

# Bis auf welche Flughöhe ist das EDS safe?

Autor: Dr. med. Heini Schaffner Alpenflieger AFG und APSV und alt Anästhesiologe FMH

## 1. Einleitung

Wellen-(Strecken-) fliegen findet zunehmend auch in die früher unproduktiven europäischen Winterpause der Segelflieger statt. Dabei werden die bei uns möglichen Maximalhöhen in Thermik deutlich und auch länger dauernd überflogen, was neue Restriktionen und leider auch zusätzlicher Gefahren schafft (Luftraumgrenzen, Kälte, reduziertes Vne, Sauerstoffmangel, etc.), welche der Segelflieger aber mit profunder Sachkenntnis und einer minutiösen Flugvorbereitung meistern sollte. In diesem Artikel geht es einerseits um die anerkannten Prinzipien einer genügenden Sauerstoffversorgung und andererseits um die intelligente Verwendung des inzwischen weit verbreiteten "Electronic Delivery System's" (EDS, in seinen diversen Ausführungen). Diese genialen «oxygen-flow divider» haben sich mittlerweile und glücklicherweise zum aktuellen Goldstandard für den Alpen-(Strecken-) Segelflug gemausert und dies nicht nur für hochgehende Wellenflüge, sondern auch für sämtliche mehrstündigen Alpenstreckenflüge in mittleren Höhen, d.h. unter- oder oberhalb der aktuellen EASA-Höhenlimiten (10'000 ft ab max. 30 min) vor imperativem Sauerstoffzusatz.

Einige erinnern sich noch an die Anfänge, wo für Höhenflüge mit dem Segelflugzeug voluminöse, schwere doch generös Sauerstoff spendende «diluter-demand»-Anlagen aus alten Armeebeständen, zusammen mit dichtsitzenden A-14 Masken aus WWII), in Segelflugzeugen eine Wiedergeburt erlebten. Würden diese je periodisch gewartet, geprüft und wegen ihres üppigen O<sub>2</sub>-Bedarfs nicht bloss im "stand-by"-Modus verwendet, so wäre punkto genügende Sauerstoffversorgung bis auf FL 300 eigentlich nichts einzuwenden. Doch ihre Verwendung für tagelange Alpen-(Wellen-) Streckenflüge erwies sich nicht nur als unkomfortabel, sondern auch als unzweckmässig, v.a. wegen der meist etwas luxuriösen O<sub>2</sub>-Zumischung zur angesogenen, dünnen Umgebungsluft (daher «diluter demand») bei gleichzeitiger Unmöglichkeit, den Sauerstoff aus der noch O<sub>2</sub>-reichen Ausatemungsluft wiederzuverwenden und dies bis heute noch bei limitierten Sauerstoffvorräten im Segelflugzeug. Daher oftmals deren unsinnige Verwendung, wie "oxygen-only when urgently needed" (d.h. nur grad zum medizinischen Überleben) oder mit der A-14-Maske im "stand-by"-Modus, oftmals bis zum erstmaligen Einnicken im Fluge. Dazu gehörte oft auch die äusserst liberale Befolgung der in Helvetien ab 1963 übernommenen und auch für den Segelflug verbindlich erklärten Höhenlimiten (FAR 91.211, 12'500 ft ab 30 min, immer ab 14'000 ft, doch erst ab 15'000 ft für Passagiere mit unbekannter med. Fitness). Diese heute in USA noch geltenden amerikanischen Vorschriften mögen evtl. für schnell fliegende, unpressurisierte Motorflugzeuge mit Kabinenheizung und vom Autopiloten gesteuert und mit viel "ram air" durch deren Kabinenlüftung, nicht aber für den wesentlich anspruchsvolleren, tagelangen Alpen- und Wellen-Streckenflug im kalten Segelflugzeug genügen.

Seither sind die Segelflugzeuge nicht nur zahlreicher und deutlich schneller unterwegs, doch mit dem dazu nötigen geringen Rumpfquerschnitt auch engräumiger geworden. Dabei noch genügend Platz für eine oder gar zwei grössere Sauerstoffflaschen zu finden, gehörte kaum je zu den primären Konstruktionszielen der Segelflugzeugbauer. Manchmal wird sogar der einzige, vorhandene O<sub>2</sub>-Flaschentunnel zweckentfremdend für die Unterbringung des Mückenputzerantriebs missbraucht.

Zudem muss der früher grosszügig verfügbare Luftraum heute immer öfters mit weiteren Luftraumbenutzern (Gleitschirme, Delta's, Drohnen und anderem, motorisiertem Fluggerät, etc.) geteilt werden, was leider auch die Kollisionsgefahr erhöht, sintemal für diese anderen Flugsparten (noch) kein FLARM-Obligatorium besteht. Seither hat auch das Durchschnittsalter der Aeronauten mit kostspieligem Fluggerät zugenommen und diese sind infolge des z.T. intensiven "opposing traffic" in wechselnden Höhen (z.B. am "parcours du combattant" im Sommer) und den vermehrten Erfordernissen der Flugsicherung optisch, akustisch, mental und konditionell auch stärker gefordert, wobei ihnen die moderne Bortelektronik zwar hilft, wenn auch auf absorbierende und z.T. überfordernde Weise.

Daraus leitet sich eigentlich unschwer ab, dass der zwar etwas kostenträchtige Zusatz-Sauerstoff im Fluge nicht nur das blosse medizinische Überleben beim Höhenflug ermöglichen soll, sondern auch den nötigen Sauerstoff-Spitzenbedarf für die bestmögliche und v.a. auch anhaltende Aufmerksamkeit, Denk- und Sehfunktion und den unverzichtbaren Fluggenuss abdecken muss. Der

Früheinsatz des EDS mit setting N oder D5 ist dabei ebenso förderlich wie seine ununterbrochene Verwendung während der gesamten Flugdauer, zusammen mit einem den alters- und allf. maskenbedingten Einschränkungen angepassten F-setting und auch einer geeigneten und erlernbaren Atmungstechnik.

Anstatt sich hier in Berechnungen aus der Atmosphärenphysik zu erschöpfen, seien hier die wichtigsten flugmedizinischen Prinzipien des optimalen Sauerstofftransportes bis in die hintersten Hirn- und Sehzellen nochmals in Erinnerung gerufen:

Pressure altitude (ft) / (m)	Atmospheric pressure (mmHg)	Ambient O <sub>2</sub> pressure 21%	LungAlveolar O <sub>2</sub> pressure
0 / 0	760	159	103
5,000 / 1'524	632	133	81
10,000 / 3'048	523	110	61
12,000 / 3'658	483	101	54
13,000 / 3'962	465	97	51
14,000 / 4'267	447	94	48
15,000 / 4'572	429	90	45
20,000 / 6'096	350	73	34
25,000 / 7'620	282	59	30

In der Flugmedizin werden die physiologischen Drucke in mm Hg = torr ausgedrückt: 760 torr = 1'013 mbar. Der auf Meereshöhe eingeatmete O<sub>2</sub>-Teildruck von 159 torr verringert sich bis zu den Lungenbläschen auf noch 103 torr, da er mit 40 torr CO<sub>2</sub> und 47 torr Wasserdampf vermischt wird. Auf 10'000 ft herrscht bereits ein >40% Sauerstoffmangel, auf 15'000 ft einer von >50%. Diese behörliche Hypoxietoleranz kontrastiert erheblich mit der Nulltoleranz für Alkohol, Drogen und Fliegen ohne gültige Lizenz...! Auf 10'000 ft fällt die O<sub>2</sub>-sättigung bereits auf 88 % ab (Norm 96% für junge, gesunde und fitte Piloten)

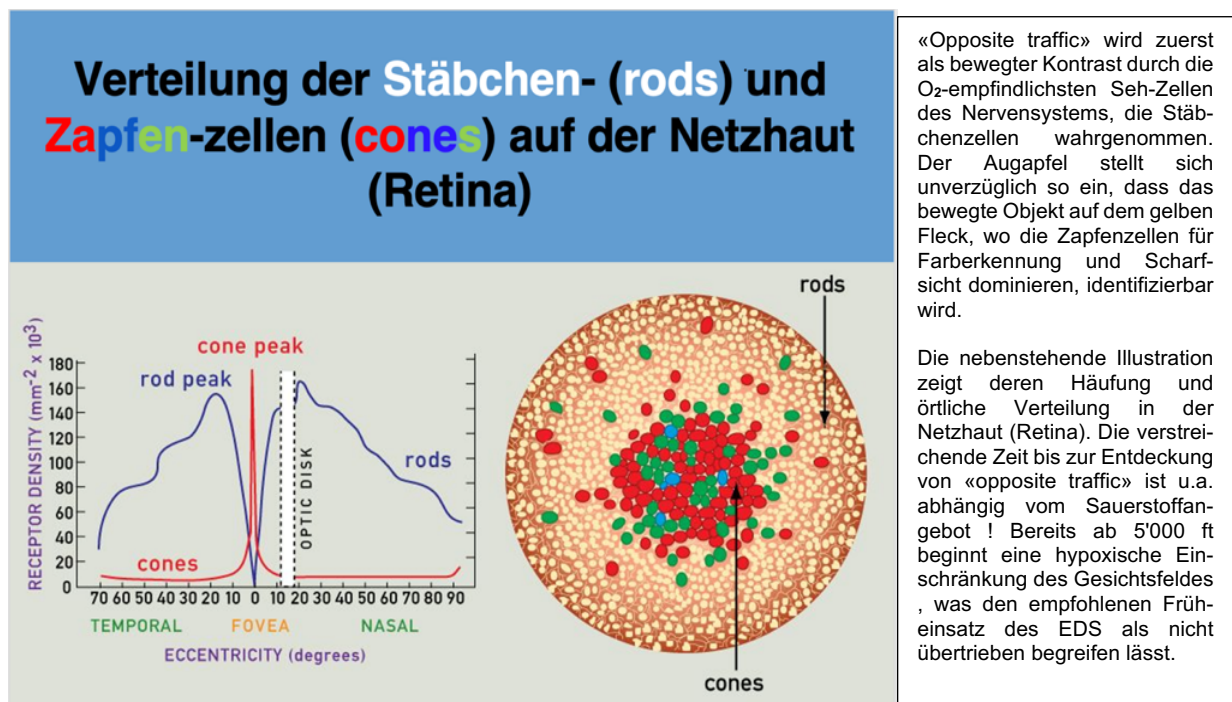
Je dünner die Luft, desto geringer der O<sub>2</sub>-Teildruck, um die O<sub>2</sub>-Moleküle in das Hämoglobin der roten Blutkörperchen (BK) zu pressen, damit diese in genügender Menge bis in die Augen und ins Hirn transportiert werden. Bei sämtlichen älteren Aeronauten ist die Lungenfunktion (Grösse und Zustand der Luft-Blut-Austauschfläche) ausnahmslos eingeschränkt und sie benötigen daher mehr Zusatz-O<sub>2</sub> für eine vergleichbare Körpermasse und Tätigkeit, auch dann, wenn sich die "alten Adler" noch wie mit 20, fit und fluggeil wähnen. Jede tiefe Einatmung mit Atemanhalten für eine Sekunde vor dem passiven Ausatmen durch den Mund bei Lippenpresse, verbessert geringfügig die prozentuale O<sub>2</sub>-Beladung (O<sub>2</sub>-Sättigung der roten BK's in % ausgedrückt). Es ist leider nicht möglich, auch nicht nach Voratmung mit reinem Sauerstoff, länger als für 3 min reichende Lungen-O<sub>2</sub>-Reserven anzulegen. Deshalb sind die früher gelegentlich praktizierten O<sub>2</sub>-Duschen oder der nur phasenweise Einsatz des EDS für die anhaltende volle Aufmerksamkeit nicht zielführend. Kein Flachlandpilot kann während des Fluges von irgendeiner respiratorischen Akklimatisation an die Flughöhe (automatische und bleibende Mehratmung) profitieren, weil eine solche typischerweise mit 2-3 Tagen hypoxischer Atmungsdepression (!) beginnt und erst nach 21 Tagen, ständig auf Akklimationshöhe, einen nutzbringenden Plafond erreicht.

Ab pulsoxymetrisch erfassten O<sub>2</sub>-Sättigungen unterhalb 90 % (exakte Werte vorausgesetzt) beginnt progressiv der Anteil des anaeroben (d.h. sauerstofflosen) Hirn- und Seh-Stoffwechsels, was zu einer ungenügenden Wiederaufbereitung des energetischen Stoffwechselproduktes ATP (biochem. "Zellakku", des eigentlichen Antriebes für sämtliche Denkvorgänge, Muskelaktionen und regenerativen Prozesse) führt. Ganz ohne Sauerstoffzufuhr würde die noch mögliche ATP-Regeneration auf 5.3 % des voll aeroben Stoffwechsels abfallen. Zugegebenermassen existieren sogar im täglichen irdischen Leben oftmals unvermeidbare Episoden von momentan ungenügender ATP-Verfügbarkeit (bei Anstrengungen, Sport, Stress, Müdigkeit, Unfällen und Krankheiten, u.a.m.), wogegen sich die hypobare Hypoxie beim Höhenflug prophylaktisch, d.h. mittels frühem Zusatz-O<sub>2</sub> zuverlässig vermeiden lässt. Anlässlich eines zufällig beobachteten und chronometrierten Zirkulationsstillstandes (horizontale Linie im EKG) auf der Intensivstation, was ja dem sofortigen und totalen Zufuhrstopp von Sauerstoff zu den Hirnzellen gleichkommt, blieb der operierte Herzpatient noch für 11 Sekunden bei Bewusstsein, bevor er seine Augen verdrehte. Dies als Beweis, dass die nur geringen ATP-Reserven in den peripheren Hirnzellen im Nu aufgebraucht sind. Man vergleiche nun diese Beobachtung mit dem anerkannt hohen ATP-Bedarf für die erforderlichen, optischen, geistigen und muskulären Leistungen im Alpen-(Strecken-) Segelflug, wo selbst ein geringer Sauerstoffmangel bereits zu subjektiv unmerklicher neurologischer Minderleistung führt, welche allein, d.h. ohne Unfall/Kollisionsfolge, zugegebenermassen nicht fatal enden muss. Zudem ist zu beachten, dass die vermehrte Muskelarbeit (beim Frieren, bei Anspannungen infolge Stress und Aengsten, Luftraumabsuchung beim Kreisen mit Anderen, verkrampfter Knüppel- und Pedalenbetätigung bei starken Turbulenzen) effektiv dem Hirn den Sauerstoff stiehlt, wiewohl auf indirekte Weise. Das O<sub>2</sub>-Angebot zu den Muskeln wird dabei über Gebühr ausgeschöpft, sodass bei der folgenden Lungenpassage die dünne Luft allein das übermässig entsättigte (<75 %) Blut nicht mehr voll mit O<sub>2</sub> aufladen kann.

Der Autor hält übrigens gar nichts von der ihm geschilderten Praxis gewisser Höhenflieger, mit Hilfe eines billigen Fingerclip-Pulsoxymeters im Fluge den spätest möglichen O<sub>2</sub>-Einsatz bestimmen zu wollen. Nicht nur hat jedes Fingerclip POM einen systemischen Anzeigefehler von ca. 2%, sondern zeigt leider allzu oft auch **Falschmessungen** an, wegen Verrutschens des Sensors bei Fingerbewegungen, so wie solche infolge eindringendem Streulicht und kalten, pulslosen Fingern. Bei momentanem Messunvermögen bleibt dann einfach der letztgemessene Wert weiter angezeigt, hingegen nicht das momentane Messunvermögen. Auch die O<sub>2</sub>-Sättigungsmessung von Apple-watches und Garmin-Uhren am Handgelenk des Segelfliegers sind kaum lufttüchtig, v.a. wegen ihres bewegungsheiklen, reflektiven Messprinzips, den allzuhäufigen «*Unsuccessful measurement*»-Anzeigen und ihren oft unrealistisch guten O<sub>2</sub>-Sättigungswerten bereits daheim unter Ruhebedingungen.

Kälte und Hyperventilation (bei Stress, Aengsten) stellen nämlich sämtliche kleinen (Lungen- und Hirn-) Blutgefäße eng und geben zudem den Sauerstoff am Wirkort schlecht ab. Die Stäbchenzellen der peripheren Netzhaut (Retina) sind bekanntlich die O<sub>2</sub>-konsumierendsten Zellen des gesamten Nervensystems und deshalb auch am empfindlichsten bereits auf leichten Sauerstoffmangel. Deshalb schränken diese bereits ab 5'000 ft das periphere Sehvermögen für Kontraste und Bewegungen, subjektiv unmerklich ein. Dabei ist doch die raschestmögliche Erkennung und Identifikation der anderen Luftraumbenutzer u.U. lebenswichtig. Nach der Lichtgeschwindigkeit (300'000 km/s) bei optischer Luftraumüberwachung (Bewegungen und Kontraste im Gesichtsfeld, Haubenblitzer) und innerhalb der Antikollisions-Elektronik (FLARM, TICAS, ADS-B, etc), braucht es jedenfalls noch ein **speditives Nervensystem** (normal nur 0.5-2 m/s für vegetative, 10-30 m/s für sensorische und 60-120 m/s für motorische Nervenfasern), um das Erblickte (die nahende Erdkruste, bewegte Kontraste) und nach Fokussierung Erkannte (aha, Flugzeug auf Kollisionskurs) noch rechtzeitig in geeignete Ausweichmanöver umzusetzen und auf dieser entscheidenden Endgeraden der Kollisionsverhütung darf nicht gesündigt werden.

Bereits eine gering verminderte ATP-Verfügbarkeit im Auge **verlangsamt** unmittelbar sämtliche wichtigen Sehfunktionen, wie Wechsel der Blickrichtung, Scharfabbildung (Akkommodation, Fokussierung) und Hell-Dunkel Adaptation via Pupillenweite, so wie die Regeneration des Sehpurpurs nach Beanspruchung oder gar Blendung. Wichtig auch die rasche Uebertragung vom Auge zur Sehrinde im Hinterkopf, so wie diejenige im Hirn für sinnmachende Denkvorgänge für das geeignetste, muskulär auszuführende Ausweichmanöver.

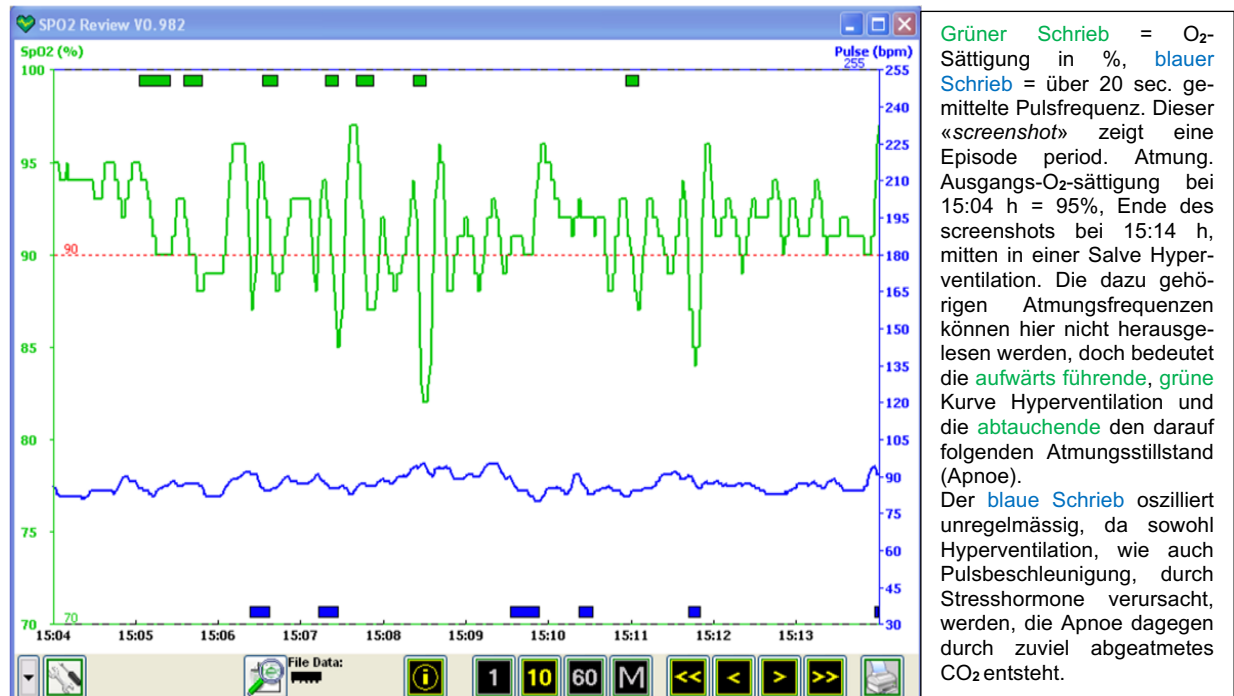


Im Höhenband der sogenannten milden hypobaren Hypoxie (5'000 bis ca. 15'000 ft) existiert leider keine automatisch-kompensatorische Atmungssteigerung mit zunehmender Höhe, hingegen bei ca. 40-50 %, der aeronautischen Population (den sog. «*bad acclimatizers*») eine **mit der Flugdauer zunehmende, hypoxische Wasser-Einlagerung/Retention** ins Nervensystem und etwas weniger

gefährlich überall im Körper. Der dabei entstandene Wasserfilm bremst dann als zusätzliches Diffusionshindernis den O<sub>2</sub>-Transport in die Nervenzellen. Dieser Umstand ist auch die Ursache der, zwar unmerklich ab 8'000 ft beginnenden, sog. **akuten Berg- oder Höhenkrankheit**, mit ihrem Kardinalsymptomen **Stirnkopfweg** und Müdigkeit/Unlust, so wie ihren gefürchteten, meist fatalen Endstadien Lungen- und Hirnoedem. Letztere findet man allerdings nur bei tagelang höhenexponierten Alpinisten. Die ebenso davon betroffenen, leicht hypoxischen Alpen- und Wellen-Segelflieger würden wenigstens nur mit Stirnkopfweg im Anfangsstadium derselben verharren, da sie bis zum späten Abend ja meist wieder irgendwie gelandet sind. Diese hypoxische Wassereinlagerung ist die Folge des ATP-Mangels der sog. Natrium-Ionenpumpe innerhalb der Nervenzellwand, deren Situation am besten mit derjenigen einer Schiffspumpe ohne Diesel in einem lecken Schiff verglichen werden kann, wobei in den Nervenzellen jedes nicht mehr herauspumpbare Natriumion (Na<sup>+</sup>) von mehreren H<sub>2</sub>O-Hüllen umgeben ist. Diese hypoxische Wassereinlagerung äussert sich spätestens ab der zweiten Flugstunde mit Stirnkopfweg, leichten Sehstörungen, Müdigkeit, Motivationsverlust, Unaufmerksamkeit und evtl. schlechten Entscheidungen, u.a.m. des so zunehmend viskös funktionierenden Nervensystems. Dessen vollständige H<sub>2</sub>O-Resorption unter retablierten Normalbedingungen kann u.U. bis zu 24-36 Std. dauern und so, was den Fluggenuss, die Müdigkeit und die Motivation betrifft, sogar noch den folgenden Wellen-Strecken-Flugtag verderben.

Wenig bekannt ist, dass jeder bisher pulsoxygraphisch monitorierte Segelflieger ab 8'000 ft (egal, ob mit oder ohne Zusatz-O<sub>2</sub> durch das EDS), seine bisher regelmässige Atmung zugunsten von mehrminütigen **Episoden sog. periodischer Atmung** aufgibt. Diese periodische Atmung, ist in der Medizin als ominöser Cheyne-Stokes'scher Atmungstyp bekannt, weil er sonst v.a. bei Hirnverletzungen, Hirntumoren und markanter Herzinsuffizienz beobachtet wird. Er besteht aus ca. halbminütigen crescendo-decrescendo-Salven von Hyperventilation (mit O<sub>2</sub>-Sättigungsanstieg), gefolgt von Atmungspausen von bis zu 30-40 s Dauer und mit einem entsprechenden O<sub>2</sub>-Sättigungsabfall von bis zu

12 %. Dies als weiterer Beweis, dass der milde O<sub>2</sub>-Mangel nicht erst ab irgendeiner reglementarischen Höhenlimite beginnt.



Meist geht die im Fluge subjektiv als Anstrengungs-Atemnot wahrgenommene Mehratmung bei milder Hypoxie aber auf das Konto von zusätzlicher Muskelarbeit (Frieren, Hervorzurren von Kartenmaterial, Mühe beim versuchten Aufdrehen der O<sub>2</sub>-Flasche erst im Fluge, verkrampfte Knüppel- und Pedalenbetätigung in turbulenten Rotoren, muskuläre Anspannung bei akutem Flugstress, etc.), da die automatische Atmungssteuerung hauptsächlich über die dem Hirn rückgemeldete Muskelarbeit und das dabei vermehrt anfallende CO<sub>2</sub> erfolgt, nicht etwa über den abfallenden O<sub>2</sub>-Teildruck. Milde Hypoxie allein, d.h. ohne gleichzeitige Muskelarbeit, ist schmerzlos, unmerklich und deshalb heimtückisch bis etwa zum später daraus entstehenden Stirnkopfweg und führt ohne gleichzeitige Muskelanstrengung auch nicht zu früher Atemnot. Nur eine akute, markante Hypoxie v.a. oberhalb



20'000 ft könnte ein Noradrenalin-Hormongewitter mit Herzpochen, Herzrasen und unüberhörbarer Notfall-Mehratmung (massive Hyperventilation) auslösen, z.B. bei plötzlichem Druckabfall im airliner auf Reishöhe oder bei Pannen aller Art mit dem EDS in sehr dünner Höhenluft).

Es sei noch daran erinnert, dass die noch **verfügbare Handlungszeit** der gerne angeführten "time of useful consciousness" (TUC), auch "effective performance time" (EPT) benannt, für den Wellen-Segelflug, v.a. oberhalb 20'000 ft, **relativiert werden muss**. Diese TUC wurde erstmals vor über 75 Jahren an jungen, fitten Militärfliegern in kleinräumigen, zimmerwarmen Unterdruckkammern (UK) ermittelt. Um überhaupt bei vollem Bewusstsein auf die diversen Ausgangshöhen in der Unterdruckkammer zu gelangen, benützten die Probanden die gleichen "on demand"-Regler mit A-14-Fliegermasken wie die in der UK anwesenden Fliegerärzte, welche sich meist üppig O<sub>2</sub> zuregelten. Da nur etwa 5% des offerierten Sauerstoffes durch die ruhig sitzenden Untersucher und Probanden verbraucht wird, war deren Ausatemungsluft noch reichlich sauerstoffhaltig (bis zu 95 % bei reiner O<sub>2</sub>-Einatmung), was auf den simulierten Höhen oberhalb 20'000 ft, die dünne Atmosphäre in der UK wahrscheinlich zusätzlich mit Sauerstoff anreicherte als der entsprechenden Druckhöhe entsprechen würde. Selbstredend verbieten solch komfortable Messbedingungen die unkritische Uebernahme der so ermittelten TUC/EPT für den wesentlich anspruchsvolleren Alpensegelflug. Es sind v.a. die in grösseren Höhen rasch schwindenden O<sub>2</sub>-Lungenreserven, welche im wesentlichen die TUC/EPT bestimmen, v.a. der Umstand, dass nach dem befohlenen Weglegen der Fliegermaske der in den Lungen noch überproportional enthaltene Sauerstoff sofort via Bronchien, Luftröhre und Mund entweicht anstatt verstoffwechselt wird, da O<sub>2</sub> ja immer entlang seines aktuellen Teildruckgefälles fliesst. Ein eigens im Fluge überlebter O<sub>2</sub>-Zwischenfall mit dem EDS auf 25'000 ft hinterlässt die Ueberzeugung, dass wenigstens die Hälfte der TUC/EPT bereits vor der Entdeckung der O<sub>2</sub>-Panne oder der eigenen Hypoxie der Vergangenheit angehörte.

An einen Batteriewechsel in eisiger Höhe (wegen unsinnigem Ausreizenwollen der Batterien), dazu mit eiskalten Fingern oder gar an das rasche Wiederauffinden des ausgerissenen und weggezischten O<sub>2</sub>-Zufuhrschläuchleins zum EDS soll keine Erfolgserwartung unter Verweis auf die TUC/EPT geknüpft werden! Wer die testbesten AEROCELL-Batterien bei LIDL für weniger als 50 Rappen pro Stück einkauft, darf seinem EDS getrost mehrere prophylaktische Batteriewechsel pro Flugsaison gönnen; die dabei ausgewechselten AA-Batterien könnten z.B. in einer Taschenlampe gefahrlos weiter dienen. Im Gegensatz zum irdischen Verweilen oder beim Abfall des Kabinendruckes (aus max. 8'000 ft) in einem airliner, kommt einem im hochfliegenden Segelflugzeug von nirgends her Fremdhilfe zum Ueberleben, nicht mal im Doppelsitzer ! Deshalb soll bei Flügen über 20'000 ft unbedingt noch ein völlig unabhängiges Notsystem mitgeführt werden und sofort greifbar sein. Der Autor empfiehlt das OXYfit 18 mit bereits eingeschraubter O<sub>2</sub>-Druckpatrone und angesteckter Kleinmaske, welches dosierbar entweder 1 l/min für 18 min oder 2 l/min O<sub>2</sub> kontinuierlich für 9 min abgibt und verzugslos mit dem Zufuhrschlauch zu den Nasenkanülen verbunden werden kann. Diese Kleinmenge wird für den sofort eingeleiteten Notabstieg auf eine wenigstens überlebbar Höhe, z.B. bis FL 180, genügen, der rechnerisch aus FL 250 bei -6m/s gegen 20 min dauern würde. Think !

## 2. Zum intelligenten Gebrauch des EDS

Altitude (measured <b>barometrically</b> )	TUC (normal ascent)	TUC (rapid decompression)
FL180 (18,000 ft; 5,500 m)	20 to 30 minutes	10 to 15 minutes
FL220 (22,000 ft; 6,700 m)	10 minutes	5 minutes
FL250 (25,000 ft; 7,600 m)	3 to 5 minutes	1.5 to 3.5 minutes
FL280 (28,000 ft; 8,550 m)	2.5 to 3 minutes	1.25 to 1.5 minutes
FL300 (30,000 ft; 9,150 m)	1 to 2 minutes	30 to 60 seconds
FL350 (35,000 ft; 10,650 m)	30 secs to 1 minute	15 to 30 seconds
FL400 (40,000 ft; 12,200 m)	15 to 20 seconds	7 to 10 seconds
FL430 (43,000 ft; 13,100 m)	9 to 12 seconds	5 seconds
FL500 (50,000 ft; 15,250 m)	9 to 12 seconds	5 seconds



Der aktuelle Goldstandard für den Alpenstreckenflug ist das «*Electronic Delivery System*» EDS mit seinem neuartigen O<sub>2</sub>-Applikationsprinzip (*pulse demand*), wobei dieses nicht einfach ein idiotensicheres "plug and breathe" Gerät ist, sondern das gründliche Studium seines neuesten und endlich ausführlichen, doch z.Z. nur auf Englisch verfassten, 31-seitigen [EDS O2D1-2G and O2D2-2G Operation Manual rev.-1.pdf](https://www.mhoxxygen.com/docs/) auf (<https://www.mhoxxygen.com/docs/>) voraussetzt, welches hier aus Platzgründen weder übersetzt, noch auszugsweise zitiert werden kann.

Vier beachtenswerte Faktoren bestimmen beim EDS die pro Minute abgegebene **Sauerstoffmengen** (in scc oder ml **vor** Höhenexpansion), nämlich Durchfluss (flow in l/min), O<sub>2</sub>-Pulsdauer (ms) und Atmungsfrequenz (AZ/min), unter allf. Abzug von Lecks in dessen Verschlauchung.

Erfahrungsgemäss wird der **Optimierung des O<sub>2</sub>-Durchflusses** nicht überall die nötige Beachtung geschenkt. In den dünnlumigen PU-Schläuchlein 5/2.5 mm und deren oftmals unnötigen Ueberlängen verlangsamt sich der initiale Durchfluss ab dem Druckminderer XCR. Beim EDS-O2D2 2G, dasjenige für beide Piloten im Doppelsitzer empfiehlt sich deshalb, die grösserlumigen PU-Schläuche 6/4 mm (anstelle der beiliegenden 5/2.5 mm) zwischen dem Druckminderer XCR und dem EDS zu verwenden. Zwar erfordert dies den selbständigen Austausch der schwarzen und roten Steckkupplung, doch resultiert dadurch rechnerisch ein 6.5 mal besserer Durchfluss (Gesetz von Hagen-Poiseuille), was beiden Piloten bei simultaner Einatmung wenigstens den nominalen Durchfluss garantiert. Werden zwei individuelle EDS-O2D1 aus der gleichen O<sub>2</sub>-Flasche versorgt, so soll eine längere 6/4 mm PU-Verbindung, wenigstens bis zum entfernt befestigten Verzweigungsstück geführt werden und von dort aus auf **gleich lange** Abzweigungen zu jedem EDS geachtet werden. Dies, damit das näher am Verzweigungsstück liegende EDS dem weiter davon entfernten nicht den Durchfluss mindert (alles schon erlebt und bewiesen). Auch der Sauerstoff zieht den Weg des geringsten Widerstandes vor...! Selbstredend sind sämtliche Schlauchverbindungen, auch diejenige zur Nasenbrille, auf ihre **kürzest mögliche Länge** zu beschränken. Das EDS in einer Sichttasche am Schultergurt hätte den praktischen Vorteil von kürzesten Schlauchverbindungen und allfällige Alarme und Einstellungen wären in Augen-und Ohrnähe, so wie in Handreichweite.

Der nur einstufige, simple und deshalb erschwingliche **Druckminderer XCR**, welcher mit dem EDS geliefert wird, vermag leider bei hohen O<sub>2</sub>-Flaschen-Restdrücken von 200 bar nicht bis auf den erwünschten nominalen, statischen Sekundärdruck von 1.5 bis 1.7 bar (bei Einatmung auf 1.0-1.2 bar abfallend) zu reduzieren. Damit wird auch die nominale Durchflussrate von 15-18 l/min überschritten, was pilotenseitig zwar völlig unbedenklich ist, doch den O<sub>2</sub>-Verbrauch unnötig erhöht und im Extremfall zum pneumatischen Aufdrücken (im Gegensatz zur elektrisch induzierten Kurzöffnung des Magnetventils im EDS führen könnte. Deshalb ja die Hörprobe auf ein allf. feines Dauerzischen des ans Ohr gehaltenen EDS zur Funktionskontrolle, besonders nach dem vorsichtigen Aufdrehen einer vollen O<sub>2</sub>-Flasche vor dem Start. Ein leckes Magnetventil würde die frühzeitige Pulsauslösung verunmöglichen, da der nötige Einatmungs-Unterdruck zur Pulsauslösung bereits bei geringem Dauerflow nicht mehr aufgebracht werden kann.

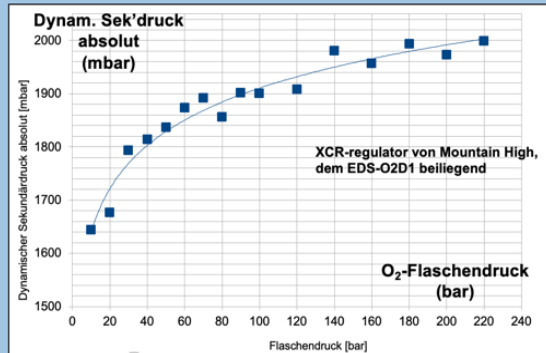
Fällt hingegen der Flaschen-Restdruck unterhalb 50 bar ab, so vermindert sich progressiv auch der noch erzielbare, dynamische Sekundärdruck bis unter den minimalen Wert von 1.0 bar, was den Durchfluss (die Berechnungsgrundlage für die benötigte Pulsdauer) drosselt. Das EDS zischt dann zwar hörbar schwächer weiter, doch nehmen die dabei abgegebenen O<sub>2</sub>-Mengen stetig ab, bis sie für die jeweilige Flughöhe nicht mehr genügen. Verlängert man mit den settings R/M (oder neu F4) die Pulsdauer kompensatorisch auf die maximal möglichen 500 ms, so könnte das abendliche Abgleiten aus der Welle aus 20'000 ft ungemütlich werden, da sich so die O<sub>2</sub>-Flasche rascher ganz entleert.

Sowieso ist Sauerstoff zum Atmen und nicht zum Konservieren gedacht, wobei auch mal am gängigen Prinzip der oftmals nur einzigen O<sub>2</sub>-Flasche pro Flugzeug gerüttelt werden darf. Um die O<sub>2</sub>-Vorratsflasche ohne flow-Verlust dennoch fast ganz leeren zu können, wäre ein **zweistufiger Druckminderer** nötig, der aber auch mehr kostet. Bisher hatte sich aber bewährt, den Flaschen-Restdruck in einer ersten Stufe (mit einem gängigen industriellen Druckminderer) auf 5-6 bar zu reduzieren und vor (jedem) EDS noch den sog. «*inline reducing regulator-equalizer*» des EDS-Herstellers M&H vorzuschalten, welcher die 5-6 bar noch auf den nominalen Sekundärdruck von 1.5 bis 1.7 bar statisch, entsprechend 1.0 bis 1.2 bar dynamisch reduziert. Derart bleibt der nominale (nun tertiäre) Druck länger erhalten, was die Ausnützung auch von Flaschen mit Restdrücken < 50 bar ohne Einbusse ermöglichen sollte. Somit hängt die max. mögliche O<sub>2</sub>-Abgabe des EDS (Stellung R/M oder neu F4) im wesentlichen von der Art und Qualität des verwendeten Druckminderer ab, nicht vom EDS.

- **Dynam. Sekundärdruck (absolut) bei stat. Luftdruck von 975 mbar**
- **Nomin. dynam. Sek'druck = 1000 mbar, wenn stat. Sek'druck 1400 mbar**
- **100 % des nomin. dynam. Sek'druckes > 90 bar Flaschenrestdruck !**
- **90 % des nomin. dynam. Sek'druckes > 70 bar Flaschenrestdruck !**
- **80 % des nomin. dynam. Sek'druckes > 30 bar Flaschenrestdruck !**



zhaw  
School of Engineering  
ZAV Zentrum für Aviatik



Nebenan wurde eine 1.0 l O<sub>2</sub>-Flasche mit 200 bar gefüllt und über einen XCR-Druckminderer stufenweise entleert. Dabei wurde der **dynamische** Sekundärdruck (derjenige **während** der Pulsabgabe) zuerst alle -20, dann alle -10 bar Druckabfall in der Flasche gemessen.

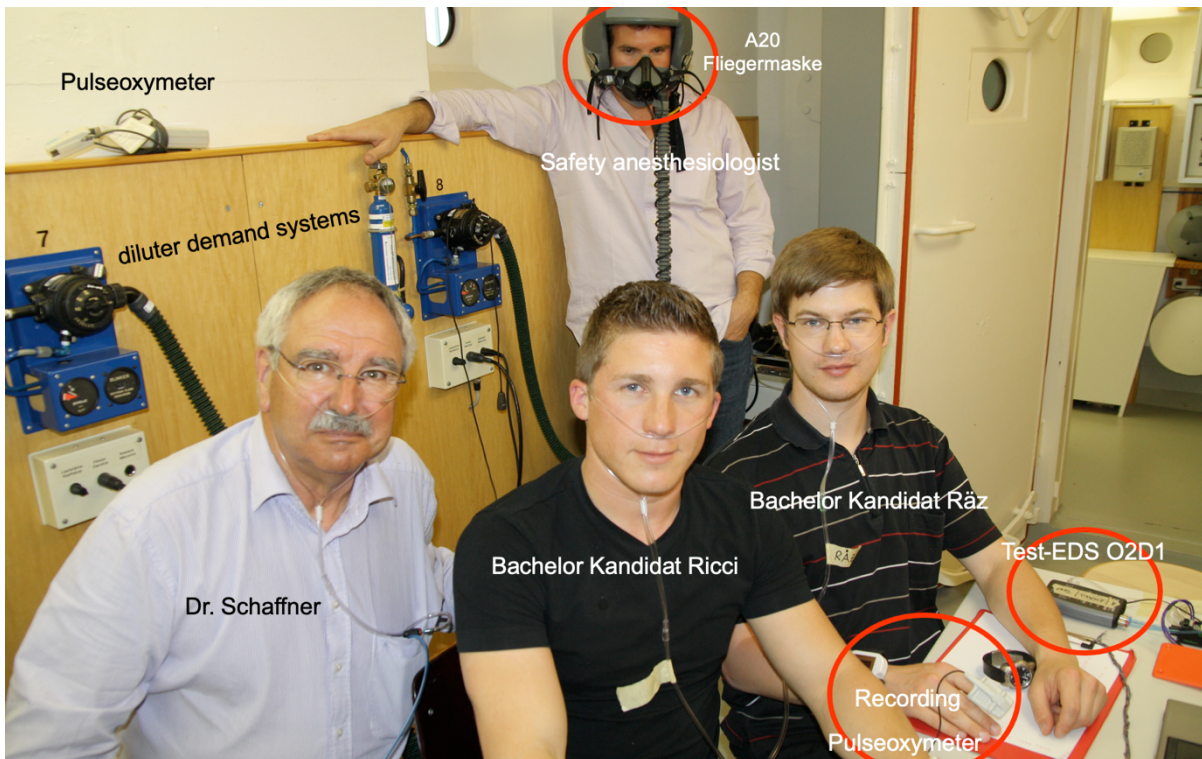
**Achtung:** Der dynamische Sekundärdruck entlang der Y-Achse ist der **absolute Druck**, d.h. er **schließt auch den während der Messung herrschenden atmosphärischen Druck von 975 mbar ein**, welcher subtrahiert werden muss, um den für den Durchfluss massgeblichen dynamischen Sekundärdruck zu kennen.

Was die benötigte **Pulsdauer** betrifft, wird diese mit dem N und D-setting ja barometrisch der jeweiligen Flughöhe angepasst, wobei sie dort wo nötig, mit den F-settings zusätzlich noch manuell bis auf 500 ms verlängert werden kann. Die löbliche Absicht dahinter ist, keinesfalls Sauerstoff in den sog. Totraumanteil der Einatmung (Pendelluft der oberen Luftwegen, welche nicht am Gasaustausch teilnimmt) zu vergeuden, v.a. bei Verwendung von Nasenkanülen. Bei Ruheatmung macht dieser Totraumanteil ca. 40 % des eingeatmeten Volumens (ca. 500 ml) aus, d.h. man hätte sich die max. mögliche Pulsdauer auch bei 600-650 ms vorstellen können, v.a. bei vertieften Einatmungen mit längerer Einatmungszeit als 1 s, jedesmal wenn machbar und auch für weitere realistische Atmungsfrequenzen als die zur Berechnung angenommenen 15 oder 20 AZ/min. Sowieso basiert beim EDS die O<sub>2</sub>-Abgabe und somit die dazu benötigte O<sub>2</sub>-Pulsdauer bei nominalem Durchfluss auf allen Flughöhen bis 20'000 ft, leider nicht auf neueren Flugmed. Versuchen des EDS-Herstellers und v.a. nicht unter Berücksichtigung von Pilotenalter, BMI oder vorbestandener Lungenpathologie (Raucherlunge), sondern wurde lediglich aus der altgedienten Formel für Dauerströmer (continuous flow system) abgeleitet, also von 1l/min/10'000 ft, unter Subtraktion des dabei eingesparten, da sonst vergeudeten Sauerstoffes während der zweiten Hälfte der Einatmungszeit und der vollen Ausatmungszeit. Dadurch konnte das EDS praktischerweise, trotz seines neuartigen "*pulse demand*"-Wirkprinzipes, unter dem bereits existenten, doch unzutreffenden Wirkprinzip des Dauerströmers zugelassen werden. Somit musste leider auch das Maskenobligatorium ab 18'000 ft, welches punkto O<sub>2</sub>-Applikation beim Dauerströmer durchaus Sinn macht, nicht aber beim EDS mit Nasenkanülen, mit übernommen werden. Geeignete (z.B. Hudson RCI, ref 1104) und perfekt sitzende, konische Nasenkanülen erwiesen sich aber als O<sub>2</sub>-effizienter als die billige, hellgrüne Plastikmaske mit ihren multiplen Oeffnungen für die Umgebungsluft, welche dem EDS beiliegt, weil dort der Aufbau des pulsauslösenden Unterdruckes bei Einatmung länger dauert, was den Puls verspätet auslöst.

Für eine **Bachelorarbeit im Aviatikkurs 2012 der ZHAW** in Winterthur (Adrian Rätz und Ricardo Ricci) durfte der Autor ein flugmedizinisches Thema vorschlagen und entschied sich für die technische (in der UK) und "in vivo"-Bestimmung des O<sub>2</sub>-outputs der damaligen "*blackbox EDS*". Dazu gehörte auch ein Messflug mit den beiden jungen Bachelorkandidaten und 4 risikotypischen Probanden (alles Segelflieger mit dem EDS-O2D1 und Nasenkanülen, so wie einem registrierenden Handgelenks-POM CMS 50 l ausgerüstet) im ungeheizten PC-6 (Pilatus Porter, ohne Druckkabine notabene). Es galt dabei auf Flugplatzhöhe und den erfliegenen Höhenstufen alle 1000 m bis 6'000 m für die Dauer der Messungen zu verweilen und um allf. die F-settings anzupassen, welche die Ausgangs-O<sub>2</sub>-Sättigung vor dem Start ("Nullhypoxie") aufrecht erhalten. Dabei musste jedesmal wenn die mittlere (wegen period. Atmg.) O<sub>2</sub>-Sättigung gegen 90 % abfiel auf das nächsthöhere F-setting gewechselt werden.

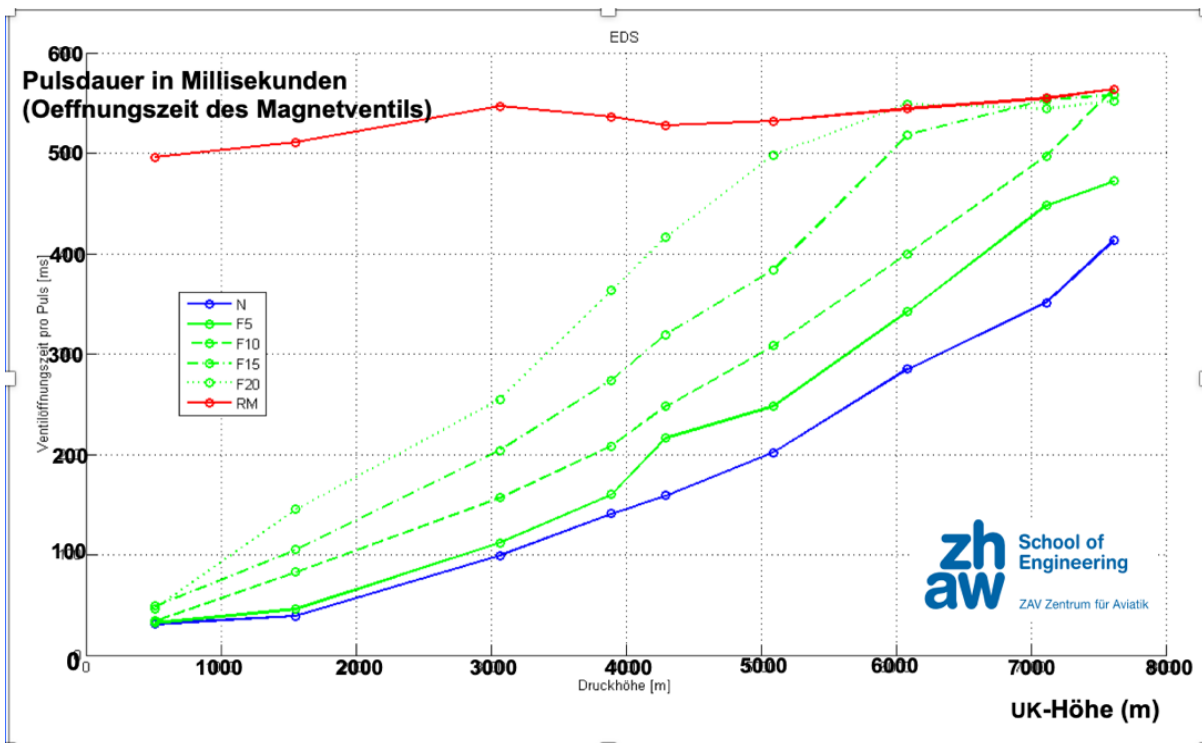
Der technische Teil, die Messung des O<sub>2</sub>-outputs des EDS auf verschiedenen Flughöhen bis 7'500 m, erfolgte in der Unterdruckkammer des Fliegerärztlichen Instituts der Flugwaffe in Dübendorf. Es wurde dabei nur ein einziges EDS-O2D1 technisch vermessen, doch waren sowohl die beiden jungen Bachelor-Kandidaten, wie auch der damals 69-jährige Autor mit denselben EDS-Geräten ausgerüstet, um wach und aufmerksam auf die simulierten Höhenstufen alle 1'000 m bis auf 7'500 m gebracht zu werden. Eine anschliessende Hypoxie-Demo auf dieser Endhöhe war nie vorgesehen.



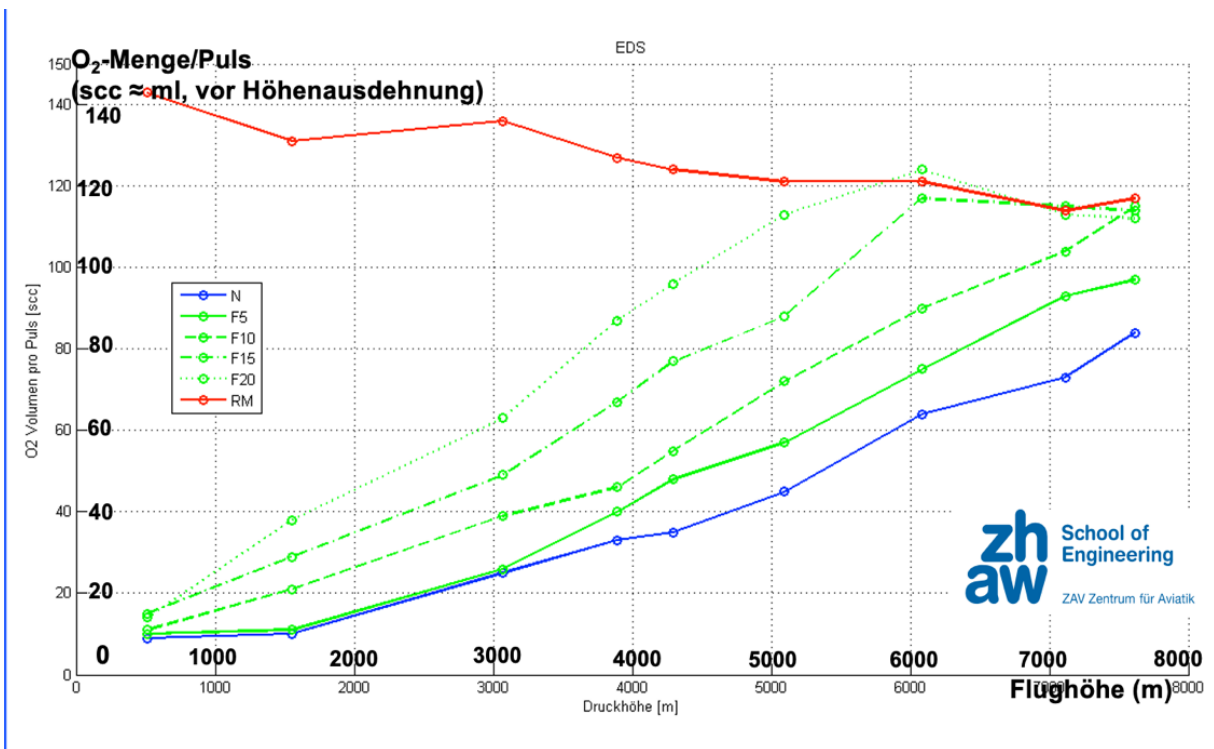


Einzig der Autor, als vorbekannter Luftschlucker (Aerophage), bekundete beim Aufstieg zunehmende und schliesslich kaum auszuhaltende Bauchschmerzen, beginnend ab den Höhen über 4'000 m und solange bis er sich schliesslich auf 7'500 m, den Mittelfinger in den Rachen steckte, um so die expandierte Magenluftblase gut hörbar zu befreien. Das Gesetz von Boyle-Mariotte liess hier grüssen. Hingegen beobachtete keiner eine ungenügende O<sub>2</sub>-Sättigung oder hatte gar Hypoxie-Symptome bis zur Endhöhe, auch nicht später. Der auf obigem Bild nicht sichtbare, weil photographierende, oberverantwortliche militärische Chefarzt (ohne bisherige Erfahrung mit dem EDS und deshalb mit einem «diluter demand»- System mit A-20-Fliegermaske versehen) hatte vorsorglich einen weiteren Anästhesiologen aus der Uniklinik beigezogen, weil ihm die drei zivilen Forscher der ZHAW mit ihren winzigen EDS-«black boxes» wahrscheinlich nicht ganz geheuer waren...

Dabei konnten interessante, da unerwartete, O<sub>2</sub>-output-Daten des EDS ermittelt werden,:







Jeder der farbigen Messpunkte ist das Mittel aus 5 manuellen Pulsauslösungen. Die Pulsdauer wurde via Spannungsabfall bei Abgriff im Batteriefach des EDS ermittelt. Die effektiv abgegebenen O<sub>2</sub>-Mengen pro Puls wurden gleichzeitig mit einem digitalen SENSIRION-Gas-Massenfluss-Sensor (Messbereich 0 - 20 Standardliter/min) automatisch Temperatur-kompensiert gemessen und über die Pulsdauer (ms) integriert.

Dabei fiel sofort auf, dass die nur submaximal vermuteten F-settings F15 und F20 (frühere Bezeichnung, wahrscheinlich der neuesten Pos. F3 entsprechend) bereits ab 6'000 m das mögliche Maximum, d.h. die Werte der höhenunabhängigen früheren Maximal-Position R/M (neu F4) erreichen.

Ebenso überraschend war, dass während desselben Messzyklus die max. höhenunabhängige Pulsdauer von anfänglich 500 ms mit der Höhe bis auf ca 560 ms leicht zunimmt, während gleichzeitig die präzis gemessene und integrierte O<sub>2</sub>-Maximalmenge pro Puls von anfänglich 142 ml bis auf 119 ml auf 7'500 m abfiel, was klar gegensinnig, unlogisch und interpretationswürdig ist.

Die Erkenntnis in dieser Situation ist, dass die settings F15 und F20 und R/M (resp. neu F3 und F4) ab 6'000 m keine weitere Steigerung der O<sub>2</sub>-Menge/Puls mehr zulassen, da diese bereits plafonieren. Wer also aufgrund seines fortgeschrittenen Alters, seines BMI >25 oder irgendeiner Lungenpathologie (z.B. Raucherlunge, Herzinsuffizienz oder *long covid*) vor Erreichen von 6'000 m bereits auf diese beiden F-settings angewiesen ist, sollte diese Höhe, im eigenen Interesse, als individuelle Obergrenze akzeptieren.



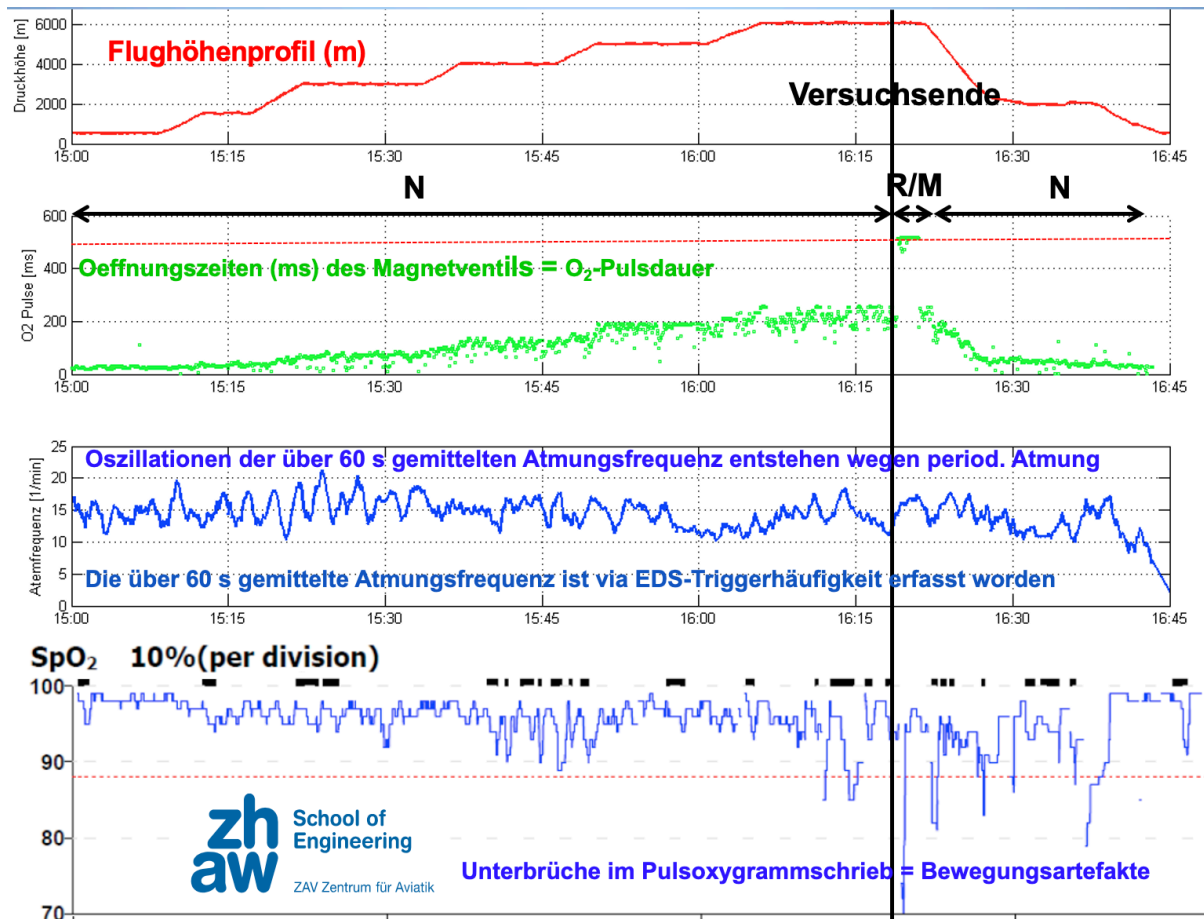
Eine ungetestete Abhilfe wäre 2 EDS parallel zu verschlauchten, übrigens eine Idee von Klaus Ohlmann für seine tagelangen Wellen-Streckenflüge in Patagonien. Die exakt synchrone Triggerung kann dabei nicht garantiert werden, doch wird, je nach den gewählten settings und verwendeten Innendurchmessern der Zufuhrschläuche, fast die doppelte Menge O<sub>2</sub> verfügbar. Ausserdem könnte bei einer Dysfunktion eines der EDS das andere als sofort nutzbares *backup*-Gerät für den Pannfall dienen, jedoch nicht das total

empfohlene, unabhängige OXYfit 18 Notfallgerät überflüssig machen.

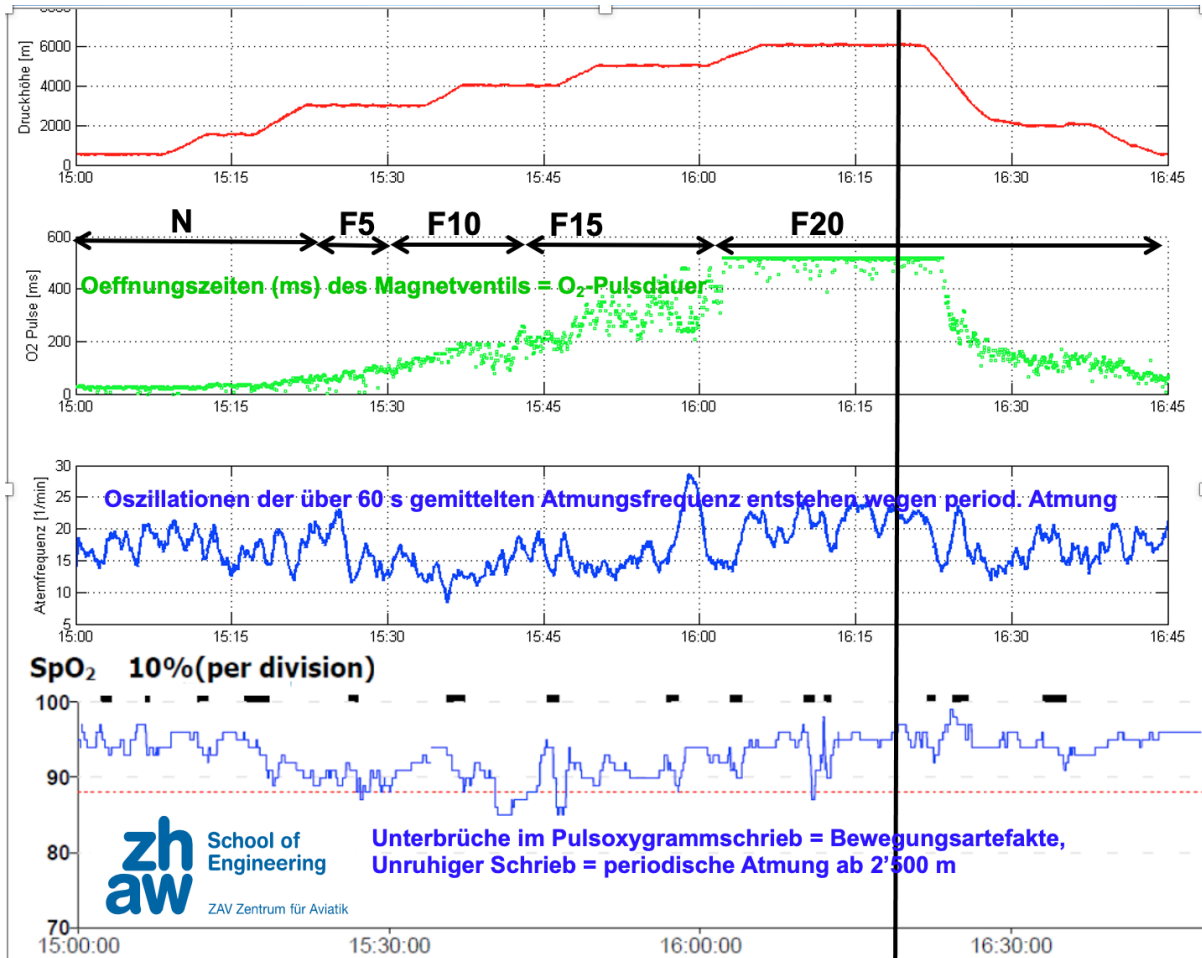
Zum Messflug im Pilatus Porter, welcher von der helvetischen Flugwaffe freundlicherweise oder sogar aus Eigeninteresse an den Resultaten für Ihren Helikopterbetrieb offeriert wurde:



Dabei zeigte sich, dass einzig die junge, leichtgewichtige Segelfliegerin mit einem BMI von 20.45 so wie die beiden jungen Bachelorkandidaten es schafften, mit der Grundeinstellung N auf der Endhöhe 6'000 m anzukommen, ohne je ihre mittlere O<sub>2</sub>-Ausgangssättigung von 96 % einzubüssen. Die drei anderen, männlichen Probanden auf diesem Flug benötigten alle eine ein- bis mehrmalige Verlängerung der Pulsdauer (mit den F-settings), um ihre mittlere O<sub>2</sub>-Sättigung oberhalb 90% zu halten, wobei der 69-jährige Nichtraucher mit einem BMI von 26.4 ab 5'000 m bereits die maximal mögliche Pulsdauer von 500 ms beanspruchte. Die graphischen Aufzeichnungen u.v.m. finden sich auch im Kapitel 12 des Buches von Jean-Marie Clément "Danse avec le vent"/"Dancing with the wind".



Obige Aufzeichnungen betreffen die junge, leichtgewichtige (55kg) Segelfliegerin mit ihrem Traum-BMI von 20.45, welche zwar zeitweise eine ausgeprägte periodische Atmung aufwies, doch auf 6'000 m angekommen nur die Hälfte der max. Ventilöffnungszeit benötigte. Sie ist der Prototyp eines sog. «good acclimatizer».

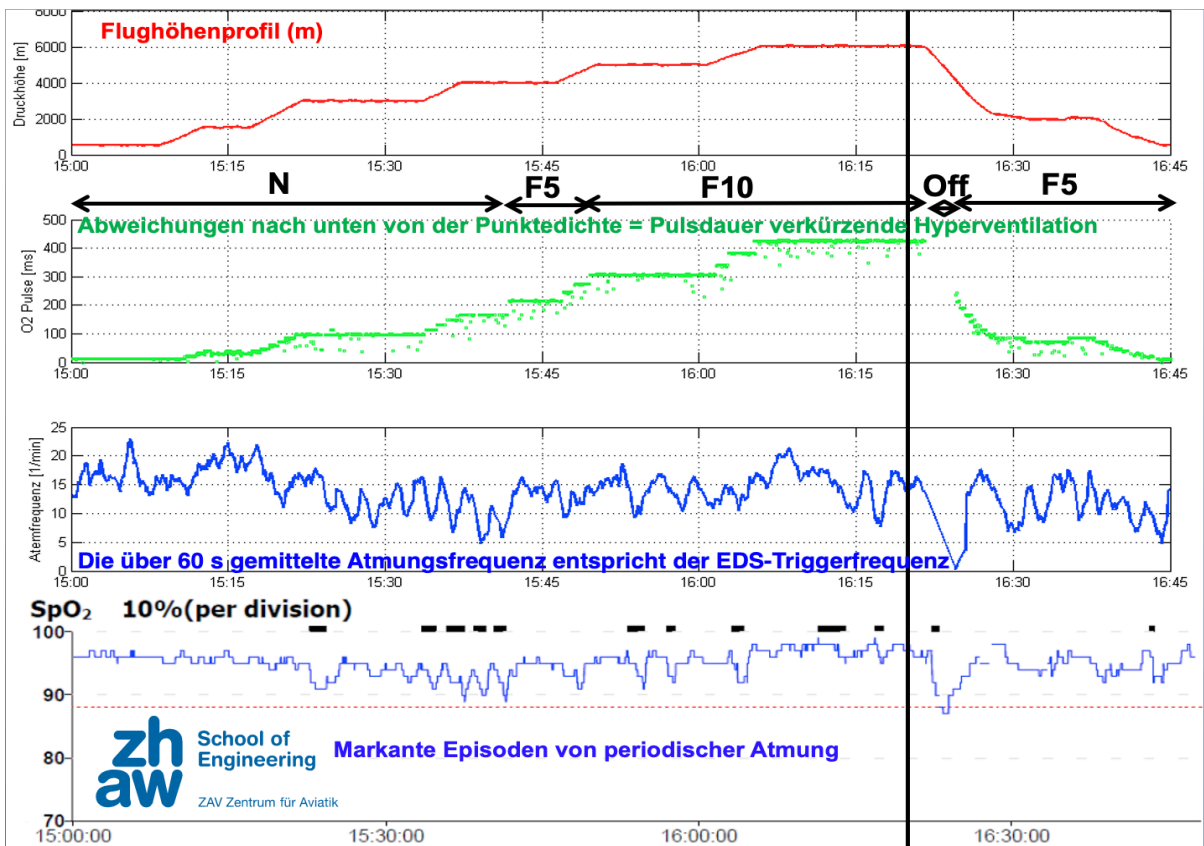


Obige Aufzeichnungen betreffen einen 69-jährigen, 78 kg schweren Nichtraucher mit einem BMI von 26.37 in sonst gutem Allgemeinzustand. Damit seine mittlere O<sub>2</sub>-Sättigung nicht unter die 90%-Grenze fiel, mussten nacheinander sämtliche F-Positionen gerastet werden. Zwischen 4'000 und 6'000 m bekundete er, trotz vermehrter O<sub>2</sub>-Abgabe, ziemliche Atmungsschwierigkeiten, erkennbar an der variablen Pulsdauer und an der Spitze der mittleren Atemfrequenz von 28 Atemzügen/min. Nicht mehr so junge Segelflieger (z.B. ab Alter 50) mit Höhenambitionen sind hier besonders angesprochen und sollten sich früh beginnend und reichlicher als früher Sauerstoff beim Alpenfliegen gönnen, anstatt das eigene Alterwerden zu verleugnen.

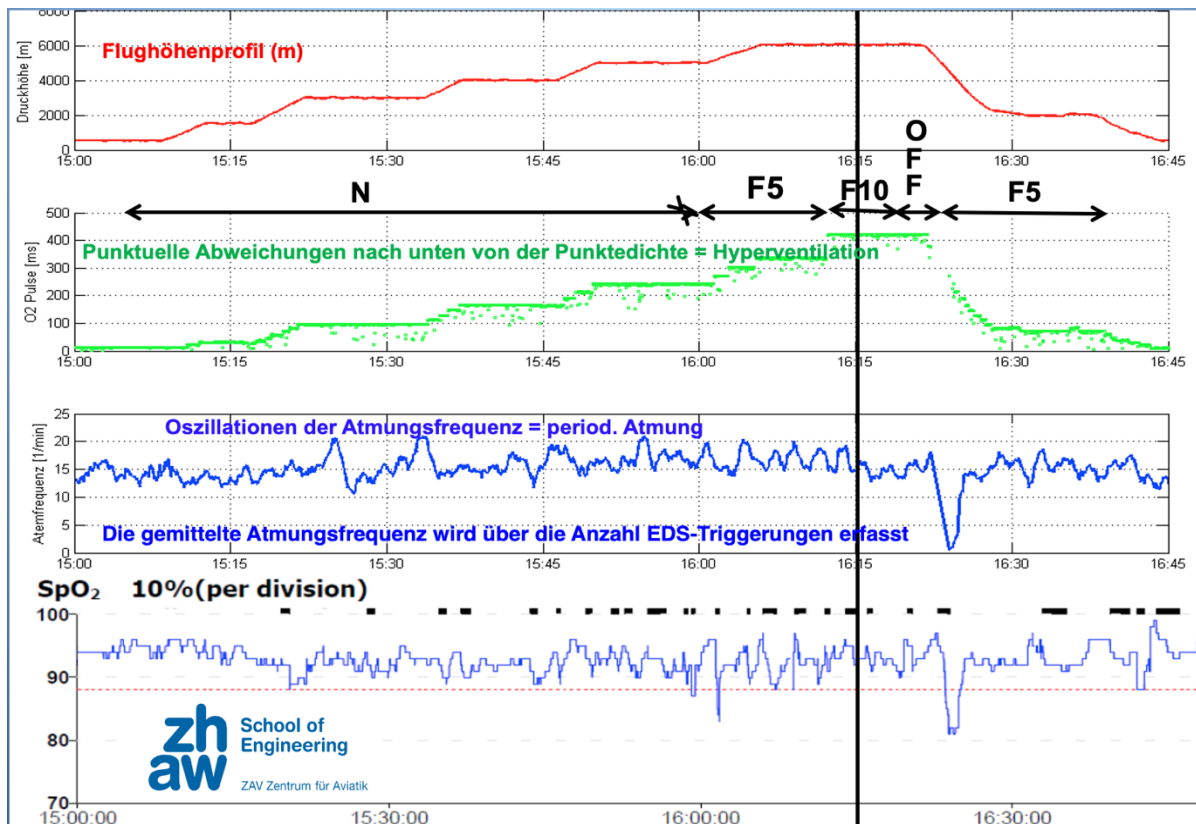
Die vertikale schwarze Linie zeigt das Ende des Versuches auf 6'000 m an. Die Probanden konnten ihre EDS settings von dort an selbst wählen. Wer auf 6'000 m sein **EDS auf Off** stellte, wurde ab 35 s später mit einem O<sub>2</sub>-Sättigungs-Absturz bestraft.

Von Interesse ist auch die Bestimmung der Ansprechzeiten der Handgelenks Pulsoxymeter CMS 50 I mit Fingersensor: Um den Druckausgleich UK- Mittelohr vor dem eigentlichen Höhengaufstieg auf 7'500m zu testen, wurde zu Beginn der UK-Druck «implosiv» auf 4'000 m abgesenkt, was die UK schlagartig einnebelte. Dabei blieben die EDS der beiden jungen Bachelorkandidaten auf Off. Die Tabelle gibt Auskunft über die chronometrierten Verzögerungen der POM-Anzeigen auf 4'000 m:

	Räz	Ricci
<b>EDS wird eingeschaltet (Modus R/M)</b>		
Zeit bis zum Beginn des SpO <sub>2</sub> Anstiegs	25 s	25 s
Zeit bis zum maximalem SpO <sub>2</sub> / Maximalwert	40 s / 99 %	40 s / 99 %
<b>EDS wird ausgeschaltet</b>		
Zeit bis zum Beginn des SpO <sub>2</sub> Abfalls	35 s	55 s
Zeit bis zum minimalen SpO <sub>2</sub> / Minimalwert	65 s / 90 %	120 s / 89 %
<b>EDS wird eingeschaltet (Modus R/M)</b>		
Zeit bis zum Beginn des SpO <sub>2</sub> Anstiegs	20 s	15 s
Zeit bis zum maximalem SpO <sub>2</sub> / Maximalwert	30 s / 99 %	45 s / 98 %



Obige Aufzeichnungen betreffen einen erst 36 jährigen Probanden mit 86 kg KG, einem BMI von 25.4, doch als langjähriger Raucher von 20 Cig/Tag bekannt, ohne bereits eine chron. Raucherbronchitis aufzuweisen. Auch er zeigt zwei Episoden von periodischer Atmung ab 3'000 m und brauchte zur «Nullhypoxie» die settings F5 und F10, trotz einer hohen Atemfrequenz auf 6'000 m.





Die letzten Aufzeichnungen auf der vorherigen Seite betreffen einen 38-jährigen Probanden von stolzen 94 kg KG und einem BMI von 31.41, welcher 15 Cigaretten/Tag raucht. Auch er musste Gebrauch von den F-settings F5 und F10 machen, um seine Ausgangssättigung von 95 % einigermaßen zu halten.

### **3. Schlussfolgerungen:**

Der gewählte Titel für diesen Aufsatz (Bis auf welche Flughöhe ist das EDS safe?) ist mit Absicht als Frage gewählt, obwohl er eigentlich irreführend ist, denn es ist nicht das Gerät EDS, das ab einer gewissen Höhe plötzlich «unsafe» wird, sondern die Unkenntnis seiner Wirkungsweise, Gefahren damit, wie auch seine unkritische Verwendung, besonders in Flughöhen oberhalb 6'000 m, welche jedenfalls eine ATC-clearance benötigen.

Ehrlicherweise existiert keine «safe» Maximalhöhe beim EDS, welche für sämtliche Arten Höhenflüge und das gesamte Kollektiv der Aeronauten gefahrlos ist, so wie es auch keine «safe» reglementarische FAR/EASA-Höhenlimite gibt, welche für sämtliche Aeronauten, ob jung oder alt, leicht- oder schwergewichtig, fit oder rekonvaleszent, ausgeruht oder chronisch gestresst und übermüdet dieselbe sein kann. Lediglich das meist noch mögliche, «safe» medizinische) Ueberleben beim Höhenfliegen, wenn möglich ohne Hirnschaden, ist nicht mehr erstrebenswert