

Veränderung des intrathorakalen Blutvolumens und der Oxidationspotentiale unter hyperbaren Bedingungen.

Schedler, O.¹; Dix, E.²; Leunert, K.¹

¹Maritimer Medizinischer Verbund, Fürstenwalder Chaussee 27H, 15526 Bad Saarow, ²Tauchclub Berlin e.V., Westphalweg 10, 12109 Berlin

Zusammenfassung: In einem Casereport wird der Einfluss von Überdruck und Sauerstoff während einer hyperbaren Exposition auf das intrathorakale Blutvolumen (ITBV) und auf den oxidativen Stress an einem freiwilligen Probanden gemessen. Mit zunehmenden Überdruck reduziert sich das ITBV um 100 ml/bar. Das Herzzeitvolumen nimmt um 1L/min/bar ab. Das extravaskuläre Lungenwasser (EVLW) steigt um 15 ml/bar an. Durch einer hyperbaren Oxygenation erhöht sich die totale antioxidative Kapazität exponentiell um 30 µmol/l7bar, wobei keine Erhöhung des oxidativen Stress (TOS) wahrzunehmen ist.

Einleitung:

Die Veränderungen des thorakalen Blutvolumens spielen in die Physiologie und Pathophysiologie dysbaren Umgebungsbedingungen für die medizinische Interpretation der humanen Leistungsfähigkeit eine entscheidende Rolle. Während in hyperbaren Umgebungsbedingungen das intrathorakale Volumen abnehmen und eine Lungenödem induzieren soll, steigt es in hypobaren Umgebungsbedingungen scheinbar an [4, 5]. Diese physiologischen Erscheinungen beeinflussen die medizinische Tätigkeit in der Tauchmedizin als auch in der Flug- und Raumfahrtmedizin.

Das intrathorakale Blutvolumen wird mittels der transpulmonalen Thermodilution bestimmt und definiert sich als intrathorakales Thermovolumen (ITTV) mit dem Produkt aus Herzzeitvolumen und mittlerer Transitzeit ($ITTV = HZV \times MTt$). Die Multiplikation der exponentiellen Abfallzeit (DSt) mit dem Herzzeitvolumen (HZV) ergibt das pulmonale Thermovolumen (PTV). Das intrathorakale Thermovolumen subtrahiert durch das pulmonale Thermovolumen ergibt das globale enddiastolische Volumen. Das intrathorakale Blutvolumen wird aus dem globalen enddiastolischen Volumen (GEDV) und dem Faktor 1,25 errechnet, weil das intrathorakale Blutvolumen gleichbleibend 25% höher als das globale enddiastolische Volumen ist [1]. Das berechnete intrathorakale Blutvolumen (ITBV) wird vom intrathorakalen Thermovolumen (ITTV) subtrahiert, um das extravaskuläre Lungenwasser (EVLW) zu erhalten. Das extravaskuläre Lungenwasser dient der Quantifizierung eines Lungenödems [2].

Dysbare Umgebungsbedingungen sind Änderungen des Barometerdruckes über den normalen atmosphärischen Druck in Meeresspiegelhöhe hinaus. Der niedrigste auf Meeresniveau umgerechnete Luftdruck in Deutschland betrug am 27. November 1983 in Emden 954,4 hPa [3]. Der höchste Luftdruck in Deutschland wurde mit 1060,8 hPa am 23. Januar 1907 in Greifswald gemessen [3].

Eine Überproduktion von Sauerstoffradikalen oder ein unzureichender antioxidativer Abwehrmechanismus können in oxygenierten hyperbaren Umgebungsbedingungen zu metabolischen Ungleichgewichten führen, weshalb die Bestimmung des oxidativen Status für die medizinische Diagnostik und Forschung von Bedeutung ist. Die eingesetzten Methoden erlauben die Erfassung der radikalvermittelnden Effekte. Der Totale oxidativer Status (TOS) erfasst die gesamte Lipid- und Hydroperoxide, welche eine direkte Korrelation zwischen den freien Radikalen und Peroxiden ermittelt. Somit gibt der TOS über das Ausmaß der oxidativen Belastung Auskunft. Der

Totale antioxidativer Status (TAS) beschreibt die Kapazität des Plasmas, Peroxide (Reaktionsprodukte von relativen Sauerstoffverbindungen) zu beseitigen und stellt damit ein Verfahren zur Erfassung des antioxidativen Schutzsystems dar. Mit der antioxidativen Kapazität wird das durch Antioxidantien verbrauchte Wasserstoffperoxid bestimmt.

Material und Methoden:

Für die Untersuchung wurde ein gesunder Proband rekrutiert, welcher freiwillig an der Prozedere teilgenommen hat. Neben ausführlicher Informationen und Beratungen wurde eine schriftliche Einverständniserklärung und eine Verzichtserklärung unter juristischer Führung vorgenommen.

Anschließend wurde der Proband (1,86 m/85 kgKM; BMI 24,6, BSA 2,1m²) mittels arterieller und venöser Gefäßzugangstechnik in Lokalanästhesie mit einem Katheter in der Arterie radialis links (PiCCO) sowie einem zentralen Venenkatheter (ZVK) der Vena jugularis rechts mit Temperaturmessanschluß versorgt. Die Lagekontrolle erfolgte elektrokardiographisch.

Für die hyperbare Exposition kam eine 4-Personen Überdruckkammer zur Anwendung. Die Messungen wurden unter 1 Atmosphäre (1bar) begonnen und schrittweise mit Überdruck bis 3,4 bar durchgeführt. Gleichzeitig wurden mit Einverständnis des Probanden zu jedem Druckniveau eine venöse Blutprobe abgenommen. Zur Bestimmung des Total oxidativen Status (TOS) und des totalen antioxidativen Status (TAS) wurden die Proben zentrifugiert und die serologischen Untersuchungen im Plasma durch Immundiagnostik Bensheim bestimmt.

Der Tauchgang wurde von einer Notärztin und Rettungstaucherin sowie einem Rettungssanitäter in der HBO geleitet. Zusätzlich standen ein Druckkammerarzt, ein Druckkammerfahrer sowie die Druckkammertechniker zur Verfügung.

Ergebnisse:

Alle erhobenen hämodynamischen Parameter wurden durch mindestens 3 Thermodilutionsmessungen bestimmt. Es bestand bei allen Insassen der Kammerfahrt subjektives Wohlbefinden. Es gab zu keiner Zeit eine medizinische Beeinträchtigung. Während der Messungen befand sich der Monitor des PiCCO Gerätes außerhalb der Überdruckkammer.

Tabelle 1: Ergebnisse der transpulmonalen Thermodilution in hyperbaren Umgebungsbedingungen

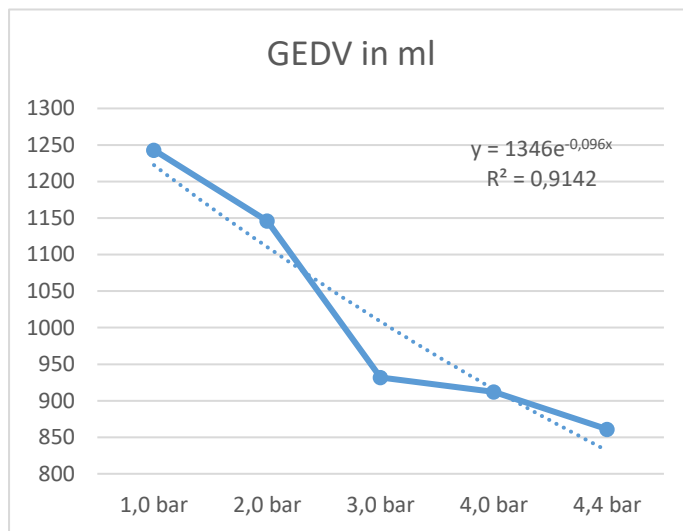
Umgebungsdruck	ITBV in ml	GEDV in ml	EVLW in ml	HZV in l/min
1,0 bar	1554	1243	382	7,2
2,0 bar	1433	1146	391	6,9
3,0 bar	1165	932	411	5,6
4,0 bar	1140	912	420	4,5
4,4 bar	1076	861	513	3,8

Tabelle 2: Indexwerte Hämodynamik

Umgebungsdruck	GEDI in ml/m ²	ELWI in ml/kg	HI in l/min/m ²
1,0 bar	592	4,5	3,4
2,0 bar	546	4,6	3,3
3,0 bar	444	4,8	2,7
4,0 bar	434	4,9	2,2

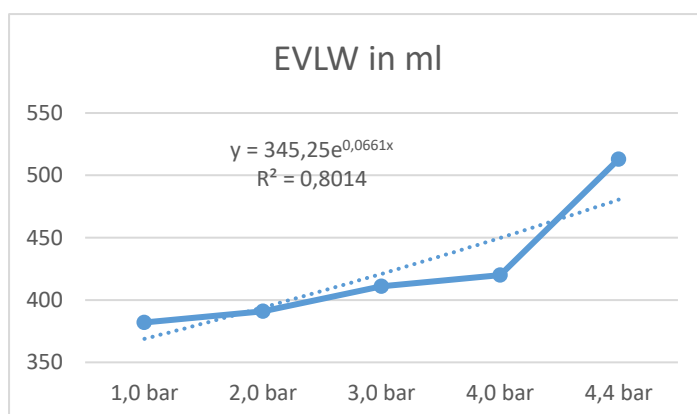
4,4 bar	410	6,0	1,8
---------	-----	-----	-----

Abbildung 1: Verlauf des globalen enddiastolischen Volumens (GEDV) in hyperbarer Exposition



Global enddiastolische Index (GEDI) Werte von 680 ml bis 800 ml/m² gelten als Normwertbereich. In der GEDV Funktion reduziert sich, um einen Ausgangswert von 1346 ml, das Volumen exponentiell um den Faktor -0,096. Das Bestimmtheitsmaß bestätigt den Verlauf der Funktion als Exponentialfunktion mit 91,4 % Übereinstimmung.

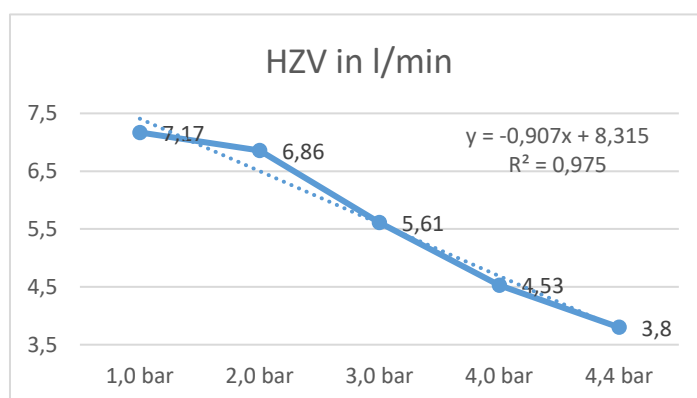
Abbildung 2: Verlauf des extravaskulären Lungenwassers (EVLW) in hyperbarer Exposition



Extravaskuläre Lungenwasserindex (ELWI) von 3 bis 7 ml/m² gelten als Normwertbereich. In der EVWL Funktion steigt, um einen Ausgangswert von 345 ml, das Volumen exponentiell um den Faktor 0,066 an. Das Bestimmtheitsmaß bestätigt den Kurvenverlauf des EVWL als Exponentialfunktion mit 80% Übereinstimmung.

Abbildung 3: Verlauf des Herzzeitvolumens (HZV) in hyperbaren Exposition

Herzindexwerte (HI) von 3-5 l/min/m² gelten als Normwertbereich. In der HZV Funktion reduziert



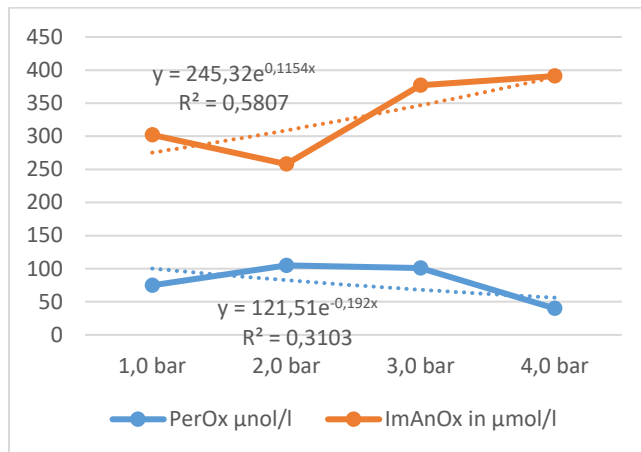
sich, um einen Ausgangswert von 8,3 l/min, das Volumen linear um den Faktor -0,907. Das Bestimmtheitsmaß bestätigt den Verlauf der Funktion als Linearfunktion mit 97,5 % Übereinstimmung.

Tabelle 3: Oxidations- und Antioxidationsmessungen

Umgebungsdruck	TOS $\mu\text{mol/l}$	TAS in $\mu\text{mol/l}$
1,0 bar	75	302
2,0 bar	105	258

3,0 bar	101	377
4,0 bar	40	391

Abbildung 4:



Kalorimetrisch bestimmte TOS (Perox) Messwerte $<200 \mu\text{mol/l}$ zeigen keinen oxidativen Stress an. Bei erhöhten TOS (Perox) Spiegeln $>350 \mu\text{mol/l}$ besteht eine oxidative Stressbelastung. Ein TAS Spiegel (ImAnOx) von $>320 \mu\text{mol/l}$ wird als gute antioxidative Kapazität gezeichnet. TAS (ImAnOx) Messwerte unter $280 \mu\text{mol/l}$ werden als geringe antioxidative Kapazität beschrieben.

Diskussion:

Mittels transpulmonaler Thermodilution ist die Messung des intrathorakalen Blutvolumens unter hyperbaren Umgebungsbedingungen bei spontanatmenden Probanden möglich. Mit zunehmenden Überdruck reduziert sich im Median das intrathorakale Blutvolumen um 100 ml/bar (MW $119 \pm 106 \text{ ml StabW}$) und unterschreitet als GEVI den Normwertbereich von 680 ml/m^2 . Gleichzeitig erhöht sich im Median das extravaskuläre Lungenwasser um 15 ml/bar (MW $33 \pm 40 \text{ ml StabW}$) und es reduziert sich das Herzzeitvolumen um $1 \text{ Liter/Minute/bar}$ (MW $842 \pm 14 \text{ StabW}$) bei einem spontanatmenden Probanden in einer Überdruckkammer. Da bei Spontanatmung in einer Druckkammer ändert sich der alveoläre Druck entsprechend des Umgebungsdruck und entspricht dem Kammerdruck. Somit entstehen alveoläre Gasdistributionen mit einer Verschiebung des Blutvolumens nach extravaskulär und in die peripheren Kompartimente. Durch die Volumenverschiebung nach extrathorakal reduziert sich auch das zirkulierende intrapulmonale Volumen, was an der Reduzierung des HZV abzulesen ist.

Diesen Volumenaspekt wird durch die pulmonale Vasodynamik, welche durch die vasoaktiven Eigenschaften der Sauerstoffatmung zusätzlich verstärkt wird, unterstrichen. Der kalkulierte alveoläre Sauerstoffpartialdruck unter hyperbarer Sauerstoffatmung beträgt bei 1 bar Überdruck 1438 mmHg (192 kPa), bei 2 bar Überdruck 2198 mmHg (293 kPa), bei 3 bar 2958 mmHg (394 kPa) und bei 3,4 bar Überdruck 3262 mmHg (435 kPa). In Abhängigkeit des alveolären Sauerstoffpartialdruckes ($p_{\text{A}}\text{O}_2$) sowie des gemischtvenösen Sauerstoffpartialdruckes ($p_{\text{vA}}\text{O}_2$) ist mit einer Reduzierung des mittlere pulmonalarteriellen Mitteldruckes und des pulmonalarteriellen Widerstandes zu rechnen.

Berücksichtigt man die oxidativen und antioxidativen Potentiale der Sauerstoffatmung in einer Überdruckkammer im Zusammenhang mit den entstehenden Sauerstoffpartialdrücken, ist die Annahme einer Verschiebung der Redoxpotentiale anzunehmen. Mit zunehmender hyperbarer

Sauerstoffatmung steigert die totale antioxidative Kapazität, als Reaktion auf die Hyperoxie an. Eine Sauerstoffatmung bis 3,4 bar zeigt keinen metabolischen oxidativen Stress.

Diese Ergebnisse zeigen die hämodynamischen Auswirkungen einer Überdruckbehandlung. Reduziert intrathorakale enddiastolische- und Herzzeitvolumen mit dem Anstieg des extravaskulären Lungenwassers zeigen die distributiven Auswirkungen des Überdruckes an. Durch einen erhöhten Sauerstoffpartialdruck bis 3,4 bar erhöhen sich die antioxidativen Kapazitäten ohne einen Anstieg der oxidativen Stressfaktoren.

Für den Tauchsport haben diese Erkenntnisse nur für den Gerätetauchen eine Konsequenz, da entsprechend der Atemphysik der Umgebungsdruck als Beatmungsdruck auf die intrathorakalen Organe wirkt. Im Apnoetauchsport gelten die Gesetze der Atemphysik nicht, so dass daher Messungen des intrathorakalen Volumens bei Immersion und Submersion die Quantität und Qualität der Volumenverschiebungen klären können.

Literatur:

- [1] Sakka SG et al. Assessment of cardiac preload and extravascular lung water by single transpulmonary thermodilution. *Intensive Care Med* 2000; 26(2): 180-187
- [2] Katzenelson R et al. Accuracy of transpulmonary thermodilution versus gravimetric measurement of extravascular lung water. *Crit Care Med* 2004; 32(7): 1550-1554
- [3] [Wetterrekorde](#) Publikation des [DWD](#)
- [4] Abel FL, McNamee JE, Cone DL, Clarke D, Tao J. Effects of hyperbaric oxygen on ventricular performance, pulmonary blood volume, and systemic and pulmonary vascular resistance. *Undersea Hyperb Med.* 2000 Summer;27(2):67-73. PMID: 11011796.
- [5] Obiagwu C, Paul V, Chadha S, Hollander G, Shani J. Acute pulmonary edema secondary to hyperbaric oxygen therapy. *Oxf Med Case Reports.* 2015 Feb 4;2015(2):183-4. doi: 10.1093/omcr/omv002. PMID: 25988073; PMCID: PMC4370014.