

Veränderung der Sauerstoffkonzentration im Atemkreislauf eines konstantdosierten Kreislauftauchgerätes in Abhängigkeit von der Arbeitsleistung.

Lüchtenberg, D., Saulnier, F. Banzhaff, S.
FG Sportwissenschaft, Universität Konstanz

Einführung

Kreislaufauchaugeräte sind historisch betrachtet eng mit der Entwicklung des Schwimmtauchens und der taktischen Verwendung als militärisches und kommerzielles Tauchgerät verbunden. In der jüngsten Vergangenheit erlebt diese Tauchtechnologie eine Renaissance im Bereich des Sporttauchens. Die für den Massensport Tauchen entwickelten Gerätschaften erlauben das Veratmen unterschiedlicher Nitroxmischungen, die konstantdosiert in den Atemkreislauf eingespeist werden. Derartige Geräte werden auch als halbgeschlossene Kreislaufauchaugeräte (Semi Closed Rebreather) zur Veratmung eines Fertiggasgemisches (Premix-Gas) bezeichnet.

Um einen Tauchgang mit einem Nitrox-Rebreather zu planen, ist es notwendig zu wissen, wieviel Prozent Sauerstoff sich einerseits im Gasgemisch und andererseits im Atempbeutel befinden. Der Sauerstoffanteil im Atempbeutel hängt von der Frischgas-Dosierung sowie dem Sauerstoffverbrauch des Tauchers ab und kann nach LONCAR/ÖRNHAGEN (1996) berechnet werden. Beim Tauchen richtet sich der Sauerstoffverbrauch nach dem Grad der körperlichen Anstrengung und wird in $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ angegeben. Im Ruhezustand verbraucht der menschliche Organismus etwa $0,5 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ Sauerstoff. Bei leichter körperlicher Anstrengung, wie z.B. ein entspannter Riffauchgang, wird ca. $1 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ verstoffwechselt. Ein O_2 -Verbrauch jenseits von $2,5 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ wird bei durchschnittlich trainierten Tauchern in der Literatur beschrieben (LANPHIER/CAMPORESI 1993) und kann z.B. bei harten Unterwasserarbeiten oder beim Schwimmen gegen eine starke Unterwasserströmung auftreten. Höhere O_2 -Verbräuche (bis zu $7 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$) können lediglich bei Spitzenathleten unter normobaren Bedingungen an Land festgestellt werden (WHIPP/WARD 1994, HARRIES 1996). Ebenfalls ist bekannt, dass die maximale Ventilationsrate und das maximale Atemminutenvolumen mit zunehmender Tauchtiefe eingeschränkt ist und sich in 45 m Wassertiefe um die Hälfte reduziert (ELLIOTT 1996). Derart hohe Arbeitsleistungen sind unter Wasser nur kurzfristig aufrechtzuerhalten. Der Sauerstoffverbrauch wirkt sich daher entscheidend auf den Sauerstoffanteil im Atempbeutel eines SCR aus. Um von einer realistisch anzunehmenden "worst case"-Situation auszugehen, kann für tauchspezifische Bedingungen ein O_2 -Verbrauch von $2,5 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ angenommen werden.

Da bei einem Kreislauftauchergerät die Gaszusammensetzung des Atembeutels in Abhängigkeit vom individuellen Sauerstoffverbrauch (V_{VO_2}) und damit von der Höhe der körperlichen Anstrengung während des Tauchganges zu beurteilen ist, bestimmt der Sauerstoffverbrauch die Höhe des Stickstoffanteil im Atembeutel (F_{iN_2}). Demnach ergibt sich der Stickstoffanteil im Atembeutel aus nachfolgender Beziehung:

$$F_{iN_2} = 1 - F_{iO_2}$$

Um den Sauerstoffanteil im Atembeutel (F_{iO_2}) eines SCR berechnen zu können, müssen folgende Variablen berücksichtigt werden:

- Sauerstoffanteil der Vorratsflasche (F_{SO_2})
- Höhe der Konstantdosierung (V_S)
- Sauerstoffverbrauch des Tauchers (V_{VO_2})

Der Sauerstoffanteil der Vorratsflasche (F_{SO_2}) ergibt sich aus der Nitroxmischung, die für den jeweiligen Tauchgang verwendet wird. Die Höhe des konstant zudosierten Frischgases wird bestimmt durch den Sauerstoffanteil des Vorratsgases. Dabei kann folgende Beziehung aufgestellt werden: Je sauerstoffreicher eine Nitroxmischung ist, desto geringer kann der konstantdosierte Zustrom in den Atembeutel ausfallen. Je sauerstoffärmer das Premix ausfällt, desto höher muss der Frischgaszustrom in den Atembeutel sein. Dabei wird von den Geräteherstellern die Höhe der Frischgaszudosierung so ausgelegt, dass auch bei großer Anstrengung unter Wasser (Sauerstoffverbrauch $> 2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$) ein Sauerstoffanteil von 16 % im Atembeutel niemals unterschritten wird.

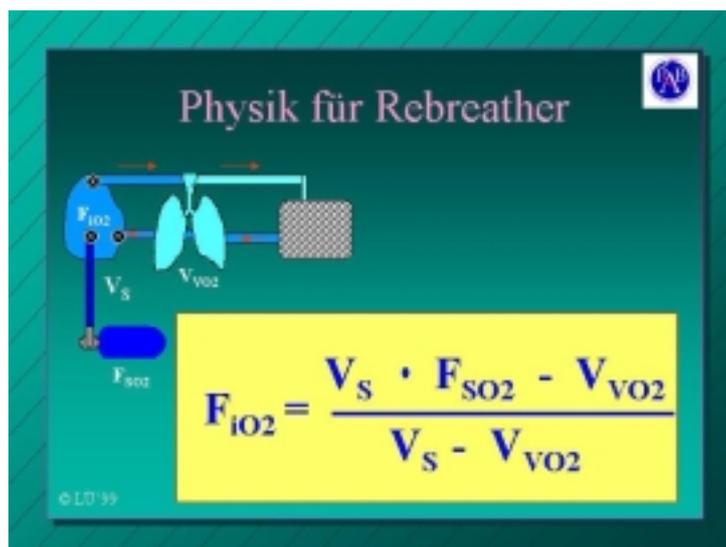


Abb. 1: Berechnung des Sauerstoffanteils im Atemkreislauf eines SCR

Je höher der Sauerstoffanteil, desto geringer kann die permanent in den Atemkreislauf eingespeiste Frischgasmenge sein. Die Zuordnung Sauerstoffanteil Frischgas zu Frischgaszudosierung (Konstanflow) wird in den z.Z. auf dem Markt befindlichen Kreislauf-Tauchgeräten nicht von einer intelligenten Gerätetechnologie übernommen, sondern muss vom Taucher vor dem Tauchgang eingestellt werden. Abb.2 zeigt den lungenautomatischen Bypass des halbgeschlossenen, konstantdosierten Kreislauf-Tauchgerätes *Dolphin*. Zu erkennen sind die einzelnen Dosiertüllen (1-3) und der Anschluß für den Bypass (4).



Abb. 2: Details des lungenautomatischen Bypass

Die Problematik einer falschen Zuordnung Nitroxgemisch - Höhe der zudosierten Frischgasmenge im Sinne eines „human errors“ wird damit evident. Die dieser Studie zugrunde liegende Fragestellung lautet: *Kann eine falsche Zuordnung von Nitroxgemisch und konstantdosierter Frischgasmenge in Abhängigkeit von Arbeitsleistung zu kritischen Sauerstoffverhältnissen (Hypoxie) im Atembeutel eines halbgeschlossenen Kreislauf-Tauchgerätes führen?*

Methodik Studie I

In einer ersten Untersuchung wurden 20 Vpn unter normobaren Bedingungen unterschiedlichen Arbeitsleistungen (zwischen 60 – 110 Watt) auf dem Ruderergometer ausgesetzt.

Das bei dieser Studie verwendete Kreislauf-Tauchgerät der Fa. Dräger wurde so manipuliert, dass Schaumstoffpolster einerseits den Tragekomfort auf dem Ruderergometer verbesserten und andererseits eine ungehinderte Ausdehnung der Atembeutel bei der Rückentrageweise ermöglichten (siehe Abb.3). Ein

Sauerstoffsensor (Pac O₂, Fa. Dräger) wurde am Übergang des Einatembeutels zum Einatemschlauch platziert.



Abb. 3: Versuchsanordnung Studie I Ruderergometer

Die Höhe der zu erbringenden Arbeitsleistung variierte in Abhängigkeit von Geschlecht und Körpergewicht. Dabei wurden nachfolgende Belastungen festgelegt:

Männer	1,25 Watt / kg Körpergewicht
Frauen	1,15 Watt / Kg Körpergewicht

Dies ergaben absolute Arbeitsleistungen zwischen 60 und 110 Watt. Nach einer 5minütigen Aufwärmphase absolvierten die Probanden jeweils eine 15minütige Ruderergometrie mit nachfolgender Kombination von Nitroxmischung und Konstantdosierung:

Design A:	EAN 40/60	Flow 10,4 l.min ⁻¹
Design B:	EAN 40/60	Flow 5,7 l.min ⁻¹

In Design A entsprach der Flow von 10,4 l.min⁻¹ der vom Gerätehersteller empfohlenen Konstantdosierung für ein EAN 40/60 Gemisch. In Design B wurde ein Flow verwendet (5,7 l.min⁻¹), der vom Gerätehersteller für ein EAN 60/40 Gemisch vorgesehen ist. Dieses Versuchsdesign sollte damit ein Vertauschen der Dosierung in einem SCR simulieren.

Ergebnisse Studie I

Für Studie I ergaben sich nachfolgende Ergebnisse:

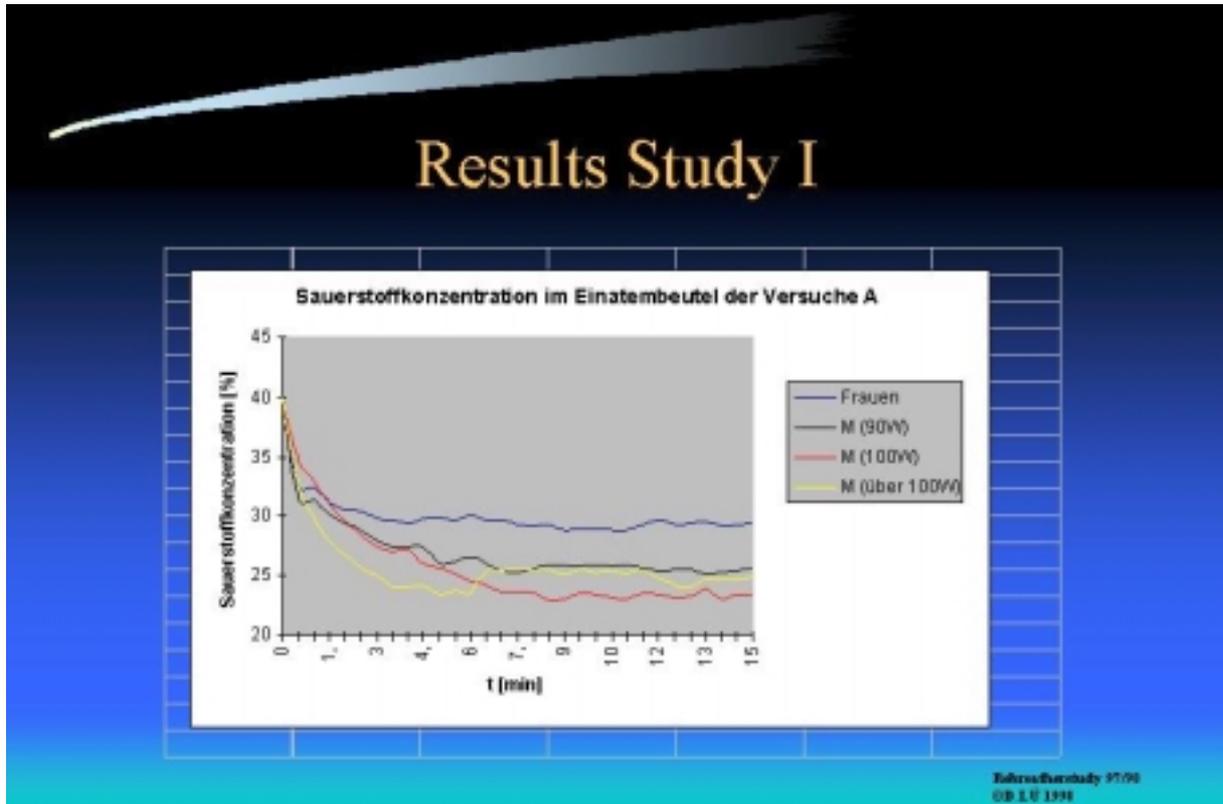


Abb. 4: Sauerstoffkonzentration im Einatembeutel Design A

Abbildung 4 verdeutlicht, dass die Sauerstoffkonzentration bei allen Probanden im unkritischen Bereich liegt.

Bei den Frauen ist im Vergleich zu den Männern ein geringerer Sauerstoffverbrauch (V_{VO_2}) festzustellen

Results Study I

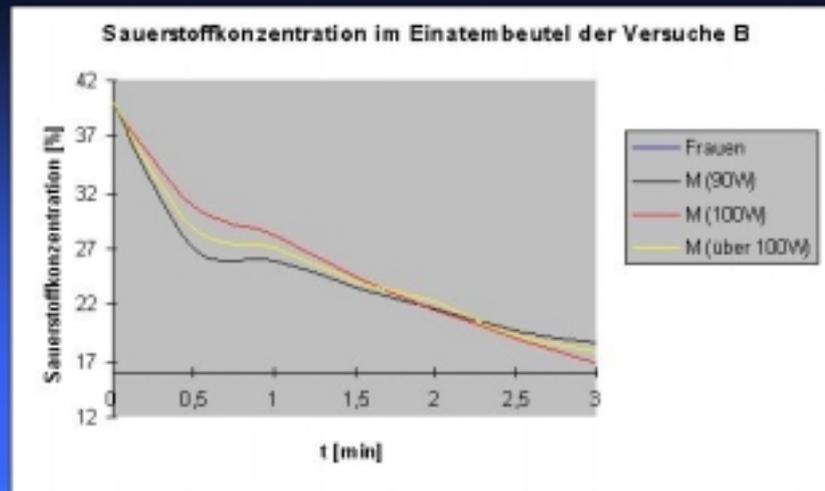
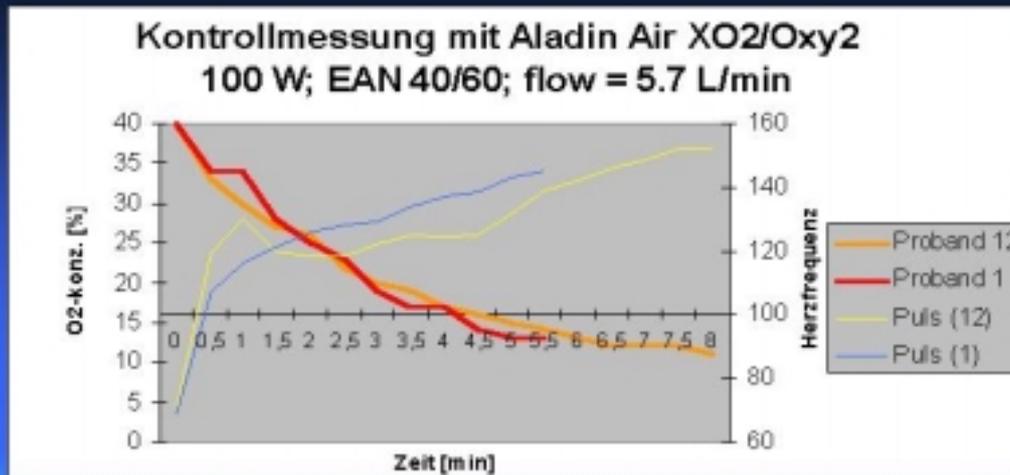


Abb. 5: Sauerstoffkonzentration im Einatembeutel Design B

In Design B ist die Dosierung für das zugehörige Nitroxgemisch vertauscht worden. Der Flow ist für ein EAN 40/60 zu niedrig. Bei allen männlichen Probanden zeigt sich in Abb. 5, dass die kritische Schwelle von 16% Sauerstoff im Einatembeutel in einem Zeitraum von 3 bis 5 Minuten erreicht wird. Eine Kontrollmessung mit einem alternativen Sauerstoffmessverfahren im Atemkreislauf des SCR bestätigt das Ergebnis der 1. Studie (siehe Abb.6).

Results Study I



Lehrstuhl für Sportmedizin
09.10.1998

Abb. 6: Sauerstoffkonzentration im Atembeutel (Kontrollmessung)

Auch bei der Kontrollmessung (Abb.6) konnten durch Vertauschen der Dosiertüllen hypoxische Zustände in relativ kurzer Zeit (4-5 Minuten) provoziert werden. Der Konstantflow von $5,7 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ bei der Verwendung eines EAN 40/60 reichte bei den Probanden (Arbeitsleistung 100 Watt) nicht aus, ein Minimum von 16% Sauerstoff im Atembeutel zu gewährleisten. Zudem konnte eine zur Sauerstoffkurve gegenläufiges Verhalten der Herzfrequenz festgestellt werden. Ein rapider Abfall der Sauerstoffkonzentration im Atemkreislauf geht einher mit einem kontinuierlichen Herzfrequenzanstieg der Probanden.

In keinen der Versuche der ersten Studie, konnten die Probanden den Sauerstoffanteil im Atembeutel durch Ansprechen des Bypasses längerfristig erhöhen. Hohe Atemzugvolumina im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit und ein damit verbundenes Ansprechen des lungenautomatischen Bypasses, sorgten bei Probanden mit Vitalkapazitäten grösser 6 Liter kurzfristig für höhere Sauerstoffkonzentrationen im Atemkreislauf. Doch dieser kurzfristige Aspekt konnte den kontinuierlichen Sauerstoffabfall nicht verhindern lediglich minimal hinauszögern. Frauen mit niedrigen Vitalkapazitäten (VK 4-5 Liter) zogen auch im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit kein zusätzliches Frischgas über den lungenautomatischen Bypass in den Atemkreislauf. Demnach muss angenommen werden, dass der lungenautomatische Bypass in derartigen Extremsituationen (geringer Umgebungsdruck, inadäquate Konstantdosierung) hypoxische Zustände im Atemkreislauf eines SCR nicht auffangen kann.

Methodik Studie II

In einer zweiten Untersuchung sollten die unter normobaren Bedingungen durchgeführte Ergometerbelastung in einem Schwimmkanal tauchspezifisch validiert werden. Hierzu mussten 9 Probanden unter hyperbaren Bedingungen ($p = 1.13 \text{ bar}$) im Gegenstrombecken gegen unterschiedlich hohe Anströmgeschwindigkeiten ($0.5\text{-}0.7 \text{ m/s}$) 15 Minuten anschwimmen. Als Abbruchkriterium wurde ein pO_2 von $0,16 \text{ bar}$ festgesetzt. Die Versuchspersonen atmeten aus einem halbgeschlossenen Kreislauf-Tauchgerät der Fa. DRÄGER. Auch in dieser Studie wurden die Dosierungen für das EAN 40/60 variiert.

Folgende Kombinationen wurden gewählt:

EAN 40/60 Flow $10,4 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$

EAN 40/60 Flow $5,7 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$

Dabei standen bewußt sogenannte „worst case“ Szenarien (geringer Umgebungsdruck, sauerstoffarme EAN-Mischung, inadäquate Konstantdosierung) im Vordergrund. Es wurden die Herzfrequenz (HF) sowie der Sauerstoffanteil im Einatembeutel des Kreislauf-Tauchgerätes (Fi_{O_2}) gemessen. Zur Sauerstoffmessung stand das Messsystem Aladin AirX $O_2 / Oxy 2$ der Fa. UWATEC zur Verfügung. Es handelt sich hierbei um eine Gerätekonfiguration bestehend aus einer Sauerstoffmesseinheit mit zwei Sauerstoffsensoren (Oxy2) und dem dazugehörigen Tauchcomputer (Aladin AirX O_2). Die Messdaten des Oxy 2 werden drahtlos über Funk an das Handgelenksmodell des Tauchcomputers gesendet und in die Dekompressionsberechnungen des Computers einbezogen. Damit konnte das Tauchprofil in $0,1 \text{ m}$ Schritten, sowie die Sauerstoffmessung in 5 Sekunden -Intervallen aufgezeichnet werden (siehe Abb.7).

Rebreatherstudy II



Aladin Air X O₂



Oxy 2

Rebreatherstudy 87/98
© D. Lu 1998

Abb.7: Aladin AirX O₂ und Oxy 2

Rebreatherstudy II



Rebreatherstudy 87/98
© D. Lu 1998

Abb. 8: Proband im Gegenstrombecken.

Ergebnisse Studie II

Es konnten folgende Ergebnisse gewonnen werden:

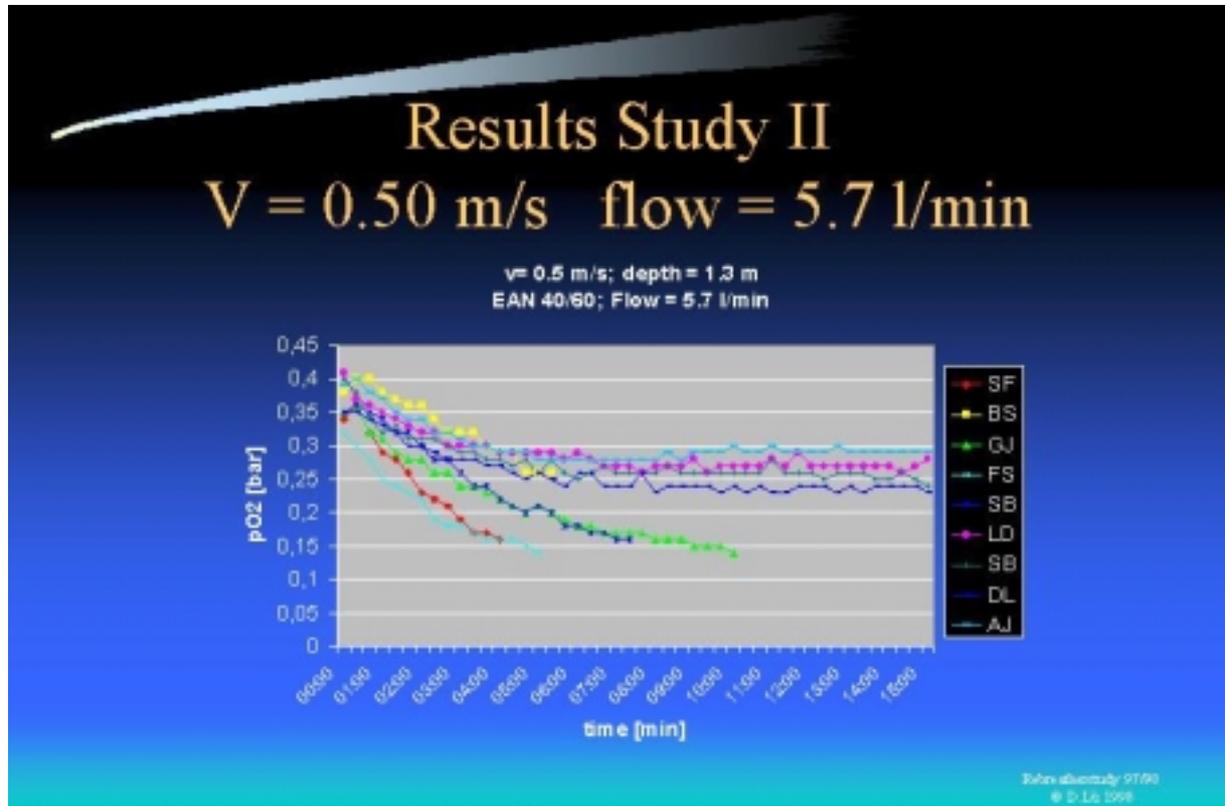


Abb. 9: Ergebnis Studie II

Bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,5 m/s und einer Wassertiefe von 1,3 m ergaben sich für einige Probanden (Kurven A) nach 15 Minuten hypoxische Verhältnisse während andere Probanden diese Belastung durchtauchen, ohne kritische Sauerstoffwerte ($< pO_2$ 0,15 bar) aufzuweisen. Bei genauerer Betrachtung der Probandenanamnese, zeigte sich eine Dreiteilung des Probandenguts.

1. Probanden mit hoher anaerober Leistungsfähigkeit, die die 15minütige Belastung, ohne kritische Sauerstoffwerte im Atembeutel überstanden.
2. Probanden mit geringer anaerober Ausdauerleistungsfähigkeit, die den Versuch vor Erreichen der kritischen Schwelle, aufgrund muskulärer Ermüdung abbrechen mussten.
3. Probanden mit mittlerer anaerober Ausdauerleistungsfähigkeit, die nach 7-8 Minuten kritische Werte im Atembeutel aufwiesen.

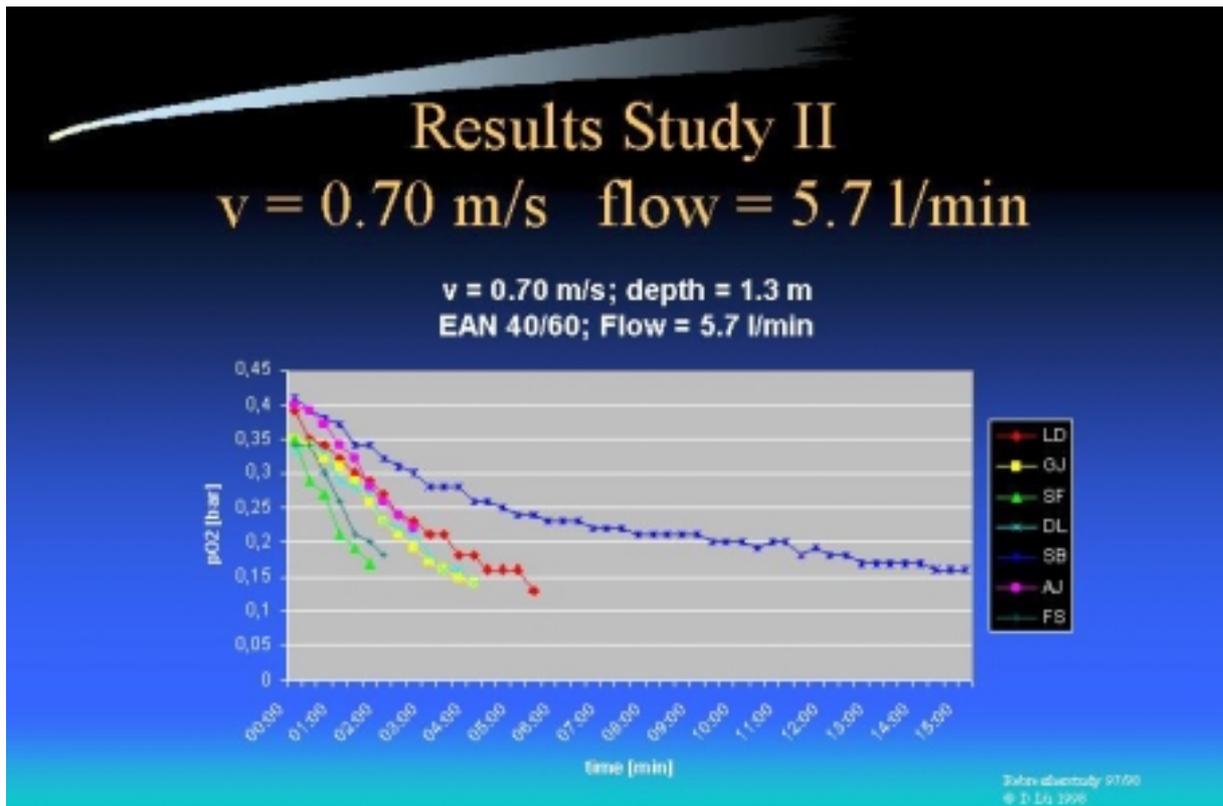


Abb. 10: Ergebnis Studie II

Bei größerer Anströmgeschwindigkeit (0,7 m/s) ergaben sich vergleichbare Resultate. Allerdings war in dieser Versuchsreihe lediglich ein Proband in der Lage, die 15 Minuten bei dieser hohen Anströmgeschwindigkeit ohne kritische Sauerstoffwerte im Atembeutel zu absolvieren. Die Sauerstoffverlaufskurve zeigt jedoch einen tendenziell degressiven Verlauf, so dass man kritische Werte ($< pO_2 = 0,16 \text{ bar}$) kurze Zeit später vermuten muss.

Drei Probanden erreichten nach 4 bis 5,5 Minuten das Abbruchkriterium von $pO_2 < 0,16 \text{ bar}$ und beendeten den Versuch. Zwei weitere Probanden waren aufgrund muskulärer Ermüdung nicht in der Lage den Versuch fortzusetzen und brachen den Tauchgang nach etwas mehr als 2,5 Minuten ab, ohne kritische Sauerstoffwerte erreicht zu haben.

Schlussfolgerungen:

Als zusammenfassendes Ergebnisse beider Studien ergibt sich: In beiden Untersuchungsreihen konnten in Abhängigkeit von Trainingszustand, Höhe der Frischgasdosierung und Arbeitsleistung hypoxische Verhältnisse im Atembeutel des Kreislauftauchergerätes provoziert werden. In welchem Ausmaße der Trainingszustand der Probanden und hier vor allem die Ausdauerleistungsfähigkeit in die Beurteilung hypoxischer Verhältnisse im Atemkreislauf eines halbgeschlossenen Kreislauftauchergerätes eingehen, konnten die vorliegenden Studien nicht klären. Sie lassen lediglich tendenzielle Vermutungen zu. Weiterführende Studien, die den Einfluss der

Ausdauerleistungsfähigkeit evaluieren, müssen sich dieser Fragestellung annehmen

Die Ergebnisse weisen auf die Wichtigkeit eines Sauerstoffmonitorings in konstantdosierten Kreislauf-Tauchgeräten hin. Ein derartiges Sauerstoffmonitoring ermöglicht dem Taucher sich jederzeit über die Sauerstoffkonzentration im Atemkreislauf seines Tauchgerätes zu vergewissern. Damit können nicht nur hypoxische sondern auch hyperoxische Verhältnisse angezeigt werden. Moderne Gerätekonfigurationen sind zudem in der Lage über die Sauerstoffmessung den verbliebenen Inertgasanteil im Atemgas zur Dekompensationsberechnung zu nutzen. Auch wenn die vom Hersteller für die jeweiligen Nitroxgemische empfohlenen Gasflowraten für normale Tauchsituation bei weitem ausreichen und nicht zu kritischen Sauerstoffverhältnissen im Atemkreislauf führen, erhöht ein derartiges Überwachungssystem die Tauchsicherheit eines SCR-Tauchers erheblich. Das Sauerstoffmonitoring muss daher als unverzichtbarer Bestandteil bestehender SCR-Geräte und als Vorstufe einer intelligenten Gerätekonfiguration zur Ausschaltung der Gefahrenquelle „human error“ angesehen werden.

Literatur

ELLIOTT, D.H. (1996). Advanced Recreational Diving. Some Hazards of Nitrox & Technical Diving. Unveröff. Manuskript.

HARRIES, M. (1996). Why asthmatics should be allowed to dive. In: ELLIOTT D.H.; KENSINGTON, M.D. (Hrsg.) Are asthmatics fit to dive? Undersea & Hyperbaric Medical Society.

LANPHIER, E.H.; CAMPORESI, E.M. (1993). Respiration and exertion. In: BENNETT, P.B.; ELLIOTT, D.H. (Hrsg.). The Physiology and Medicine of Diving. London.

LÜCHTENBERG, D. (2000). Rebreather Tauchen. Aachen.

LONCAR, M; ÖRNHAGEN, H. (1996). Testing the performance of rebreathers. In: South Pacific Underwater Medicine Society, Annual Meeting.