

Sauerstoff Fenster

Der Begriff Sauerstoff Fenster kennzeichnet die O_2 -Partialdruckdifferenz zwischen arteriellem und venösem Blut, bzw. (andere Sichtweise) die O_2

²-Partialdruckdifferenz zwischen venösem Blut und Atemgas in der Lunge. Je nach Referenz fällt der Wert für die Öffnung des Sauerstoff Fensters leicht unterschiedlich aus.

Das Sauerstoff Fenster wird als "ein Kernelement der modernen Dekompressionstheorie" bezeichnet (vergl. [9]). Diese Sichtweise ist noch immer weitverbreitet, und wohl mitverantwortlich dafür, dass Tauchschüler und angehende Tec Taucher sich durch diese Theorie wurschteln (müssen). Um es vorwegzunehmen, das Sauerstoff Fenster hat für das technische Tauchen keine Relevanz. Die Tatsache, dass es dort am weitesten geöffnet ist, wo wir am Besten entsättigen, bedeutet nicht, dass es hier einen ursächlichen Zusammenhang gibt.

Kurzer Blick durch das Sauerstoff Fenster

In den folgenden Abbildungen (1 - 3) wird gezeigt, wie weit das Sauerstoff Fenster in Abhängigkeit von verwendetem Atemgas und Umgebungsdruck geöffnet ist.

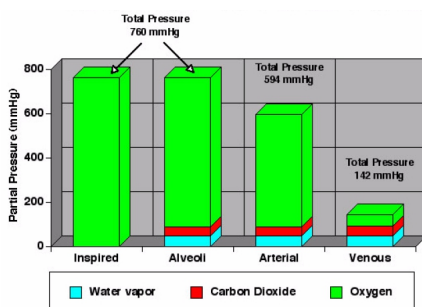


Abbildung 1 Atmen von Sauerstoff bei 1,0 bar Umgebungsdruck, aus "Gas Exchange, Partial Pressure Gradients and the Oxygen Window" von Johnny E. Brian, Jr.

Abb. 1 zeigt die Partialdrücke im Atemgas, den Alveolen, im arteriellen und im venösen Blut bei

Atmung von 100% Sauerstoff und 1 Bar Umgebungsdruck. Da im venösen Blut kein Inertgas enthalten ist, gehen wir davon aus, dass alle Inertgase vollständig abgeatmet wurden. Die O_2 -P artialdruckdifferenz zwischen venösem Blut und eingeatmeter Luft beträgt in Abb.1 618 mmHg (in Abb. 3 wird fälschlicherweise nur 518 mmHg angezeigt).

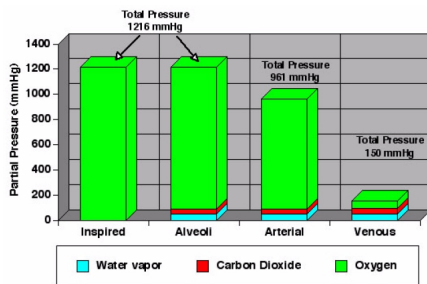


Abbildung 2 Atmen von Sauerstoff bei 1,6 bar Umgebungsdruck, aus "Gas Exchange, Partial Pressure Gradients and the Oxygen Window" von Johnny E. Brian, Jr.

Abb. 2 zeigt die Öffnung des Sauerstoff Fensters bei Atmung von 100% Sauerstoff bei 1,6 bar Umgebungsdruck. Die O_2 -Druckdifferenz zwischen Atemgas in der Lunge und venösem Blut beträgt nun bereits 1.066 mmHg.

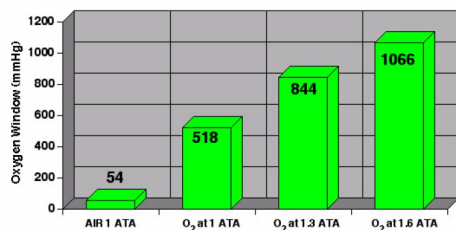


Abbildung 3 "Öffnung" des Sauerstoff Fensters in Abhängigkeit von Atemgas und Umgebungsdruck, aus "Gas Exchange, Partial Pressure Gradients and the Oxygen Window"

von Johnny E. Brian, Jr.

Abb. 3 stellt die Öffnung des Sauerstoff Fensters noch mal in Abhängigkeit der aufgeführten Rahmenbedingungen dar. Die O₂-Partialdruckdifferenz bei Atmung reinen Sauerstoffs bei 1 bar Umgebungsdruck ist allerdings etwas größer als in Abb. 3 dargestellt, nämlich 618 mmHg. Da hat sich in [7] wohl ein Fehler eingeschlichen.

Zurück zu Abb. 1. Eingeatmet wird 100% Sauerstoff unter 1 bar Umgebungsdruck, entspricht 760mmHg (genaugenommen gehen wir von 1,013 bar Umgebungsdruck aus). Der Gesamtdruck in der Lunge ist immer noch 760 mmHg, allerdings angereichert mit Wasserdampf (47 mmHg) und CO₂(40 mmHg). Zwischen Alveolen und Arterien kommt es zu einem Partialdruckabfall, da nie der gesamte Sauerstoff in Lösung geht. Daher landen wir hier in der Summe der Partialdrücke bei 594 mmHg.

Um zu verstehen, warum sich das Sauerstoff Fenster mit steigendem Umgebungsdruck überproportional öffnet, muss man sich mit der Sauerstoff - Hämoglobin Bindungskurve befassen. Im Blut verhält sich Sauerstoff mit steigendem Partialdruck nicht wie ein ideales Gas. Sauerstoff wird zuerst chemisch an Hämoglobin gebunden. Dadurch steigt der Partialdruck von Sauerstoff zunächst fast gar nicht. Erst wenn alles Hämoglobin mit Sauerstoff gesättigt ist, steigt bei weiterer Zuführung von Sauerstoff der Partialdruck rapide, was wiederum daran liegt, dass der in Lösung gehende Sauerstoff nur schwer löslich ist.

Im Rahmen des Metabolismus werden vom Körper immer ca. 4,5ml O₂ pro 100 ml Blut verbrannt. Solange reine Luft bei 1 bar Umgebungsdruck geatmet wird, wird dieser Sauerstoff über das Hämoglobin gedeckt, da unter diesen Umständen ohnehin kein / kaum Sauerstoff im Blut gelöst ist. Wenn die Bindung von Sauerstoff an Hämoglobin nur unwesentlich zur Partialdruckerhöhung beiträgt, gilt im umgekehrten Fall, dass die ausschließliche Entnahme von Sauerstoff aus dem Hämoglobin auch nur unwesentlich zur Partialdruckverringerung beiträgt. Ergo: Bei Atmung von Luft auf Meereshöhe ist das Sauerstoff Fenster nur wenig geöffnet. Hier ist die Anmerkung noch wichtig, dass der Sauerstoff zuerst vom Hämoglobin in Lösung gehen und von dort aus erst in die Gewebe diffundieren kann.

Bei Atmung reinen Sauerstoffs auf Meereshöhe sieht der Fall schon anders aus. Es steht ein deutliches Überangebot von Sauerstoff zur Verfügung, dass über die reine Sättigung des Hämoglobin weit hinaus geht. Aller Sauerstoff, der nicht mehr an Hämoglobin gebunden werden kann, wird nun im Blut physikalisch gelöst. Aufgrund der schlechten Löslichkeit schnell

also jetzt der Partialdruck nach oben. Im Rahmen des Metabolismus werden wieder ca. 4,5ml O₂ pro 100 ml Blut verbrannt. Diesmal geschieht die Deckung des Sauerstoffbedarfs in den Geweben zunächst auf dem im Blut gelösten Sauerstoff. Da nun also zuerst der im Blut gelöste Sauerstoff verbrannt wird, sinkt der Partialdruck genauso schnell wieder (von dem ans Hämoglobin gebundenen Sauerstoff wird nun deutlich weniger benötigt). Aus Abb. 3 ist abzulesen, dass sich dieser Effekt also noch weiter verstärkt, wenn der Umgebungsdruck bei Atmung reinen Sauerstoffs weiter steigt.

Das metabolisierte CO₂ kann die Druckdifferenz in keinem Fall auffangen, da CO₂ sich um ein Vielfaches besser in Blut löst als Sauerstoff und damit deutlich weniger zum Druckausgleich beiträgt.

So! Nach dem ihr euch da nun durchgequält habt, kommt die Entwarnung. Mit einer kleinen Ausnahme ist davon nichts, aber auch wirklich nichts für den Tec Taucher wichtig!

Wir schließen das Sauerstoff Fenster

Es herrscht immer noch der Irrglaube, dass die Druckdifferenz zwischen arteriellem und venösem Blut die treibende Kraft für den Abtransport von Inertgasen aus dem Körper wäre und je höher diese Druckdifferenz ist, desto mehr Inertgas könnte dann abgeatmet werden. Es besteht also die Vorstellung, dass die Druckdifferenz durch das (die) Inertgas(e) geschlossen wird.

Auch wenn sich dieses Bild anschaulich anbietet, hat es mit den physikalischen Gegebenheiten nichts zu tun.

Tatsächlich findet die Entsättigung durch die Bildung eines Gasgradienten statt. Je höher der Gasgradient für das zu entsättigende Inertgas ist, desto schneller findet die Entsättigung statt. Der Gasgradient ist dann maximiert, wenn das zu entsättigende Inertgas aus dem Atemgas vollständig eliminiert ist. Dabei spielt es keine Rolle, durch welches andere Gas das zu entsättigende Inertgas ersetzt wird. Dies kann ausschließlich Sauerstoff sein, oder aber auch ein beliebiges anderes Inertgas (das dann allerdings wieder aufsättigen würde und später ebenfalls entsättigt werden müsste).

Warum wird nun mit EAN50 auf 21m entsättigt? Oft lautet die Antwort darauf, dass hier das

Sauerstoff Fenster maximal geöffnet ist. Was für sich betrachtet sicher nicht falsch ist, aber das ist nicht das Ziel!

Die Ziele sind folgende:

1. Fange möglichst früh mit der Entsättigung an
2. Reduziere den Inertgasanteil im Atemgas soweit wie möglich
3. Der Sauerstoff Partialdruck darf 1,6 bar nicht übersteigen

All diese Parameter werden auf 21m und einem Atemgasgemisch von EAN50 erfüllt. Die Forderung nach einer Öffnung des Sauerstoff Fensters wird dazu gar nicht benötigt.

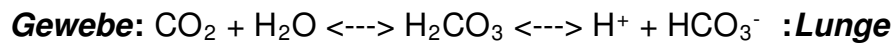
In obiger Liste verdient Punkt 1 noch ein wenig Aufmerksamkeit. Warum sollte mit der Entsättigung möglichst früh begonnen werden? Ein rein Bühlmann basiertes Modell postuliert, den Umgebungsdruck soweit zu verringern, dass der Inertgasdruck des Leitgewebes sich Richtung M-Value verschiebt (ohne diesen zu überschreiten). Grund dafür ist die Maximierung des Inertgasgradienten zwischen Gewebe und Atemgas. Diese Maximierung des Inertgasgradienten lässt sich aber auch durch Punkt 2 obiger Liste erreichen. Hintergrund für das möglichst frühe Einsetzen der Entsättigung ist der höhere Umgebungsdruck, der dazu führt, dass die Inertgase so lange wie möglich in Lösung bleiben (das Helium generell früher entsättigt als Stickstoff, lassen wir jetzt mal außer Acht und beschränken uns auf eine grundsätzliche Betrachtung). Ein zu frühes Aufsteigen bedeutet nur, dass es zur Bildung von Mikroblasen kommt, die sich im sog. Lungenfilter festsetzen und damit die Perfusion des Blutes behindern. Letzteres führt dann dazu, dass der Gasaustausch in der Lunge reduziert wird.

Die Entsättigung mit reinem Sauerstoff auf 6m dient also nicht dazu, das Sauerstoff Fenster zu öffnen, sondern nur, die Blasen soweit wie möglich zu reduzieren und damit den Blutfluss so wenig wie möglich zu behindern.

Anders formuliert: Die Maximierung des Sauerstoff Fensters hat keinen nachteiligen Effekt auf die Entsättigung. Ganz im Gegenteil, das trägt zur Entsättigung bei. Sich jedoch bei der Entsättigung auf das Sauerstoff Fenster zu berufen, ist allerdings falsch. Der Zusammenhang ist nicht ursächlich.

Abschließende Frage - wo ist denn nun die oben erwähnte Ausnahme, die im Rahmen der Betrachtung des Sauerstoff Fensters noch interessant ist?

Bei Atmung von Luft unter normobaren Bedingungen geht der Sauerstoff am Zielort raus aus dem Hämoglobin und in das Blutserum in Lösung. Auf diese Weise kann der Sauerstoff aus dem Serum in die Zellen diffundieren. Das vom Sauerstoff entladene Hämoglobin tritt den Rückweg allerdings nicht leer an, sondern lädt nun H⁺ Ionen. Diese kommen aus der folgenden Reaktionsgleichung:



CO₂ geht also im Blutserum in Lösung, solange das Blut nicht zu sauer ist, verliert das resultierende H₂CO₃ ein H⁺ Ion, übrig bleibt ein Bicarbonation. Das H⁺ Ion wird also über das Hämoglobin zur Lunge transportiert, dort läuft die Reaktionsgleichung in umgekehrter Reihenfolge ab. Es entsteht also wieder CO

², das anschließend über die Lunge abgeatmet werden kann.

Unter hyperbaren Bedingungen wird aber die Aufnahme von H⁺ Ionen für den Rücktransport zur Lunge behindert, da die Hämoglobintransporter nicht vom Sauerstoff entladen werden (der Sauerstoffbedarf wird ja über den im Serum gelösten Sauerstoff gedeckt). Ergebnis ist eine Störung in der CO

²Entsättigung, deren sich der Taucher bewusst sein muss. Daher sollte Anstrengung bei hohem Sauerstoffpartialdruck soweit wie möglich vermieden werden. Das Ergebnis wäre andernfalls eine Hyperkapnie, die zu Hyperventilation führt. Der Rat an dieser Stelle ist, in rhythmischen Abständen tief auszuatmen, um einen möglichst großen CO

²-Unterdruck zu erzeugen, der die Reaktionskette (s. oben) besser nach links verlaufen lässt (s. [9]).

