$

$$nP_{N2} = 1$$

$$\text{Damit erhalten wir: } \text{END (Luft, 40m)} = \left( 5 * \frac{(0.23 * 0.209 + 1 * 0.791)}{0.791} - 1 \right) / 0.10 = \text{43 m} \\ \text{=====}$$

Noch absurder wird das Resultat, wenn wir  $nP_{O2} = 1$  setzen:

$$\text{Damit erhalten wir: } \text{END (Luft, 40m)} = \left( 5 * \frac{(1 * 0.209 + 1 * 0.791)}{0.791} - 1 \right) / 0.10 = \text{53.2 m} \\ \text{=====}$$

**Genau das darf aber nicht sein! Luft kann als Referenzgas per Definition NIE eine grössere END haben als die effektive (tatsächliche) Tauchtiefe! Kurz und gut: diese «Formel» (Gl. 2) ist zur Berechnung der Equivalent NARCOTIC Depth schlichtweg FALSCH. Punkt!**

### c) mathematisch korrekte Herleitung

Konkret suchen wir diejenige Tiefe, auf der bei Luftatmung derselbe «narkotische Druck» im Atemgas herrscht wie auf der effektiven Tauchtiefe mit Atmung eines EANx-, He-Ox- oder Tmx-Gemisches.

Diese Grösse (eben die END) ist eine wichtige Vergleichsgrösse, denn wir wissen, dass bei Luftatmung ab ca. 30-40m mit Symptomen der N2-Narkose gerechnet werden muss. Wir sollten also bestrebt sein, mit der END unseres Gemisches diesen Bereich nicht zu überschreiten.

Dies wird durch Ersatz des N2 mit He erreicht, da He bekannterweise eine relative narkotische Potenz hat, die etwa 6-10-mal (oder noch mehr!) kleiner ist als die von N2. Und damit sind wir dann bei He-Ox oder Trimix (Tmx) gelandet. Gleichzeitig, sozusagen als «Abfallprodukt», erhalten wir auch eine wesentliche geringere Atemgasdichte. Dies ist bei CCR und auch bei OC in grösseren Tiefen enorm wichtig!

Wie unter Pkt. 4 ausgeführt, lässt sich der Totaldruck eines Gasgemisches als Summe der Partialdrücke der darin enthaltenen Einzelgase berechnen (Gesetz von Dalton).

Bei Tmx also:  $p_{tot} = p_{O2} + p_{He} + p_{N2}$  oder auch:  $p_{tot} = p_{tot} * (f_{O2} + f_{He} + f_{N2})$  Gl. 3

Der «narkotische Gasdruck» wird nur von denjenigen Gasen im Gemisch ausgeübt, welche auch über ein - unter sich jeweils verschiedenes - «narkotisches Potenzial» verfügen.

Wir drücken diesen Druck in Relation zum Totaldruck aus. Damit können wir für Tmx schreiben:

$p_{narc-Tmx} = p_{tot} * f_{narc-Tmx} = p_{tot} * (n_{P_{O2}} * f_{O2-Tmx} + n_{P_{He}} * f_{He-Tmx} + n_{P_{N2}} * f_{N2-Tmx})$  Gl. 4a

Für Luft hingegen:

$p_{narc-Luft} = p_{tot} * f_{narc-Luft} = p_{tot} * (n_{P_{O2}} * f_{O2-Luft} + n_{P_{N2}} * f_{N2-Luft})$  Gl. 4b

Nun suchen wir diejenige Tiefe (END), auf der bei Luft und unserem Gemisch (auf der effektiven Tauchtiefe T-Mix) der «narkotische Gasdruck» (und damit die Wirkung) gleich gross ist, resp. sein sollte:

$p_{narc-Luft} (END) = p_{narc-Mix} (T-Mix)$  Gl. 5a

also:

$$p_{tot} (END) * (n_{P_{O2}} * f_{O2-Luft} + n_{P_{N2}} * f_{N2-Luft}) = p_{tot} (T-Mix) * (n_{P_{O2}} * f_{O2-Mix} + n_{P_{He}} * f_{He-Mix} + n_{P_{N2}} * f_{N2-Mix})$$
 Gl. 5b

Mit  $p_{tot} (END) = p_{surf} + dpdT * END$  und  $p_{tot} (T-Mix) = p_{surf} + dpdT * T-Mix$  Gl. 6

eingesetzt in Gl. 5b:

$$[p_{surf} + dpdT * END] * (n_{P_{O2}} * f_{O2-Luft} + n_{P_{N2}} * f_{N2-Luft}) = [p_{surf} + dpdT * T-Mix] * (n_{P_{O2}} * f_{O2-Mix} + n_{P_{He}} * f_{He-Mix} + n_{P_{N2}} * f_{N2-Mix})$$
 Gl. 7

Nach ausmultiplizieren und umstellen nach der Unbekannten END ergibt sich:

$$END = ((p_{surf} + dpdT * T-Mix) * (n_{P_{O2}} * f_{O2-Mix} + n_{P_{He}} * f_{He-Mix} + n_{P_{N2}} * f_{N2-Mix}) / (n_{P_{O2}} * f_{O2-Luft} + n_{P_{N2}} * f_{N2-Luft}) - p_{surf}) / dpdT$$
 Gl. 8a

noch etwas anders gergestellt:

$$END = \left( \frac{(n_{P_{O2}} * f_{O2-Mix} + n_{P_{He}} * f_{He-Mix} + n_{P_{N2}} * f_{N2-Mix})}{(n_{P_{O2}} * f_{O2-Luft} + n_{P_{N2}} * f_{N2-Luft})} - p_{surf} \right) / dpdT$$
Gl. 8b

Der Nenner des Bruchs ist sogar eine fixe Zahl, welche unveränderbar ist und im Voraus berechnet werden kann: bei  $n_{P_{O2}}=0.20$ : **0.8328** / bei  $n_{P_{O2}}=0.23$ : **0.8391** / bei  $n_{P_{O2}}=0.26$ : **0.8453**.

Einheitenkontrolle: 
$$END [m] = \left( \frac{([\text{bar}] + [\text{bar}/m] * [m]) * ([1] * [1] + [1] * [1] + [1] * [1])}{([1] * [1] + [1] * [1])} - [\text{bar}] \right) / [\text{bar}/m] = [m] \quad \text{q.e.d.}$$

Wir machen noch kurz die Nagelprobe: falls unser **Mix = Luft** ist, ist der Zähler exakt gleich wie der Nenner, der Bruch wird also 1:

$$\begin{aligned} \text{Damit gilt: } \text{END (Luft, T-Mix)} &= \left( \frac{\text{ptot(T-Mix)} * \frac{(nP_{O2} * 0.209 + nP_{N2} * 0.791)}{(nP_{O2} * 0.209 + nP_{N2} * 0.791)} - \text{psurf}}{1} \right) / \text{dpdT} && \begin{array}{l} \leftarrow \text{Mix} \\ \leftarrow \text{Luft} \end{array} \\ &= \left( \text{ptot(T-Mix)} * \mathbf{1} - \text{psurf} \right) / \text{dpdT} && (\rightarrow \text{s. Gl. 6}) \\ &= \mathbf{\text{T-Mix q.e.d.}} \\ &==== \end{aligned}$$

**Mit anderen Worten, für Luft als Mix gilt : END = T-Mix, genau wie es auch sein sollte!**

Zur Veranschaulichung eines weiteren plausiblen Resultates rechnen wir das folgende reale Beispiel: **300m TG** von Hannes Keller unter medizinischer Leitung von Prof. Dr. A.A. Bühlmann anno 1962 im Freiwasser vor Catalina Islands (USA).

psurf = 1 bar; dpdT = 0.100 bar/m; ptot<sub>300m</sub> = 31 bar;  
 f<sub>O2-Mix</sub> = 3% (0.03) → pO2-Mix = 0.93 bar  
 f<sub>N2-Mix</sub> = 2% (0.02) → pHe-Mix = 29.45 bar  
 f<sub>He-Mix</sub> = 95% (0.95)  
 f<sub>O2-Luft</sub> = 0.209  
 f<sub>N2-Luft</sub> = 0.791  
 nP<sub>O2</sub> = 0.23...**0.26**  
 nP<sub>He</sub> = 0.10...**0.15**  
 nP<sub>N2</sub> = 1

$$\text{END (Tmx3/95/2, 300m)} = \left( 31 * \frac{(0.23*0.03 + 0.10*0.95 + 1*0.02)}{(0.23*0.209 + 1*0.791)} - 1 \right) / 0.10 = \mathbf{35.0 \text{ m}} \\ \text{=====}$$

Selbst mit den oberen Werten in **ROT** ergibt sich:

$$\text{END (Tmx3/95/2, 300m)} = \left( 31 * \frac{(\mathbf{0.26*0.03} + \mathbf{0.15*0.95} + 1*0.02)}{(\mathbf{0.26*0.209} + 1*0.791)} - 1 \right) / 0.10 = \mathbf{52.5 \text{ m}} \\ \text{=====}$$

**Die korrekte Gleichung (8b) ergibt also sehr vernünftige Resultate!**

## 7. Abschätzung der Einflussgröße der Gaskomponenten

Zum Schluss wollen wir noch eine Abschätzung darüber machen, welchen Einfluss die einzelnen Gaskomponenten auf das Endergebnis haben. Dies ist in erster Linie natürlich abhängig vom Anteil des betreffenden Gases im Gemisch und erst in zweiter Linie von dessen narkotischen Potenzial.

Wir nehmen dazu den folgenden Tauchgang:

T-Mix = 90m

psurf = 1.000 bar (Meereshöhe); dpdT = 0.100 bar/m

→ ptot (T-Mix) = 10 bar

Gemisch: **Tmx13/70/17** → Dichte<sub>90m</sub> = 5.24 g/l, EADD = 30.5m → OK!

f<sub>O2-Mix</sub> = 0.13 → p<sub>O2</sub> (90m) = 1.30 bar

nP<sub>O2</sub> = **0, 0.23, 1.0**

f<sub>He-Mix</sub> = 0.70 → p<sub>He</sub> (90m) = 7.00 bar

nP<sub>He</sub> = **0, 0.10, 0.22**

f<sub>N2-Mix</sub> = 0.17 → p<sub>N2</sub> (90m) = 1.70 bar

nP<sub>N2</sub> = 1.0 (unverändert, da Referenz)

Die Ergebnisse sind rechts in der Tabelle dargestellt (→ Details s. Anhang 6).

Es zeigt sich doch eine grosse Variabilität, welche von ca. **11.5m**, falls O2 UND He vernachlässigt werden, bis zu ca. **40.9m**, wenn für O2 und He die gängigen nP-Maximalwerte zugrunde gelegt werden.

| END [m]     |      | nP_O2 [---] |             |      |
|-------------|------|-------------|-------------|------|
|             |      | 0.00        | 0.23        | 1.00 |
| nP_He [---] | 0.00 | 11.5        | 13.8        | 20.0 |
|             | 0.10 | 20.3        | <b>22.2</b> | 33.3 |
|             | 0.22 | 31.0        | 32.2        | 40.9 |

Es ist also durchaus **NICHT** so, dass man die Frage «berücksichtige ich O2 und He oder nicht?» einfach mit einem Schulterzucken abtun könnte.

**Auch die oft gehörte Behauptung auf Laienforen, man könne zumindest He sowieso vergessen, entbehrt jeglicher fachlichen Grundlage:**

**Der Einfluss von He macht bei unserem 90m TG immerhin 20m in der END aus, dies ist kein Pappenstein, wenn es um die Zusammenstellung eines adäquaten Gasgemisches geht!**

Nicht verwunderlich: das Resultat mit den nach heutigen Kenntnissen wahrscheinlichsten Gaswerten bezüglich ihrem relativen narkotischen Potenzial liegt etwa in der Mitte (ca. 22m).

## 8. Schlussfolgerungen

Es wurde nachgewiesen, dass die von den meisten Organisationen verwendete Gleichung («Formel») für die **END** im Sinne von «**Equivalent NARCOTIC Depth**» dann nicht korrekt ist, falls das relative narkotische Potenzial von O2 (oder weiterer narkotisch wirkender Gase wie He) auch miteinbezogen werden soll! Wird hingegen nur N2 betrachtet, also die «equivalent NITROGEN depth» berechnet, stimmt sie. Sie ist dann allerdings identisch mit der EAD (da ja das relative narkotische Potenzial von N2 als Referenzgrösse = 1 ist!).

**Jedoch ist der alleinige Einbezug von N2 physiologisch NICHT korrekt, wenn es um die narkotische Wirkung geht!**

Wie die ausgewählten wissenschaftlichen Artikel im Anhang zeigen und in den unter Pkt. 9 (Literatur) aufgelisteten wissenschaftlichen Arbeiten zu lesen ist, ist sich die Forschung auch heute noch nicht ganz einig über die Höhe des narkotischen Potenzials von O2. **Sicher ist hingegen, dass es nicht gleich gross ist wie dasjenige von N2, sondern – falls überhaupt im Sporttaucherbereich von Bedeutung – wesentlich kleiner. An dieser Erkenntnis ist nicht zu rütteln.**

Auch ist es eine gesicherte wissenschaftliche Erkenntnis, dass der Grund dazu a) in der Bindung an das Hämoglobin und b) in der laufenden Metabolisierung des O2 liegt. **Und als wissenschaftlich gesichert darf auch gelten, dass deshalb hier die Hypothese von Meyer-Overton auf O2 nicht 1:1 anwendbar ist.**

Bei den Ausbildungsorganisationen herrscht eine grosse Vielfalt – *um nicht zu sagen ein Chaos* – was die Bewertung des narkotischen Potenzials von O2 angeht. Sie gehen von Null bis 1 (relativ zu N2). **Man gelangt allerdings rasch zur Überzeugung, dass dies mehr mit Verbandspolitik und fehlendem Fachwissen, als mit Physiologie zu tun hat.**

Ob nP\_O2 nun 0.20 oder 0.26 ist und nP\_He nun 0.10 oder 0.15, sei dahingestellt und ist letztlich für die Sicherheit des Tauchers ohne überragende Bedeutung. Dass es im Falle von O2 aber garantiert NICHT 1 sein kann, lässt sich mit der O2-Dissoziationskurve sehr gut zeigen.

**Es bleibt zu hoffen, dass die hier angesprochenen Ausbildungsorganisationen ihre Ausbildungsmittel auf den aktuellen Stand bringen und zumindest die grössten Fehler korrigieren. Es sollte doch möglich sein, dass wir alle unseren Kursteilnehmern eine physikalisch, physiologisch und mathematisch korrekte Theorie vermitteln, ohne sie gleich zu Physiologen ausbilden zu müssen.**

Es ist auf Grund der nun wirklich sehr einfachen mathematischen Herleitung doch erstaunlich, dass die meisten aller dieser Nitrox- und Trimix-Instruktoren den z.T. fehlerbehafteten Stoff, *ohne zu hinterfragen*, seit Jahren einfach bloss wiedergeben....

Gerade im sog. Tec-Bereich sind eben nicht nur Gasmischungen gefragt, sondern vielmehr auch der Kopf zusammen mit viel technischem, physikalischem und physiologischem Fachwissen.

Beat Müller  
MSc. Mech. Eng. ETH  
09.08.2022

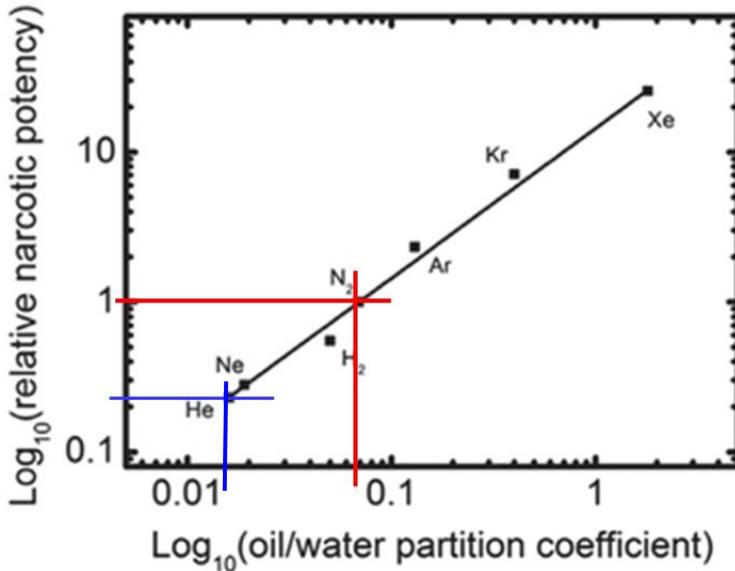
## 9. Literatur

- 1) Donald Voet • Judith G. Voet • Charlotte W. Pratt  
Protein Function: Myoglobin and Hemoglobin; Fundamentals of Biochemistry, Second Edition, Chapter 7; John Wiley & Sons, Inc., 2006
- 2) P. Bennett / S.Mitchell: Nitrogen Narcosis, Oxygen Narcosis and the High Pressure Nervous Syndrome, University of Auckland, New Zealand
- 3) J.M. Hesser, L. Fagraeus, J. Adolfsen: Roles of Nitrogen, Oxygen, and Carbon Dioxide in compressed-air Narcosis; Undersea Biomedical Research, Vol. 5, No. 4, Dec. 1978
- 4) N. Bitterman: Oxygen Toxicity; Isreal Institute of Technology, Haifa, Israel
- 5) J.C. Rostain, N. Ballon : Recent neurochemical basis of inert gas narcosis and pressure effects / UHM 2006, Vol. 33, No. 3 –5
- 6) Bennett PB, Rostain JC.: Inert gas narcosis. In : Brubakk A.O. T.S. Neuman (eds). Bennett and Elliott's physiology and medicine of diving. London; W.B. Saunders Company Ltd., 2003: 300-322.
- 7) Xavier C. E. Vrijdag, Hanna van Waart, Chris Sames, 2 Simon J. Mitchell, and Jamie W. Sleight: Does hyperbaric oxygen cause narcosis or hyperexcitability? A quantitative EEG analysis / *Physiol Rep.* 2022 Jul; 10(14): e15386.
- 8) Linnarsson, D., Ostlund, A., Sporrang, A., Lind, F., Hesser, C. M., & Hamilton, R. W., Jr. (1990): Does oxygen contribute to the narcotic action of hyperbaric air? / North Palm Beach, FL: Rubicon Foundation. [Abstract from the annual meeting of the Undersea and Hyperbaric Medical Society]
- 9) Fowler, B., Ackles, K. N., & Porlier, G. (1985). Effects of inert gas narcosis on behavior - a critical review. *Undersea Biomed Res*, 12(4), 369–402.
- 10) Frankenhaeuser, M., Graff-Lonnevig, V., & Hesser, C. M. (1963). Effects on psychomotor functions of different nitrogen-oxygen gas mixtures at increased
- 11) Hobbs, M. B. (2014). Impairment from gas narcosis when breathing air and enriched air nitrox underwater. *Aviat Space Env Med*, 85(11), 1121–1124.
- 12) Deussen, H. Schmitz-Pfeiffer, U. Range, C. Balestra: Effects of oxygen-enriched air on cognitive performance during SCUBA-diving – an open water study / *Research in Sports medicine*, April 2017
- 13) Ran Arieli: Calculated risk of pulmonary and central nervous system oxygen toxicity: a toxicity index derived from the power equation; *Diving Hyperb Med.* 2019 Sep; 49(3): 154–160; The Israel Naval Medical Institute, Haifa, Israel.
- 14) Pierre Lafère,\* Walter Hemelryck, Peter Germonpré, Lyubisa Matity, François Guerrero, and Costantino Balestra: Early detection of diving-related cognitive impairment of different nitrogen-oxygen gas mixtures using critical flicker fusion frequency; *Diving Hyperb Med.* 2019 Jun; 49(2): 119–126.
- 15) Pierre Lafère,\* Walter Hemelryck, Peter Germonpré, Lyubisa Matity, François Guerrero, and Costantino Balestra: Effects of diving and oxygen on autonomic nervous system and cerebral blood flow; *Diving and Hyperbaric Medicine*, Volume 43 No 3, September 2013
- 16) Monica Rocco1 · P. Pelaia2 · P. Di Benedetto3 · G. Conte4 · L. Maggi5 · S. Fiorelli1 · M. Mercieri1 · C. Balestra6 · R. A. De Blasi1 on behalf of ROAD Project Investigators: Inert gas narcosis in scuba diving, different gases different reactions; *European Journal of Applied Physiology* <https://doi.org/10.1007/s00421-018-4020-y>; Received: 18 May 2018 / Accepted: 13 October 2018
- 17) J.J. Freiburger , B.J. Derrick, M. J. Natoli, I. Akushevich, E. A. Schinazi, C. Parker, B. W. Stolp, P. B. Bennett, R. D. Vann, S. A. S. Dunworth, and R. E. Moon: Assessment of the interaction of hyperbaric N2, CO2, and O2 on psychomotor performance of divers; Duke University, Durham, NC, USA; 2.9.2016, *J Appl Physiol* 121: 953–964, 2016

# ANHÄNGE

# Anhang 1

## Die Meyer-Overton Hypothese



Bennett P B 2003 Bennett and Elliott  
Physiology and Medicine of Diving 5th  
ed. London Saunders 300 322

**Fig. 1.** The linear correlation between the narcotic potency and the oil/water partition coefficient for some inert gases. Data from Ref. [ 15 ].

**Table 5. Correlation of narcotic potency of the inert gases, hydrogen, oxygen and carbon dioxide with lipid solubility and other physical characteristics.**

| Gas             | Molecular weight | Solubility lipid | in Temperature (°C) | Oil-water solubility ratio | Relative narcotic potency<br>(least narcotic) |
|-----------------|------------------|------------------|---------------------|----------------------------|---|
| He              | 4                | 0.015            | 37                  | 1.7                        | 0.2   |
| Ne              | 20               | 0.019            | 37.6                | 2.07                       | 0.3   |
| H <sub>2</sub>  | 2                | 0.036            | 37                  | 2.1                        | 0.6   |
| N <sub>2</sub>  | 28               | 0.067            | 37                  | 5.2                        | 1 Referenz                                    |
| Ar              | 40               | 0.14             | 37                  | 5.3                        | 2.3   |
| Kr              | 83.7             | 0.43             | 37                  | 9.6                        | 2.5   |
| Xe              | 131.3            | 1.7              | 37                  | 20.0                       | 25.6<br>(most narcotic)                       |
| O <sub>2</sub>  | 32               | 0.11             | 40                  | 5.0                        | 1.7   |
| CO <sub>2</sub> | 44               | 1.34             | 40                  | 1.6                        | 20.0  |

(aus: Bennett & Elliott, The Physiology and Medicine of Diving, 3<sup>rd</sup> ed., 1982)

Demnach wäre O<sub>2</sub> rund 1.7-mal narkotischer als N<sub>2</sub>. Andererseits wäre He nur etwa 4.5-mal weniger narkotisch als N<sub>2</sub>.

Zur Veranschaulichung der sich daraus ergebenden Konsequenzen rechnen wir nochmals den 300m TG vor Catalina Islands von H. Keller 1962:

$p_{tot} = 31 \text{ bar}$   
 $f_{O_2\text{-Mix}} = 0.03 \text{ (3\%)}$      $f_{O_2\text{-Luft}} = 0.209$      $nP_{O_2} = \mathbf{0.23, 1.0, 1.7}$   
 $f_{N_2\text{-Mix}} = 0.02 \text{ (2\%)}$      $f_{N_2\text{-Luft}} = 0.791$      $nP_{N_2} = 1.0 \text{ (Referenz)}$   
 $f_{He\text{-Mix}} = 0.95 \text{ (5\%)}$            $nP_{He} = \mathbf{0.222 \text{ (Meyer-Overton: 4.5-mal kleiner als N}_2)}$   
 $p_{surf} = 1.000 \text{ bar}$      $p_{O_2\text{-Mix}} = 0.93 \text{ bar}$   
 $dpdT = 0.100 \text{ bar/m}$      $p_{He\text{-Mix}} = 29.45 \text{ bar}$

a) mit  $nP_{O_2} = 0.23$

$$END (Tmx3/95/2, 300m) = \left( 31 * \frac{(0.23*0.03 + 0.222*0.95 + 1.0*0.02)}{(0.23*0.209 + 1*0.791)} - 1 \right) / 0.10 = \mathbf{77.9m}$$

=====

b) mit  $nP_{O_2} = 1$

$$END (Tmx3/95/2, 300m) = \left( 31 * \frac{(1.00*0.03 + 0.222*0.95 + 1.0*0.02)}{(1.00*0.209 + 1*0.791)} - 1 \right) / 0.10 = \mathbf{70.9m}$$

=====

c) mit  $nP_{O_2} = 1.7$

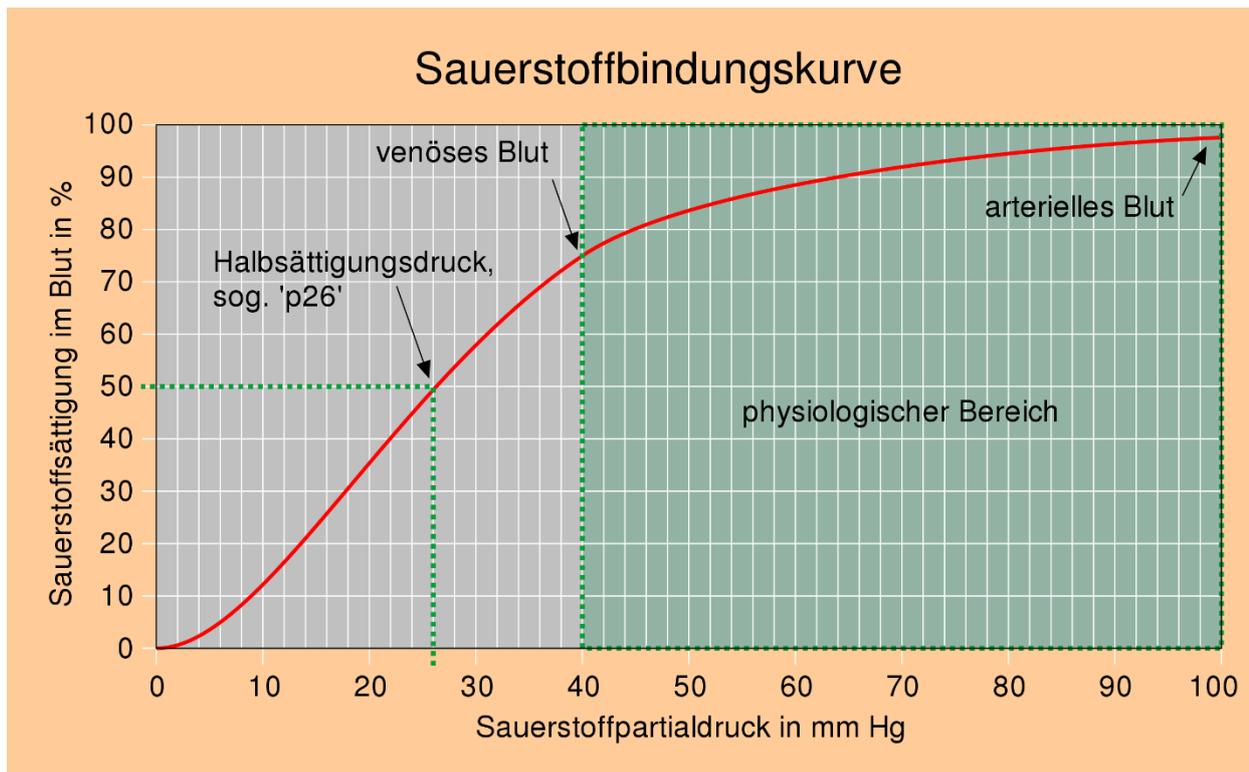
$$END (Tmx3/95/2, 300m) = \left( 31 * \frac{(1.70*0.03 + 0.222*0.95 + 1.0*0.02)}{(1.70*0.209 + 1*0.791)} - 1 \right) / 0.10 = \mathbf{66.2m}$$

=====

Alle Rechnungen haben eine END von 66m bis 78m zur Folge, was auch 1962 definitiv als jenseits von Gut und Böse für einen solchen Versuchs-TG im FREIWASSER angesehen worden ist. Daraus darf man schließen, dass das relative narkotische Potenzial von Helium viel eher im Bereich 0.10...0.15 liegen dürfte (s. Musterrechnung unter Pkt. 6).

## Anhang 2

### O<sub>2</sub>-Dissoziationskurve / Sauerstoff-Bindungskurve im Blut



## Anhang 3

# Exkurs: Narkotisches Potenzial von O<sub>2</sub>

### Zusammenfassung (1):

Wegen der laufenden Metabolisierung des O<sub>2</sub> stimmt die Meyer-Overton Theorie hier nicht.

*Nitrogen Narcosis, Oxygen Narcosis and HPNS*

#### NITROGEN NARCOSIS, OXYGEN NARCOSIS AND THE HIGH PRESSURE NERVOUS SYNDROME

*Peter B. Bennett, Ph.D.*  
Executive Director  
Undersea and Hyperbaric Medical Society  
Durham, NC

*Simon J. Mitchell, M.B.*  
Department of Anaesthesiology  
University of Auckland  
Auckland, New Zealand

At any event, its narcotic potency does not seem to comply with its lipid solubility of 0.11 for oxygen compared to 0.067 for nitrogen (Table 5). In a human study by Hesser, Fagraeus and Adolfson (49) oxygen was found to be only 0.26 as potent as nitrogen. The lower effect is no doubt due to its being metabolized and much lower levels actually occurring in the brain compared to the lungs.

#### EAD/END (Equivalent Air Depth/Equivalent Nitrogen Depth)

A succinct example of the irrelevance of oxygen narcosis in calculating END is available from Smithers on the website <http://masa.net/trimixnarcosis.html>. "At 130 fsw on air, the PO<sub>2</sub> is about 1.0 atm and the PN<sub>2</sub> about 3.9 atm for a total narcotic "partial pressure" of 4.9 atm (assuming O<sub>2</sub> is narcotic). With a max PO<sub>2</sub> of 1.4 atm and a max of PN<sub>2</sub> of 3.9 atm, the

### Zusammenfassung (2):

Recent work in Israel in fulfillment of a MSc degree at the University of Haifa was carried out by Heilweil (53). This involved evaluation of the "alleged" narcosis reduction when diving with nitrox mixtures. Comparison was made in 35 divers of EAN36 (i.e. Nitrox36) compared to air at a depth of 100 fsw for 20 mins in the sea. The experiments were double-blinded and sensitive cognitive tests and tools were used to quantify the quality of self-judgment and self-confidence along with actual performance. No significant differences were found between nitrox and air. This in spite of many claims by divers breathing nitrox that they feel less narcosis – a possible placebo effect.

So in conclusion, in regard to oxygen narcosis, yes, oxygen can exert a narcotic effect, but it is less than predicted by its lipid solubility, almost certainly because oxygen is metabolized and tissue PO<sub>2</sub> does not equilibrate with the PO<sub>2</sub> in the lungs at the oxygen pressures that can be safely used in diving. Thus, in practical terms, oxygen narcosis is much less of a problem for technical diving than would arise from the use of nitrogen at significant depths. To overcome the potential for nitrogen narcosis, deep divers do use oxygen-helium mixtures as an alternative. However, this then introduces the problem of the high pressure nervous syndrome (HPNS; see below).

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9300958/>

*Physiol Rep.* 2022 Jul; 10(14): e15386.

Published online 2022 Jul 20. doi: [10.14814/phy2.15386](https://doi.org/10.14814/phy2.15386)

PMCID: PMC9300958

PMID: [35859332](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35859332/)

## Does hyperbaric oxygen cause narcosis or hyperexcitability? A quantitative EEG analysis

[Xavier C. E. Vrijdag](#),<sup>1</sup> [Hanna van Waart](#),<sup>1</sup> [Chris Sames](#),<sup>2</sup> [Simon J. Mitchell](#),<sup>1,2,3</sup> and [Jamie W. Sleigh](#)<sup>1,4</sup>

[Author information](#) [Article notes](#) [Copyright and License information](#) [Disclaimer](#)

### Abstract

Divers breathe higher partial pressures of oxygen at depth than at the surface. The literature and diving community are divided on whether or not oxygen is narcotic. Conversely, hyperbaric oxygen may induce dose-dependent cerebral hyperexcitability. This study evaluated whether hyperbaric oxygen causes similar narcotic effects to nitrogen and investigated oxygen's hyperexcitability effect. Twelve human participants breathed “normobaric” air and 100% oxygen, and “hyperbaric” 100% oxygen at 142 and 284 kPa, while psychometric performance, electroencephalography (EEG), and task load perception were measured. EEG was analyzed with functional connectivity and temporal complexity algorithms. The spatial functional connectivity, estimated using mutual information, was summarized with the global efficiency network measure. Temporal complexity was calculated with a “default-mode-network (DMN) complexity” algorithm. Hyperbaric oxygen-breathing caused no change in EEG global efficiency or in the psychometric test. However, oxygen caused a significant reduction of DMN complexity and a reduction in task load perception. **Hyperbaric oxygen did not cause the same changes in EEG global efficiency seen with hyperbaric air, which likely related to a narcotic effect of nitrogen.** Hyperbaric oxygen seemed to disturb the time evolution of EEG patterns that could be taken as evidence of early oxygen-induced cortical hyperexcitability. **These findings suggest that hyperbaric oxygen is not narcotic and will help inform divers' decisions on suitable gas mixtures.**

## Anhang 5:

Aus: Monica Rocco1 · P. Pelaia2 · P. Di Benedetto3 · G. Conte4 · L. Maggi5 · S. Fiorelli1 · M. Mercieri1 · C. Balestra6 · R. A. De Blasi1 on behalf of ROAD Project Investigators: **Inert gas narcosis in scuba diving, different gases different reactions**; European Journal of Applied Physiology <https://doi.org/10.1007/s00421-018-4020-y>; Received: 18 May 2018 / Accepted: 13 October 2018:

### Auszug zum Thema OXYGEN:

.....  
 Some authors (Smith and Paton 1976; Hesser et al. 1978) suggested a narcotic effect of oxygen, **they tested oxygen pressures higher than 3.0 ATA**. Notably, oxygen also interacts with GABA neurotransmission and influences GABA levels and activity to inhibit or differentially modulate GABAergic function (Balestra et al. 2012). Cerebral vasoconstriction is a well-recognized mechanism that protects the brain from oxygen excess (Winklewski et al. 2013), even if the impact of this effect is not greater than 15–20%.  
 .....

### Kommentar dazu:

**Kein Taucher wird wohl auch nur in die Nähe eines pO<sub>2</sub> von 3 bar und höher kommen (wollen). Man lese dazu das unter Pkt. 3 Gesagte!**

## Anhang 6:

### Variation der relativen narkotischen Potenziale

$$END_{T_{mix}} = \left[ \frac{(p_{surf} + f_p \cdot T_{T_{mix}}) \cdot (nP_{O_2} \cdot f_{O_2-T_{mix}} + nP_{He} \cdot f_{He-T_{mix}} + nP_{N_2} \cdot f_{N_2-T_{mix}})}{(nP_{O_2} \cdot f_{O_2-Luft} + nP_{N_2} \cdot f_{N_2-Luft})} - p_{surf} \right] \cdot \frac{1}{f_p}$$

|       |      |      |      |             |        |                  |
|-------|------|------|------|-------------|--------|------------------|
| nP_O2 | 0.00 | 0.23 | 1.00 | T-Mix       | 90.0   | m                |
| nP_He | 0.00 | 0.10 | 0.22 | pSurf       | 1.000  | bar              |
| nP_N2 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | dpdT        | 0.100  | bar/m (auch: fp) |
|       |      |      |      | ptot(T-Mix) | 10.000 | bar              |

|      |       |      |       |     |
|------|-------|------|-------|-----|
| f_O2 | 0.130 | p_O2 | 1.300 | bar |
| f_He | 0.700 | p_He | 7.000 | bar |
| f_N2 | 0.170 | p_N2 | 1.700 | bar |

|           |       |
|-----------|-------|
| f_O2-Luft | 0.209 |
| f_N2-Luft | 0.791 |

| nP_He [---] | END [m] | nP_O2 [---] |      |      | delta_T |
|-------------|---------|-------------|------|------|---------|
|             |         | 0.00        | 0.23 | 1.00 |         |
| 0.00        |         | 11.5        | 13.8 | 20.0 | 8.5     |
| 0.10        |         | 20.3        | 22.2 | 33.3 | 13.0    |
| 0.22        |         | 31.0        | 32.2 | 40.9 | 9.9     |

|         |      |      |      |   |
|---------|------|------|------|---|
| delta_T | 19.5 | 18.4 | 20.9 | m |
|---------|------|------|------|---|