

HYPOXIE
HYPERVENTILATION
ATMUNG

Johannes Koenig Schwerewelle Treffen 2023

PROLOG

Für die Ermahnungen [das Thema ernst zu nehmen](#) möchte ich auf die zahlreichen Artikel zum Thema verweisen. Man erinnere sich auch immer wieder an eigene Erfahrungen, die **noch einmal glimpflich** abgelaufen sind - was ja durch die Anwesenheit bei diesem Treffen bewiesen ist.

Auslöser für diesen Vortrag ist der Artikel in Segelfliegen Nr. 4/2022 zum CO₂ Defizit im Blut und die Aufarbeitung dazu (1).

Ich will deshalb in diesem Vortrag nur auf die Vorgänge bei der Atmung höhenabhängig eingehen – für Ausrüstung siehe z.B. [Björn Köhnke's Vortrag](#).

Am Ende findet Ihr eine Zusammenstellung verwendeter Quellen.

Segelfliegen Nr. 4/2022 – „Problematisches CO₂ – Defizit im Blut“

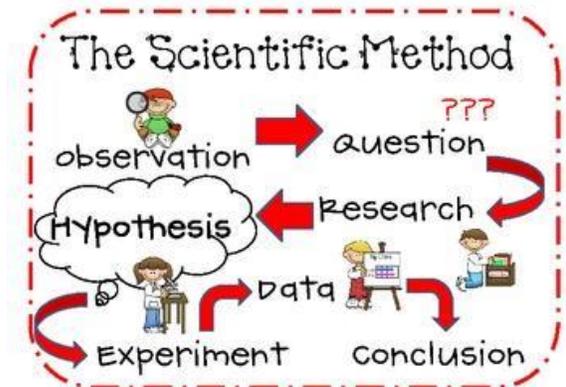
Ihr habt den Artikel (1) vielleicht (hoffentlich 😊) gelesen.

Ich hatte mir schon länger überlegt – wenn schon der Atemreflex durch die Anhäufung von CO₂ ausgelöst wird, dann kann es hilfreich sein mit der O₂ Zudosierung einen Teil der abgeatmeten Luft rückzuatmen. Dazu habe ich nur den Luftstrahl aus der Nase mit einem Schal abgebremst (Foto 8000m 2019 Argentinien).

Das habe ich sehr angenehm empfunden, die Luft ist wärmer, feuchter, und die Atmung wird subjektiv empfunden gleichmäßiger. Das erzähle ich herum ob es einer wissen möchte oder nicht.

Auf den Artikel (1) hin habe ich einen Leserbrief mit meinem Beitrag „rückatmen“ geschrieben, der in Nr. 5/2022 abgedruckt wurde.

Der Artikel und Rücksprache mit Heini Schaffner haben mich zum Thema CO₂ Abatmen neugierig gemacht.



Atmung - Begriffe

Hypoxie oder **Sauerstoffmangel** bezeichnet eine den ganzen Körper eines Lebewesens oder Teile davon betreffende Mangelversorgung mit Sauerstoff. **Hypoxidose** bezeichnet Sauerstoffmangel der inneren Atmung

Bei einer **Hyperventilation** (von altgriechisch ὑπέρ *hypér*, deutsch ‚über‘ und lateinisch *ventilare* ‚fächeln‘) handelt es sich um eine gesteigerte Belüftung der Lungen. Sie geht mit einer Abnahme des Kohlenstoffdioxid-Partialdruckes (CO₂) und einem pH-Anstieg (respiratorische Alkalose) im Blut einher.

äußere Atmung oder Gasaustausch: passive und aktive Vorgänge des Austauschs von Sauerstoff und Kohlendioxid mit der Umgebung durch die Lungen.

innere Atmung ist die Biochemie der Zellatmung (O₂-Diffusion, Mitochondrien = Zellkraftwerke)

Als **Apnoe** (apnoia, griech. = Nicht-Atmung) wird das **Aussetzen der Atmung** bezeichnet. Der Atemstillstand kann wenige Sekunden oder bis zu mehreren Minuten dauern und führt zu einem Sauerstoffmangel im Blut.

Unter einer **Hypokapnie** versteht man einen **herabgesetzten Kohlendioxid-Partialdruck im arteriellen Blut**. Eine Hypokapnie entsteht zum Beispiel im Rahmen einer Hyperventilation durch vermehrte Abatmung von CO₂.

Atmung bedeutet im wesentlichen:

(nur wichtig: in Summe ist das Ganze komplex, im Resultat aber sehr einfach)

(Wiki Zitat) Bei der aeroben Atmung wird Sauerstoff benötigt. Im Normalfall werden organische Verbindungen wie Kohlenhydrate oder Fettsäuren oxidiert und Energie in Form von [ATP](#) (Zell-Kraftstoff) gewonnen. Dabei folgen drei Teilprozesse der inneren Atmung aufeinander: die [Glykolyse](#), der [Citratzyklus](#) und die [Elektronenübertragung](#) in der [Atmungskette](#), wobei O₂ der terminale Elektronenakzeptor ist. Wesentliche Teilschritte der Glykolyse und des Citratzyklus sind drei verschiedene [oxidative Decarboxylierungen](#), bei denen Kohlendioxid freigesetzt wird und [Reduktionsäquivalente](#) in Form von [NADH](#) gewonnen werden, die der Atmungskette (in den Mitochondrien) zugeführt werden. Wenn – wie zumeist – [Glucose](#) als Substrat genutzt wird, dann lautet die Summengleichung:



Für jedes eingeatmete O₂ muß also genau ein CO₂ abgeatmet werden, auch ein H₂O darf abgeatmet werden. Im Prinzip wie z.B. beim KFZ: Sprit + Sauerstoff gibt Energie + Kohlendioxid + Wasser.

Atmung ist ein Gasaustausch, O₂ ist nur ein Teil davon!

typische Konzentrationen bei Normaldruck:

eingatmet	Gas	ausgeatmet
21%	Sauerstoff	17%
0,04%	Kohlendioxid	4%

(Wiki Zitat) **Physikalische Grundlagen: Diffusion**

Diffusion ist ein [physikalischer](#) Vorgang des Konzentrationsausgleichs von Stoffen unterschiedlicher Konzentration durch thermisch bedingte [Molekularbewegung](#).^[5] Diese erfolgt von Bereichen mit höherer [Konzentration](#) zu Bereichen mit niedrigerer Konzentration entlang eines [Konzentrationsgradienten](#).^[6]

Die Transportrate beziehungsweise Transportgeschwindigkeit wird durch die Diffusionsgesetze nach [Adolf Fick](#) beschrieben:

Laut dem [Ersten Fickschen Gesetz](#) ist dabei die Transportrate, also die Veränderung der Stoffmenge (dQ_s) nach der Zeit (dt), proportional zur Austauschfläche A und **proportional zum Konzentrationsgradienten**, welcher für Gase wie beim Fall der Atmung auch als **Partialdruckgradient** (dp/dx) beschrieben werden kann. Ein weiterer entscheidender Faktor ist der Krogh-[Diffusionskoeffizient](#) K , welcher das Produkt aus dem Löslichkeitskoeffizienten α und dem Diffusionskoeffizienten D bildet:^[7] (Zitat Ende)

Wir betrachten bei der Höhenatmung insbesondere den Druckgradienten zwischen den Partialdrücken innen (bleiben im wesentlichen unverändert) und einen verminderten Außendruck (in 5500m etwa halb so hoch als bei 0m).

Geht man davon aus, daß das Atmungssystem „*zu Hause auf ein paar 100m Höhe*“ ausgeglichen funktioniert, sich also die O₂ Zuatmung und die CO₂ Abatmung in einem gut balancierten Zustand befindet, dann ist bei 5500m ganz pauschal die

Zuatmung halb so gut, aber die Abatmung bleibt!

Die Balance zwischen Zuatmung und Abatmung geht verloren.

Deshalb muß Sauerstoff zudosiert werden, wenn man nicht ausreichend akklimatisiert ist wie kluge Bergsteiger und Tibeter.

Jetzt muß man noch wissen, daß unser Körper nicht den Sauerstoff Zustrom regelt, sondern im Wesentlichen das Abatmen des CO₂.

Das bei der Bereitstellung von Energie erzeugte CO₂ ist chemisch „sauer“, d.h. CO₂-Abatmung korrigiert den pH-Wert des Blutes in Richtung „alkalisch“.

Der körpereigene Regelkreis stabilisiert den pH Wert des Blutes durch Abatmen des CO₂ (grob vereinfacht). Das kann man als „Autoregulation der Atmung“ bezeichnen.

Wenn also euer EDS anfängt zu piepen, weil ihr zu atmen aufgehört habt (Apnoe) liegt das daran, daß das abzuatmende CO₂ weg ist.

Das EDS muß für die O₂ Zudosierung Annahmen machen:

- „Standardatmung“: 10-12 Atemzüge mit je 0,5l, 6l /min
- „Druck höhenabhängig“ barometrische Höhenformel
- „O₂ Versorgungsdruck“ durch Druckregler vorgegeben

damit wird die Öffnungszeit des Ventiles gesteuert.
(Messungen siehe Schaffner/Clement (5))

Das MH-EDS hat keine Information darüber **wiev**iel Luft dabei ein- und ausgeatmet wird (systembedingt).

Die abgegebenen O₂-Mengen des EDS ergeben für den 70 kg-Normpiloten einen ausgeglichenen Sauerstoff-Haushalt (Tabelle rechts).

Spalten:

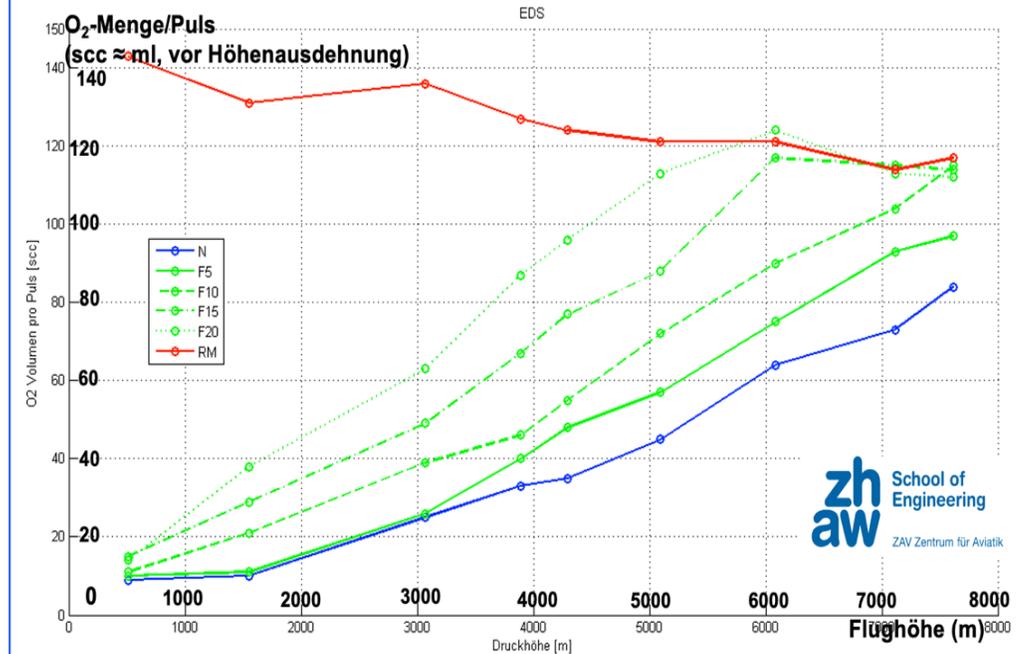
Druck in hPa, Partialdruck O₂ in hPa

ml O₂ [F15] dosierung O₂ in milli liter [ml]

in einem 0,5l Atemzug Luft enthaltenes O₂ in [ml]

total: Summe aus Dosierung und Luft

CO₂?



Höhe [ft]	Höhe [m]	Druck	P - O ₂	ml O ₂ [F15]	ml O ₂ 0,5l	total
0	0	1013	213		105	105
1500	457	960	202	10	100	110
5000	1524	842	177	20	87	107
10000	3048	696	146	40	72	112
15000	4572	570	120	60	59	119
20000	6096	465	98	85	48	133
25000	7620	375	79	120	39	159
30000	9144	300	63	120	31	151

ABER – wir alle machen Episoden von periodischer Atmung ab 2'500 m, gekennzeichnet durch Atempausen (Apnoen), Sprechen, Mundatmung und anschließender Überatmung ([Cheyne-Stokes googeln](#)).

Messungen aus Clement (5)
10 Minuten Screenshot:

grün: O₂-Sättigung (%), aufsteigend = Hyperventilation; abtauchend = Apnoe
blau: über 20 sec gemittelte Pulsfrequenz

O₂-Sättigungsvariationen sind auf Apnoe und Hyperventilation zurückzuführen.

Mit dem registrierenden Pulsoxymeter kann CO₂ dabei leider nicht gemessen werden.

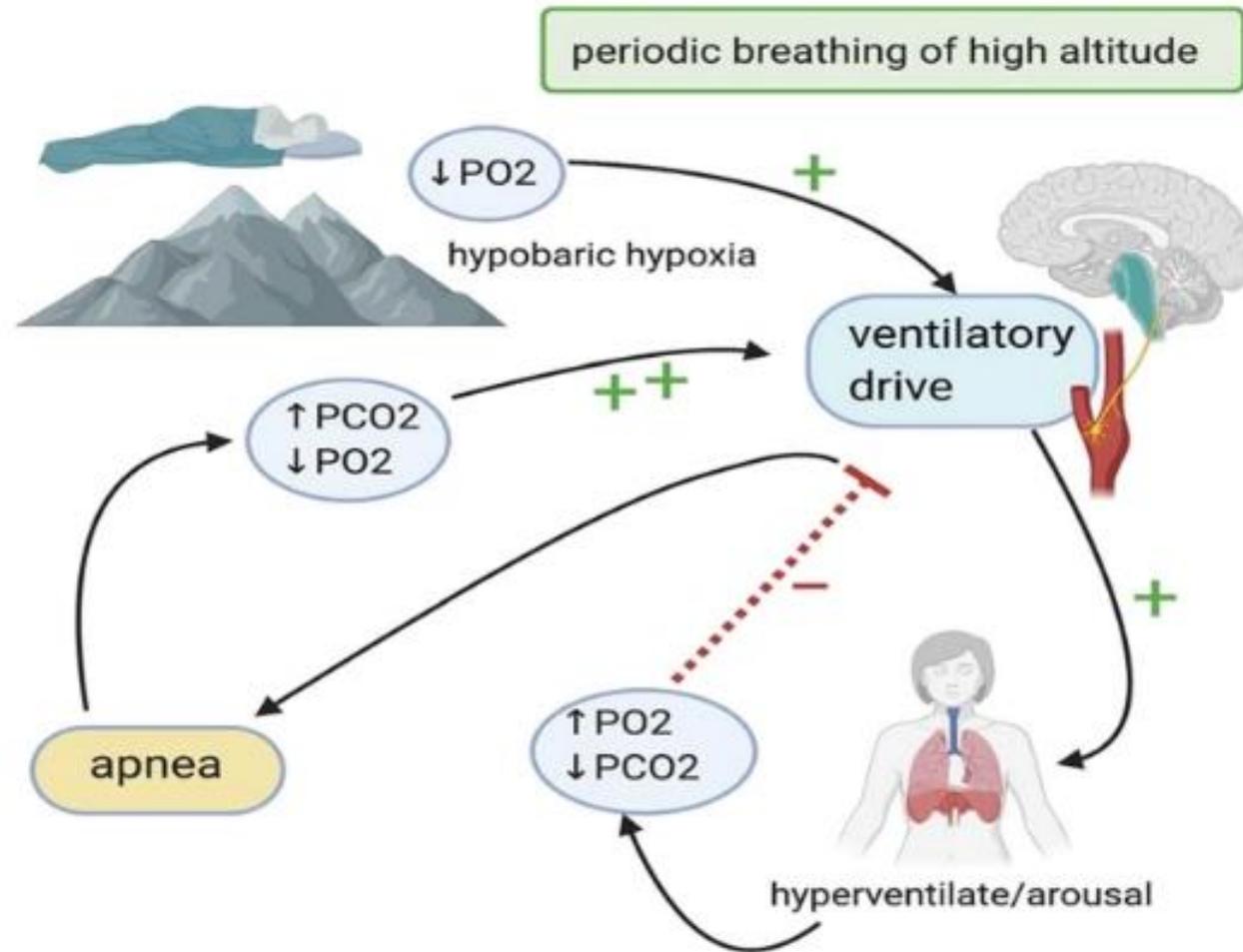


Eine email Rückfrage an Mountain High hat keine Bereitschaft zu möglichen Verbesserungen erkennen lassen (wer macht mit bei einem Arduino Projekt?)

Fig. 1 An overview of the mechanisms underlying periodic breathing at altitude. *Created with BioRender.com*

aus D.Venkat (10)

in der Höhe kommt dazu, daß beim Hyperventilieren nach einer Apnoe im Verhältnis zuviel CO₂ abgeatmet wird, was die darauf folgende Apnoe bewirkt.



Was macht das CO₂ sonst noch mit uns?

hier begann für mich Neuland – ausgelöst durch den Artikel von Peter Allegrini et.al. ...

aus McKeown (9, S.21):

Die Atmungssteuerung stabilisiert auf 5 % CO₂, beziehungsweise einen CO₂-Partialdruck von 40mmHg in den Lungen. Wenn wir mehr atmen als nötig, dann geht zuviel CO₂ verloren. Ein übermäßiger Verlust von CO₂ aus den Lungen führt zu einem niedrigeren CO₂-Anteil im Blut, im Gewebe und in den Zellen (Alkalose).

Die Freigabe des Sauerstoffes aus den roten Blutkörperchen hängt vom sogenannten Kohlendioxid-Partialdruck ab, also dem Kohlendioxidanteil in den Lungen beziehungsweise im arteriellen Blut. Bei Überatmung wird zu viel Kohlendioxid aus dem Körper abtransportiert. Dieser Mangel an Kohlendioxid führt dazu, dass der Sauerstoff am Hämoglobin (das ist der Blutfarbstoff in den roten Blutkörperchen) „kleben bleibt“. Er kann nicht mehr ausreichend an die Gewebe und Organe abgegeben werden. Dieser Zusammenhang wurde 1904 entdeckt. Er ist als [Bohr-Effekt](#) bekannt.

Was bedeutet das für unsere Fliegerei?

die wesentlichen Zusammenhänge sind in Peter Allegrinis Artikel gut beschrieben:

CO₂-Mangel im Blut führt zur Behinderung der O₂-Abgabe am Zielort mit allerlei gefährlichen Nebeneffekten – **bis hin zur vollkommenen Fluguntauglichkeit!** [Bohr-Effekt](#)

Ärzte (z.B. [Mc Keown](#), Hinweis durch einen befreundeten Lungenfacharzt) stellen einen Zusammenhang zwischen periodischer Atmung und verschiedensten Beschwerden her. Es ist gefährlich durch zuviel Atmen (durch Nase oder Mund) zuviel CO₂ abzuatmen. Das passiert bei Stress automatisch und schnell und hat Folgen. CO₂ wird deshalb in Rettungsfahrzeugen mit einem handlichen Meßgerät „[Kapnograph](#)“ überwacht.

Stöbert in diesbezüglicher Literatur!

Der „circulus vitiosus“ aus Peter Allegrinis Artikel ist in den Daten offensichtlich.

Diese Thematik ist bei der Höhenfliegerei besonders zu beachten, weil durch das EDS systembedingt nur bei gleichmäßig ruhiger Atmung die O₂-CO₂ Balance gegeben ist.

hier hat mich mein Freund Dylan aus Frankreich besucht, selbst Arzt und mir beim suchen geholfen:

„It is suggested that aviators could increase the tension of the CO₂ in the air inhaled if the gas masks supplying oxygen, which they wear at considerable altitudes, were so constructed that a portion of the expired air was rebreathed.“

So etwas kann man sogar kaufen und heißt



Aviation and Hypocapnia.

Foreign Title : L'hypocapnie de l'aviateur.

Author(s) : [Bergeret, P. M.](#)

Journal article : [Revista de Service Sante Militar](#) 1939 pp.293-315 ref.28

Abstract : The condition of *hypocapnia*, or reduction of carbon dioxide in the blood, is due to the increased pulmonary ventilation which occurs when the atmospheric pressure is reduced. It is therefore experienced by aviators, and has important effects on the organism, especially in respect of the acid-base equilibrium. Hypocapnia is closely connected with the anoxaemia produced by the lowered oxygen tension of the atmosphere, and the author adduces some experimental evidence of his own upon the pulmonary ventilation and the alveolar tensions of CO₂ and O₂, which were induced by breathing a mixture of air and nitrogen corresponding to an altitude of 3, 000 to 8, 000 metres. Parallel tests have been made by other investigators on aviators during flight. The author discusses the effects of hypocapnia on the production of mountain-sickness, a condition of great practical importance to the aviator, and the means of remedying it. It has long been known that the addition of CO₂ to the air inhaled is advantageous, and AGGAZZOTTI found that when the air pressure in a decompression-chamber was lowered to the equivalent of an altitude of 13, 000 metres, he could breathe air containing 13 per cent. of CO₂ without discomfort. It is suggested that aviators could increase the tension of the CO₂ in the air inhaled if the gas masks supplying oxygen, which they wear at considerable altitudes, were so constructed that a portion of the expired air was re-breathed. *H. M. Vernon.*

Record Number : 19402700087

Language of text : [not specified](#)

Indexing terms for this abstract:

Descriptor(s) : air transport, altitude, atmospheric pressure, carbon dioxide, effects, lungs, transport

Identifier(s) : barometric pressure, transportation

Ich habe nach dem Autor Bergeret gesucht und (12) mit dem Untertitel (The Unexplained Aircraft Accident) gefunden. 1959 – als Frankreich noch NATO war – wurde das zusammengeschrieben (z.T. französisch).

S.58 T.Lomonaco: La plupart des accidents d`aviation dépendent, comme vous le savez, du facteur humain.

Der Effekt von Hyperventilation wird in konkreten Fallstudien (S.102ff Powell et al, *Unconscious Episodes in Pilots During Flight*) nachgewiesen, sowohl bei Meldungen zu am Ende glimpflich abgelaufenen Fällen als auch in experimenteller Nachbearbeitung. In dieser Studie wurden Fälle von Hypoxie ausgeschlossen. Fast alle betroffenen Piloten waren bei den Gesundheitschecks für militärische Jetpiloten unauffällig und konnten nach einer nachhaltigen Aufklärung ihren Dienst fortsetzen.

Es kommt bei der Lektüre Aspekte hinzu:

1. auch das C im CO₂ muß irgendwo herkommen, es kommt aus dem Blutzucker. Wenn man sich schlampig ernährt führt das am Ende zu Risiken im Kohlenstoff Haushalt, d.h. der Blutzucker sackt ab mit Folgeproblemen: Es kann gar nicht genug CO₂ gebildet werden.
2. Wenn man schon hyperventiliert – oder auf andere Art die Gehirn Versorgung mit Energie vernachlässigt, dann wirken Beschleunigungen besonders fatal. Dann können 3G schon einen Totalausfall bewirken (ein normaler Looping macht etwa 4G). Also ein Erschrecken wegen kurz weggetreten und dann abfangen kann direkt zu Bewußtlosigkeit führen. Man kann diese **nicht** kontrollieren.

(12, S.111)

SUMMARY

Eight cases of unconsciousness or diminished consciousness while flying were investigated at the IAM Toronto during 1956. Five of these cases satisfied the criteria for the diagnosis of „physiological unconsciousness in medically fit aircrews“.

The factors seem to be:

1. Previous or concomitant G.
2. Hypoglycaemia occurring a few hours after a light carbohydrate meal.
3. Hyperventilation.

Also there seem to be associated:

4. Anxiety or anger.
5. Early slow EEG activity with hyperventilation

(Zitat Ende)

Punkt 5 wurde in den Nachuntersuchungen ermittelt, als die betroffenen Piloten in der Dekompressionskammer mit Beschleunigung und EEG untersucht wurden.

Eine Befragung unseres „alten Adlers“ (xxxx Stunden Starfighter) ergab als Antwort:

„wenn wir Unwohlsein bemerkten dann gaben wir uns 100% Sauerstoff.“

damit ist gemeint (12 Case 5 s.107):

... to operate the „press to test“ (he was on diluter-demand) take a deep breath and hold his breath ...
am Sauerstoff System. Das hat geholfen, aber nur kurz. Am Ende war Hyperventilation das wesentliche Problem.

Die Notsysteme, die wir mitführen sind leider eher für den Totalausfall des EDS gedacht. Sie sind nicht nachfüllbar und haben eine hohe Schwelle zum Benutzen. Vielleicht fällt uns etwas gescheites ein, wie wir aus der Flasche eine Tüte Sauerstoff zum direkt Einatmen bereitstellen können.

Doppelsitzig fliegen mit wirklich getrennt funktionsfähigen Überlebenssystemen wird helfen zu überleben.

Die Schlußfolgerung bei Bergeret aus 39 untersuchten Unfällen (12, S.148) lautet --- immer wieder aktuell:

(III) That still more detailed psychophysiological indoctrination be given to flying personnel than is the case at present. auf deutsch: seid besser informiert als jetzt und seid bewußt ... und paßt mit diesem Wissen auf Euch auf!

Es gibt einige aktuelle Initiativen zu Fly Safe – ich mache Werbung für FLYTOP (13)

Was wird uns im Verkehrsflieger jedesmal vorgeführt?

Ich habe mir ein Muster besorgt. Es ist eine constant-flow Maske, bei der der einzuatmende Vorrat O₂ in der Tüte gesammelt wird.

Ein federbelastetes Ventil zum Einatmen Umgebungsluft stellt sicher, daß immer zuerst das O₂ aus der Tüte eingeatmet wird, dann Umgebungsluft.

Damit wird die O₂ Zufuhr auch bei unregelmäßigem Atemzug im Mittel sichergestellt.

Ausgeatmet wird über ein weiteres Ventil an die Umgebung.

Etwas Rückatmung ergibt sich auch. Da hat sich jemand etwas dabei gedacht 😊.

Wenn es nur noch etwas weniger „provisorisch“ wäre...



EPILOG (reminder):

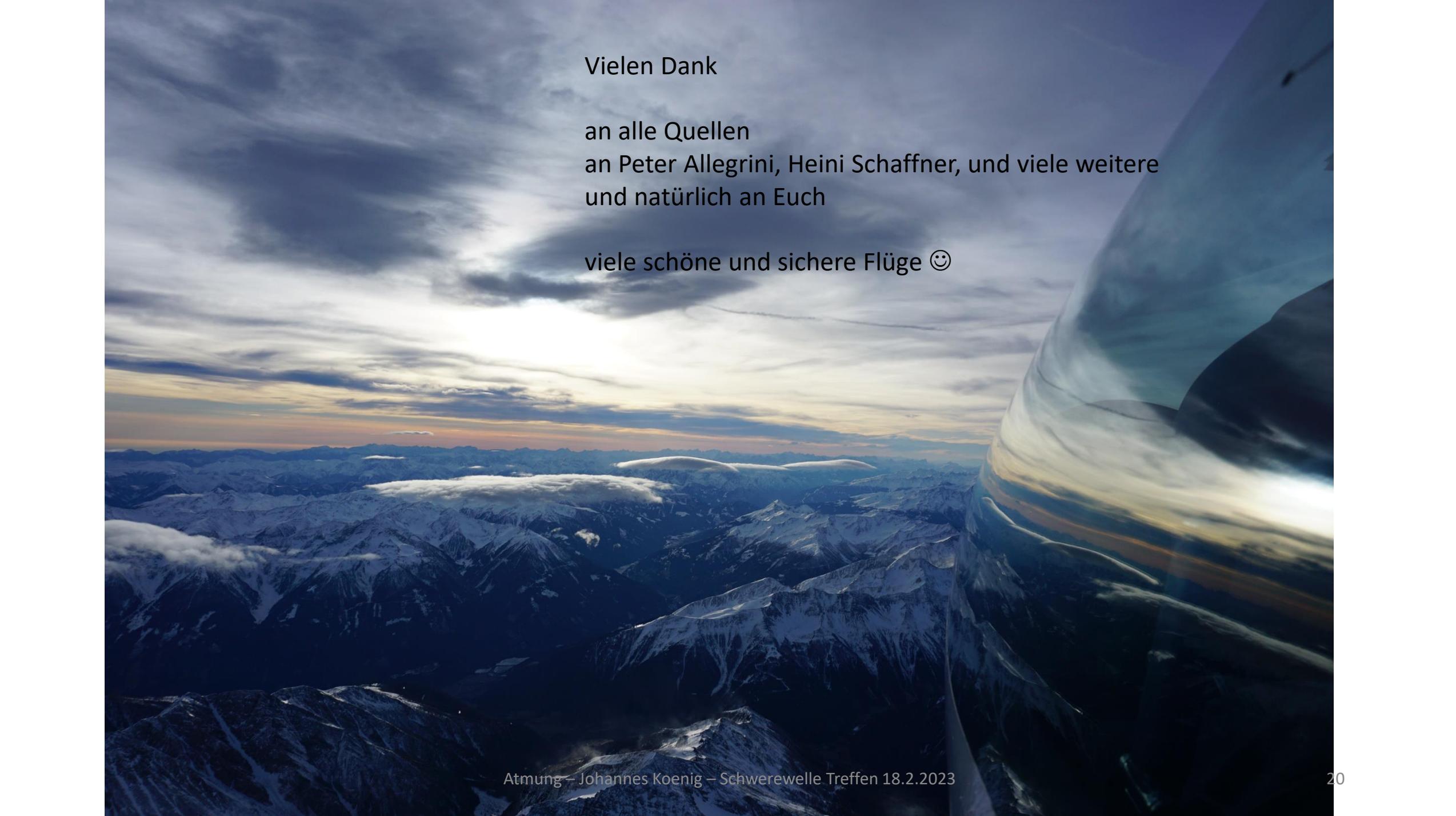
1. Vorbereitung: eigener Gesundheitszustand, ausgeschlafen, Ernährung!
EDS (v.a. Druckminderer) überprüft, regelmäßig eingeschickt.
2. Batterien SAFE halten, Schläuche SAFE verlegen, EDS am Körper warm halten.
3. Sauerstoff Flaschen über 50 bar halten.
4. ab andauernd 2500m – spätestens ab 3000m EDS einschalten.
Nasenatmung (sonst Maske), Nasenkanüle anlegen vor dem Start und korrekten Sitz prüfen mit Spiegel oder Kamerad. Kanülen müssen horizontal in Nase liegen
5. mir hilft einen Teil der ausgeatmeten Luft rückatmen.
6. ab 6000m redundantes Not-O₂- System einsatzbereit mitführen und zwei EDS, parallel verschlaucht verwenden.
7. Sauerstoff Sättigung regelmäßig (optimal: andauernd) messen.

!!! gleichmäßig atmen !!!

Jeden Ansatz von Unwohlsein, Kribbeln, unverzüglich ernst nehmen!

Wenn die Ursache nicht sofort geklärt werden kann:

!!! Notsauerstoff und Absteigen !!!



Vielen Dank

an alle Quellen

an Peter Allegrini, Heini Schaffner, und viele weitere
und natürlich an Euch

viele schöne und sichere Flüge 😊

Quellen

- Dr. Peter Allegrini (1) Problematisches CO₂ Defizit im Blut, Segelfliegen Nr 4/2022
Dr. med Heini Schaffner (2) Vigilanz durch Früh-Sauerstoff! (pdf, 2011, Segelfliegen Nr. 3/2014)
(3) Ueber Stress, Phobien, unbewusste Aengste, Hyperventilation und Panik,
die zu akuter Fluguntauglichkeit im Fluge führen können (pdf)
(4) Bis auf welche Flughöhe ist das EDS safe? (pdf, excerpt, s.a. „Dancing with the Wind“)
- Jean Marie Clement (5) „Dancing with the Wind“ Kapitel 12 (meine Ausgabe 2015)
sehr ausführliche und durch Messungen belegte Darstellung von/mit Heini Schaffner,
ein „**must read**“ für jeden Höhenflieger! (französisch und englisch, demnächst auch deutsch)
- Dr. Daniel Johnson (6) „Hypoxia, Hyperventilation, and Supplemental Oxygen Systems“
pdf aus Soaring – August 2018 – gute Zusammenfassung (englisch)
- OTA Dr. Pongratz (7) [Kompendium Flugmedizin Luftwaffe 2006](#) (sehr studierenswert!)
Patrick McKeown (8) „Erfolgsfaktor Sauerstoff“ und (9) „Angst, Stress und Panik wegatmen“
Dr. Knüppel (9) [Human Factors u. Flugmedizin](#)
- Divya Venkat et.al. (10) Effects of High Altitude on Sleep and Respiratory System, Springer 2021
Bergeret P.M. (11) l’hypocapnie de l’aviateur, Revista de Service Sante Militar, 1939 pp. 293-315 ref.28
Evrard, Bergeret et al (12) Medical Aspects of Flight Safety (The Unexplained Aircraft Accident), Pergamon Press 1959

diverse Wikipedia Artikel (links im Text)

<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/blutgase/9630> Blutgase

<https://flexikon.doccheck.com/de> suchen nach Atmung Höhenkrankheit Kohlendioxidtransport ...

http://www.letmodel.cz/23/file/LKMI_wave_briefing.pdf u.a. 2 Unfälle, die zu denken geben

www.doccheck.com/de/detail/videos/3234-was-bedeutet-der-kohlendioxidpartialdruck?

<http://physiologie.cc/V.5.htm#Perf>

alle pdf Artikel sind auf meiner web.de Cloud unter [schwerewelle2023](#) verfügbar.