

Aus der Klinik und Poliklinik für Augenheilkunde

des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf

Direktor Prof. Dr. G. Richard

Untersuchung des Sauerstoffgehaltes in  
Flugzeugkabinen während Langstreckenflügen und Kontrolle  
der Blutgase unter entsprechenden Bedingungen  
in der Höhen-Klima-Simulationsanlage

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin der  
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg vorgelegt von

Frank Neuwirth  
aus Gingen an der Fils  
Hamburg 2008

Angenommen von der Medizinischen Fakultät  
der Universität Hamburg am: **15.09.2008**

Veröffentlichung mit Genehmigung der Medizinischen  
Fakultät der Universität Hamburg

Prüfungsausschuss, der Vorsitzende: **Prof. Dr. J. Draeger**

Prüfungsausschuss: 2. Gutachter: **Prof. Dr. E. Rumberger**

Prüfungsausschuss: 3. Gutachter: **Prof. Dr. X. Baur**

Prüfungsausschuss: Stellv. Mitglied: **Prof. Dr. A. Goetz**

*Meinen Eltern, Großeltern und meiner  
Schwester gewidmet*

# 1. Inhaltsverzeichnis

<b>1. Inhaltsverzeichnis</b>	<b>1</b>
<b>2. Arbeitshypothese und Fragestellung</b>	<b>4</b>
<b>3. Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>3.1 Physikalische Grundlagen und Gesetzmäßigkeiten</b>	<b>5</b>
3.1.1 Struktur der Erdatmosphäre	5
3.1.2 Zusammensetzung der Atmosphäre	6
3.1.3 Die ICAO-Standardatmosphäre (1964)	7
3.1.4 Die Gasgesetze	10
<b>3.2 Physiologische Grundlagen</b>	<b>13</b>
3.2.1 Atmung	13
3.2.1.1 Gasaustausch in der Lunge	13
3.2.1.2 Sauerstofftransport im Blut	15
3.2.1.2.1 Transportformen	15
3.2.1.2.2 O <sub>2</sub> -Transportkapazität	17
3.2.1.2.3 Veränderungen der O <sub>2</sub> -Affinität des Hämoglobins	17
3.2.1.2.4 Inaktive Formen des Hämoglobins	19
3.2.1.3 Kohlendioxidtransport im Blut	20
<b>3.3 Einführung in die Höhenphysiologie</b>	<b>21</b>
3.3.1 Abfall des arteriellen PO <sub>2</sub> und der HbO <sub>2</sub> -Sättigung	21
3.3.2 Zunahme der pulmonalen Ventilation	23
3.3.3 Abnahme des Plasmavolumens	23
3.3.4 Steigerung der Erythropoese	24
3.3.5 Zunahme der Sympathikus-Aktivität	24
3.3.6 Abnahme von Herzschlagvolumen und kardialen Auswurf	24
3.3.7 Abnahme der linksventrikulären Dimension	25
3.3.8 Veränderung der O <sub>2</sub> -Bindungskurve	25
3.3.9 Abnahme der sensomotorischen Leistung	26
3.3.10 Höhenumstellung und Höhenakklimatisation	26
<b>3.4 Historischer Abschnitt</b>	<b>29</b>
3.4.1 Die Anfänge der Luftfahrt	29
3.4.2 Die ersten Jet Airliner	30
3.4.3 Andere Wege in der Raumfahrt	31

---

<b>3.5</b>	<b>Heutige Gegebenheiten</b>	<b>32</b>
3.5.1	Funktionsweise moderner Druckklimaanlagen	32
3.5.2	Druckregelung	35
<b>4.</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Untersuchung im Verkehrsflugzeug</b>	<b>39</b>
4.1.1	Airline, Flugzeugtyp, Strecken	39
4.1.2	Sauerstoffmessung	40
<b>4.2</b>	<b>Untersuchung in der Höhen-Klima-Simulationsanlage</b>	<b>40</b>
4.2.1	Höhen-Klima-Simulationsanlage	40
4.2.1.1	Allgemeine Beschreibung	40
4.2.1.2	Technische Beschreibung	42
4.2.1.3	Sicherheitstechnische Einrichtungen	43
4.2.1.4	Messwerterfassung und Verarbeitung	44
4.2.2	Beschreibung der untersuchten Parameter	45
4.2.2.1	Blutbild	45
4.2.2.2	Blutgasanalyse	46
4.2.2.3	Pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung	46
4.2.2.4	Messung der Fingertemperatur	48
4.2.2.5	Statistische Auswertung	48
4.2.3	Beschreibung des untersuchten Kollektivs	49
4.2.4	Untersuchungsablauf	50
4.2.4.1	Voruntersuchung	50
4.2.4.2	Vorbereitung in der HKS	50
4.2.4.3	Flugprofil	51
4.2.4.4	Datenerfassung	52
<b>5.</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>54</b>
<b>5.1</b>	<b>Ergebnisse in der Flugzeugkabine</b>	<b>54</b>
<b>5.2</b>	<b>Ergebnisse in der Höhen-Klima-Simulationsanlage</b>	<b>54</b>
5.2.1	Allgemeinbefinden	54
5.2.2	Luftzusammensetzung in der Unterdruckkammer	54
5.2.3	Sauerstoffpartialdruck im Kapillarblut	55
5.2.4	Sauerstoffsättigung	57
5.2.5	Fingertemperatur	59
5.2.6	Hämatokrit	61
5.2.7	Partialdruck des Kohlendioxids	61
5.2.8	Alter, Gewicht und Körpergröße	63

6.	<i>Diskussion</i>	65
7.	<i>Zusammenfassung</i>	72
8.	<i>Literaturverzeichnis</i>	74
9.	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	83
10.	<i>Tabellenverzeichnis</i>	86
11.	<i>Danksagung</i>	86
12.	<i>Lebenslauf</i>	88
13.	<i>Erklärung</i>	90

## 2. Arbeitshypothese und Fragestellung

Es ist bekannt, dass mit zunehmender Höhe der Sauerstoffpartialdruck abnimmt. Nicht bekannt ist jedoch, ob sich der absolute Sauerstoffgehalt der Kabinenluft auf Langstreckenflügen verändert, wenn aus wirtschaftlichen Gründen die Frischluftzufuhr gedrosselt wird. Unseres Wissens wurde der Sauerstoffgehalt während der Flüge in jüngerer Zeit nicht nachgemessen, jedenfalls ist aus der gängigen Literatur nichts darüber bekannt, und so liegt die Vermutung nahe, dass man sich auf die Berechnungen der Ingenieure verlässt.

Die Anzahl der Fluggäste, die mit kommerziellen Airlines reisen, ist in den letzten Jahren stark gestiegen und wird in Zukunft noch weiter wachsen. Das Durchschnittsalter der Passagiere steigt entsprechend der soziodemographischen Veränderung der Bevölkerungsstruktur und aufgrund des Angebots an billigen Tickets. Es gibt nur wenige Untersuchungen über den Einfluss von Flugreisen auf die Sauerstoffsättigung im Blut, die unter der Normalbevölkerung durchgeführt wurden [41]. Humphreys fand heraus, dass bei 54% der Passagiere die peripheren Sauerstoffsättigungswerte im Blut von 97% in Ortshöhe auf 94% und darunter in Reise Flughöhe absanken. Sättigungsmessungen bei gesunden Airlinepiloten während Routineflügen, bei denen mehr als die Hälfte auf Werte von 90% ( $\text{PaO}_2 \approx 58 \text{ mmHg}$ ) sanken [15], lassen darauf schließen, dass eine nicht zu geringe Anzahl von Passagieren ebenfalls eine signifikante Hypoxie erleidet [55]. Dies könnte auch der Grund dafür sein, dass respiratorische Probleme die Mehrheit der Notfälle an Bord von Flugzeugen darstellen, hervorgerufen durch Verschlimmerung bereits bestehender gesundheitlicher Probleme während des Fluges [62].

In einer früheren Studie fanden wir des weiteren signifikante Unterschiede beim Vergleich der pulsoxymetrischen Sauerstoffsättigungswerte ( $\text{SpO}_2$ ) zwischen Frauen und Männern (in 8000 ft:  $t = 2,1948$ ;  $0,002 < p < 0,005$ ) [58]. Deshalb ist ein weiteres Ziel der vorliegenden Arbeit auch diesen Befund anhand von genaueren Untersuchungen mit zusätzlichen Parametern, wie z.B. der Blutgasanalyse und der Messung der Fingertemperatur, zu erklären. Da die Druckhöhen bei Reiseflügen üblicherweise zwischen 6000 ft und 8000 ft (1829 m und 2438 m) liegen, legten wir unser Hauptaugenmerk auf diese Höhen.

### 3. Einleitung

#### 3.1 Physikalische Grundlagen und Gesetzmäßigkeiten

##### 3.1.1 Struktur der Erdatmosphäre

Die Erdatmosphäre erstreckt sich vom Boden bis in eine Höhe von 2000-3000 km und geht dann ohne scharfe Abgrenzung in den Weltraum über. Durch ihre unterschiedlichen thermischen Eigenschaften kann man sie in verschiedene Stufen unterteilen.

Die Troposphäre ist die unterste Schicht und beträgt an den Polen ca. 6-8 km, am Äquator jedoch durch die erhöhte Sonneneinstrahlung 10-12 km. Obwohl sie nur einen sehr kleinen Teil der Gesamtatmosphäre einnimmt, enthält sie etwa 75-80% der atmosphärischen Gase. Der Grund dafür ist, dass Gase kompressibel sind und der Luftdruck mit steigender Höhe nichtlinear abnimmt. Da in der Troposphäre nahezu der gesamte Wasserdampf der Atmosphäre enthalten ist, spielt sich hier das Wettergeschehen ab. Typisch ist auch eine nahezu konstante Temperaturabnahme von knapp 2°C pro 1000 ft Höhengewinn.

Die Stratosphäre wird von der Troposphäre durch die Tropopause abgegrenzt, eine Schicht, in der die Temperatur konstant bleibt. In der Stratosphäre, die sich bis etwa 55 km Höhe ausdehnt, steigt die Temperatur wieder auf 0°C an. Der Grund für diesen Temperaturanstieg ist die Umwandlung von Sauerstoff (O<sub>2</sub>) zu Ozon (O<sub>3</sub>) durch UV-Strahlung.

Die über der Stratopause liegenden Schichten, die Mesosphäre (70-80 km Höhe), Thermosphäre (ca. 800 km Höhe) und die Exosphäre (2000-3000 km Höhe) spielen für die Zivilluftfahrt derzeit noch keine Rolle [63].

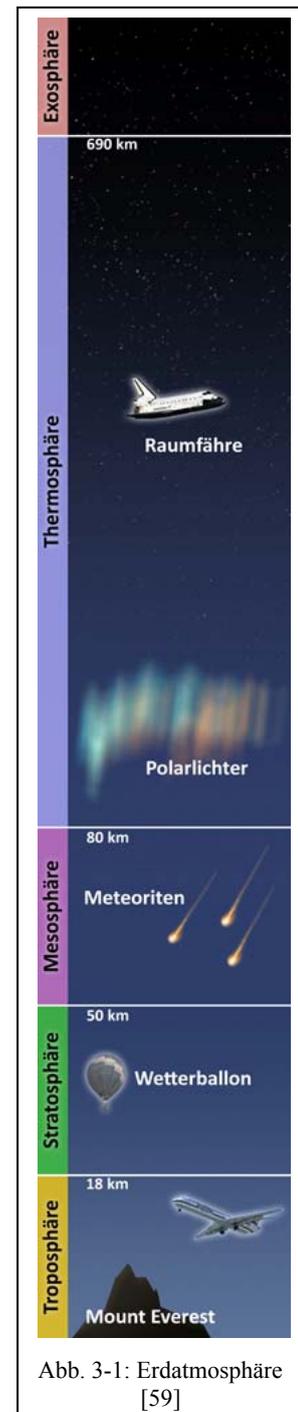


Abb. 3-1: Erdatmosphäre [59]

### 3.1.2 Zusammensetzung der Atmosphäre

Die Gaszusammensetzung der Atmosphäre ist zwischen Meereshöhe und etwa 100 km Höhe bemerkenswert konstant. Begründet wird dies durch die vertikalen



Abb. 3-2: Die Erdatmosphäre vom Weltraum gesehen [59]

Luftbewegungen, die zu einer starken Durchmischung führen. Die Luft besteht zu 78% aus Stickstoff ( $N_2$ ), 20,9% aus Sauerstoff ( $O_2$ ), 0,9% aus Argon (Ar) und zu etwa 0,1% aus Kohlendioxid ( $CO_2$ ) und Edelgasen (s. Tab. 3-1). Ozon ( $O_3$ ) ist ein weiterer wichtiger Bestandteil der Atmosphäre, jedoch erst in Höhen zwischen

etwa 12 und 42 km. Die niedrigeren Schichten der Atmosphäre bis etwa 10 km Höhe enthalten je nach Temperatur auch einen signifikanten Anteil an Wasserdampf [33].

Tabelle 3-1: Gaszusammensetzung der Atmosphäre [33]

Chemischer Stoff	Chemisches Zeichen	Volumenanteil (%)
Stickstoff	$N_2$	78,09
Sauerstoff	$O_2$	20,95
Argon	Ar	0,93
Kohlendioxid	$CO_2$	0,03
Neon	Ne	$1,82 \times 10^{-3}$
Helium	He	$5,24 \times 10^{-4}$
Krypton	Kr	$1,14 \times 10^{-4}$
Wasserstoff	$H_2$	$5,00 \times 10^{-5}$
Xenon	Xe	$8,70 \times 10^{-6}$
Ozon (Wert veränderlich)	$O_3$	$7,00 \times 10^{-7}$

### 3.1.3 Die ICAO-Standardatmosphäre (1964)

Die weltweit benutzte ICAO-Standardatmosphäre (International Civil Aviation Organization) wurde aus praktischen Standardisierungsgründen eingeführt. Sie charakterisiert den Luftdruck und die Temperatur der wirklichen Atmosphäre auf einer Breite von 45° Nord nur in etwa. Zusätzlich hat sie folgende Besonderheiten:

Die Luft ist trocken, staubfrei und von definierter chemischer Zusammensetzung (s. Tab. 3-1)

Der Luftdruck in Meereshöhe beträgt 760 mmHg bzw. 1013,25 hPa

Die Luftdichte in Meereshöhe beträgt 1,225 kg/m<sup>3</sup>

Die relative Molmasse der Luft beträgt 28,9644

Die Erdanziehung beträgt 9,80665 m/s<sup>2</sup> und ist konstant

Das Temperatur-Höhenprofil sieht aus wie folgt:

Temperatur in Meereshöhe +15°C

1,98°C Abkühlung pro 1000 ft

Tropopausenhöhe bei 11 km bzw. 36 089 ft

Temperatur der isothermalen Schicht der Stratosphäre von -56,5°C zwischen 11 km und 20 km bzw. 36 089 ft und 65 616 ft

Temperatur steigt progressiv ab 65 616 ft an und beträgt bei 100 000 ft -46°C

Tabelle 3-2: ICAO (1964): Standardatmosphäre [26]

Höhe		Luftdruck	Temperatur
[ft]	[m]	[mmHg]	[°C]
0	0	760	+15,0
1000	305	733	+13,0
2000	610	706	+11,0
3000	914	681	+9,1
4000	1219	656	+7,1
5000	1525	632	+5,1
6000	1829	609	+3,1
7000	2134	586	+1,1
8000	2438	565	-0,9
9000	2743	543	-2,8

Höhe		Luftdruck	Temperatur
[ft]	[m]	[mmHg]	[°C]
10 000	3048	523	-4,8
11 000	3353	503	-6,8
12 000	3658	483	-8,8
13 000	3962	465	-10,8
14 000	4267	447	-12,7
15 000	4572	429	-14,7
16 000	4879	412	-16,7
17 000	5182	395	-18,7
18 000	5486	380	-20,7
19 000	5791	364	-22,6
20 000	6096	349	-24,6
21 000	6401	335	-26,6
22 000	6706	321	-28,6
23 000	7010	307	-30,6
24 000	7315	294	-32,6
25 000	7620	282	-34,5
26 000	7925	270	-36,5
27 000	8230	258	-38,5
28 000	8534	247	-40,5
29 000	8839	236	-42,5
30 000	9144	226	-44,4
31 000	9449	215	-46,4
32 000	9754	206	-48,4
33 000	10 058	196	-50,6
34 000	10 363	187	-52,4
35 000	10 668	179	-54,2
36 000	10 973	170	-56,3
37 000	11 278	162	-56,5
38 000	11 582	155	-56,5
39 000	11 887	147	-56,5
40 000	12 192	141	-56,5
41 000	12 497	134	-56,5
42 000	12 802	128	-56,5
43 000	13 107	122	-56,5
44 000	13 411	116	-56,5
45 000	13 716	111	-56,5
46 000	14 021	106	-56,5
47 000	14 326	101	-56,5
48 000	14 630	96	-56,5
49 000	14 935	91	-56,5

Höhe		Luftdruck	Temperatur
[ft]	[m]	[mmHg]	[°C]
50 000	15 240	87	-56,5
51 000	15 545	83	-56,5
52 000	15 850	80	-56,5
53 000	16 155	76	-56,5
54 000	16 459	72	-56,5
55 000	16 764	69	-56,5
56 000	17 069	66	-56,5
57 000	17 374	62	-56,5
58 000	17 679	60	-56,5
59 000	17 983	57	-56,5
60 000	18 288	54	-56,5
65 000	19 812	42	-56,5
70 000	21 336	33	-55,2
75 000	22 860	26	-53,6
80 000	24 348	21	-52,1
85 000	25 908	16	-50,6
90 000	27 432	13	-49,1
95 000	28 956	10	-47,5
100 000	30 480	8	-46,0

### 3.1.4 Die Gasgesetze

Die physikalischen Gesetze, die das Verhalten von Gasen sowohl in Gasmischungen als auch in gelöster Form in Flüssigkeiten beschreiben, tragen entscheidend dazu bei den Einfluss der Höhe auf die menschliche Physiologie zu verstehen.

Voraussetzung für die Gültigkeit der Gasgesetze ist, dass der Zustand der gasförmigen Bestandteile der Luft in einem großen Temperatur- und Druckbereich annähernd dem Zustand eines idealen Gases entspricht, so dass auch die Zustandsgleichung für ideale Gase eine prinzipielle Gültigkeit besitzt [79]:

$$P \times V = m \times R \times T$$

P = Luftdruck in mbar

V = Volumen eines Gases in cm<sup>3</sup>

m = Masse des Gases in g

R = spezifische Gaskonstante

(beträgt für trockene Luft: 2,8704 10<sup>-1</sup> J x g<sup>-1</sup> x K<sup>-1</sup>)

bzw.

$$P \times V / T = m \times R = \text{const.}$$

T = Temperatur in Kelvin

#### Boyle-Mariottesches Gasgesetz

Dieses Gesetz besagt, dass sich das Volumen einer bestimmten Gasmenge umgekehrt proportional zum Umgebungsdruck verhält, vorausgesetzt, die Temperatur bleibt konstant.

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

P<sub>1</sub> = Druck in der Ausgangshöhe

V<sub>1</sub> = Volumen in der Ausgangshöhe

P<sub>2</sub> = Druck in der veränderten Höhe

V<sub>2</sub> = Volumen in der veränderten Höhe

Daraus folgt, dass sich das Volumen von Gasen bei abnehmendem Druck (Steigflug) ausdehnt und bei zunehmendem Druck (Sinkflug) verringert. Ein Gasvolumen in 18 000 ft (5 486 m) ist doppelt so groß wie in Meereshöhe, in 39 000 ft (11 887 m) 5-fach größer [79].

Dies gilt auch für die in menschlichen Höhlen eingeschlossenen Gase, wie z.B. Magen, Darm, Nasennebenhöhlen und Mittelohr, jedoch mit der Einschränkung, dass der Wasserdampfdruck der im menschlichen Organismus feuchtigkeitsgesättigten Gase abgezogen werden muss. Die Verringerung des Gesamtgasdrucks um den Wasserdampfpartialdruck führt dazu, dass sich feuchtigkeitsgesättigte Gase stärker ausdehnen als trockene Luft. Bei einer in der zivilen Luftfahrt üblichen maximalen Kabinendruckhöhe von 8000 ft (2438 m) haben sich die Gase im Körper auf etwa das 1,5-fache Volumen ausgedehnt.

### **Daltonsches Gasgesetz**

Das Daltonsche Gasgesetz beschreibt das Verhalten der einzelnen Gase in einem Gasgemisch wie z. B. der Luft. Es besagt, dass der Gesamtdruck eines Gasgemisches gleich der Summe aller Teildrücke der einzelnen Gase ist.

$$P = p_1 + p_2 + p_3 \dots + p_n$$

Der Teildruck eines Gases in einem Gasgemisch entspricht seinem prozentualen Volumenanteil:

$$p = P \times \text{Vol } \%$$

Für den Sauerstoffpartialdruck in der ICAO-Standardatmosphäre gilt dann:

$$P_{O_2} = 1013 \text{ hPa (760 mmHg)} \times 20,95 \% = 212 \text{ hPa (159,2 mmHg)} [33].$$

Mit abnehmender Höhe nimmt der Luftdruck und damit ebenso der Sauerstoffpartialdruck ab. So beträgt der O<sub>2</sub>-Partialdruck in 8000 ft (2438 m) Höhe nur noch 158 hPa (118 mmHg). Da der menschliche Organismus durch ein Druckgefälle zwischen O<sub>2</sub>-Partialdruck in der Umgebung und O<sub>2</sub>-Partialdruck in den Erythrozyten mit Sauerstoff versorgt wird, kommt es bei zu geringen Druckdifferenzen zu einem Sauerstoffmangel (Hypoxie). Diese Erscheinung kann sich in Kreislaufregulationsstörungen, ggf. Luftnot trotz vermehrten Atemantriebs und sogar möglichen Beeinträchtigungen der Funktionen des ZNS (Zentralnervensystem) äußern.

**Gasgesetz von Henry**

Das Gasgesetz von Henry besagt, dass die Menge eines physikalisch, also nicht chemisch gebundenen, in Flüssigkeiten gelösten Gases direkt proportional zum Druck des über der Flüssigkeit liegenden Gases ist, vorausgesetzt die Temperatur bleibt konstant. Je stärker der Druck eines Gases auf eine Flüssigkeit drückt, desto mehr Gas wird in der Flüssigkeit gelöst und umgekehrt [79]. Die absolute Menge (C) des in Flüssigkeit gelösten Gases (x) ist daher abhängig von dem Löslichkeitsprodukt ( $\alpha$ ) des Gases in Flüssigkeit (Bunsenscher Löslichkeitskoeffizient) und von seinem Partialdruck (P).

$$C_x = \alpha_x \times P_x$$

Dieses Gasgesetz hat große Bedeutung für das Verhalten des Blutes bei plötzlich abnehmendem Umgebungsdruck. Im Blut liegen Sauerstoff, Kohlendioxid und Stickstoff physikalisch gelöst vor. Sauerstoff und Kohlendioxid sind im Wesentlichen chemisch im Blut gebunden, während Stickstoff ausschließlich physikalisch gelöst ist und keine chemische Bindung im Blut eingeht. Kommt es nun zu einem Druckabfall in der Umgebungsluft, geht der gelöste Stickstoff in seine gasförmige Phase über. Nur relativ langsam stellt sich in der Lunge durch Diffusion des Stickstoffs ein neues Gleichgewicht her. Bei einem plötzlichen Druckabfall ist die Diffusion von Stickstoff zu langsam, und es kann deshalb zur Gasbläschenbildung und schließlich zu einer Gasembolie im Körper kommen. Symptome durch zu schnelle Gasbläschenfreisetzung werden unter dem Begriff Druckfallkrankheit oder Dekompressionskrankheit zusammengefasst. Bekannt ist das Phänomen bei Tauchern als Caissonkrankheit [33, 63].

**Charles' Gasgesetz**

Das Gasgesetz von Charles besagt, dass das Gasvolumen bei konstantem Druck direkt proportional zu seiner absoluten Temperatur ist [33].

$$V_1 / V_2 = T_1 / T_2 = (t_1 + 273) / (t_2 + 273)$$

$V_1$  = ursprüngliches Volumen     $T_1$  = ursprüngliche absolute Temperatur     $t_1$  = ursprüngliche Temperatur in °C  
 $V_2$  = verändertes Volumen     $T_2$  = veränderte absolute Temperatur     $t_2$  = veränderte Temperatur in °C

### **Gay-Lussacsches Gasgesetz**

Das Gasgesetz von Gay-Lussac besagt, dass sich bei konstantem Druck alle Gase proportional zum Anstieg der Temperatur ausdehnen [63].

### **Gasdiffusionsgesetz**

Das Gasdiffusionsgesetz beschreibt, dass Moleküle in unterschiedlichen Lösungen von der höher konzentrierten Lösung in die mit niedriger Konzentration diffundieren. Zusammen mit dem Fickschen Gesetz, das die Verhältnisse bei Gasdiffusion durch Gewebe beschreibt, ergeben sich Wechselwirkungen zum Gasgesetz von Henry und erklärt damit eine Grundlage für das Auftreten der Druckfallkrankheit [63].

## **3.2 Physiologische Grundlagen**

### **3.2.1 Atmung**

Betrachtet man die Atmung näher, so kann man zwischen einer äußeren und einer inneren Atmung unterscheiden. Die äußere Atmung bezeichnet den Gasaustausch zwischen Körper und Umwelt, die innere Atmung die Versorgung von Zellen und Geweben mit Sauerstoff sowie die Entsorgung von Kohlendioxid. Der Sauerstoff gelangt zusammen mit der Atemluft durch die Atembewegungen des Thorax in die Lunge.

Die Erwärmung und Befeuchtung der Inspirationsluft findet überwiegend im Nasen-Rachen-Raum statt, so dass sie beim Eintritt in die Alveolen die Körpertemperatur von 37°C erreicht hat und vollständig mit Wasserdampf gesättigt ist.

#### **3.2.1.1 Gasaustausch in der Lunge**

In den Alveolen erfolgt der Austausch der Atemgase zwischen der Gasphase und dem Blut entsprechend dem Partialdruckgefälle. Die Zahl der Alveolen wird auf etwa 300 Millionen geschätzt, so dass sich eine Gesamtoberfläche von ca. 140 m<sup>2</sup> ergibt. Die Trennung zum Lungenkapillarblut erfolgt durch die so genannte alveolokapilläre Membran. Sie hat eine Dicke von etwa 1 µm und stellt deshalb nur ein geringes Hindernis für die Diffusion der Atemgase dar [77].

Die Ruhe-Atemfrequenz beträgt normalerweise ca. 15 Atemzüge pro Minute. Bei einem Atemzugvolumen von 500 ml werden ca. 7,5 l/min Luft eingeatmet, wovon etwa 5,25 l/min in die Alveolen gelangen; die Differenz ist Totraumventilation.

Der Sauerstoffanteil der Einatemluft beträgt 20,95 % und der Kohlendioxidanteil 0,03 %. In der Ausatemluft ist der Sauerstoffanteil 16 % und der Kohlendioxidanteil 4 %. Für den Erwachsenen in körperlicher Ruhe beträgt die Sauerstoffaufnahme etwa 280 ml/min, die Kohlendioxidabgabe 230 ml/min (s. Tab. 3-3).

Tabelle 3-3: Inspiratorische, alveoläre und expiratorische Fraktionen bzw. Partialdrücke der Atemgase bei Ruheatmung in Meereshöhe [66].

	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
<b>Inspirationsluft</b>	0,209	0,0003	150 mmHg (20 kPa)	0,2 mmHg (0,03 kPa)
<b>Alveoläres Gasgemisch</b>	0,14	0,053	100 mmHg (13,3 kPa)	40 mmHg (5,3 kPa)
<b>Expirationsgemisch</b>	0,16	0,04	114 mmHg (15,2 kPa)	29 mmHg (3,9 kPa)

In den Alveolen betragen der  $P_{O_2}$  100 mmHg (13,33 kPa) und der  $P_{CO_2}$  40 mmHg (5,33 kPa). Im arteriellen Teil der Alveolarkapillaren wird das sauerstoffarme Blut aus dem Organismus zum Gasaustausch herangeführt. Dort liegen die Werte für den  $P_{O_2}$  bei 40 mmHg (5,33 kPa) und für den  $P_{CO_2}$  bei 46 mmHg (6,27 kPa). Durch dieses Druckgefälle wird die Diffusion zwischen Alveolarraum und Erythrozyten aufrechterhalten. Der Gasaustausch findet in der Zeit statt, in der die Erythrozyten mit den Alveolen in Kontakt sind und dauert ca. 0,75 Sekunden. Anschließend entsprechen die Partialdrücke im venösen Teil der Alveolarkapillaren annähernd denen in den Alveolen. Die Kontaktzeit kann bei körperlicher Arbeit bis auf ein Drittel des Ruhewertes verringert sein [79].

### 3.2.1.2 Sauerstofftransport im Blut

#### 3.2.1.2.1 Transportformen

##### 1. Physikalisch gelöst im Plasma

Nach dem Gesetz von Henry ist die gelöste Menge an Sauerstoff abhängig von seinem Partialdruck und von seinem Löslichkeitskoeffizienten:

$C_x = \alpha_x \times P_x$ . Der Löslichkeitskoeffizient,  $\alpha_x$ , hängt seinerseits wiederum von der Art der Flüssigkeit, der Art der Moleküle, X, sowie der Temperatur ab. Er beträgt bei 37°C Körpertemperatur  $0,211 \text{ ml}_{\text{STPD}} \text{ O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ . Zur Berechnung der gelösten Gasmenge benötigt man nun noch das Volumen V.

$$M_x = \alpha_x \times V \times P_x$$

$M_x$  = gelöste Gasmenge

$\alpha_x$  = Bunsen-Löslichkeitskoeffizient

$P_x$  = Partialdruck

Der physikalisch gelöste Sauerstoff beträgt beim Menschen etwa 0,13 mmol/l und spielt für die Sauerstoffversorgung des Gewebes gegenüber dem in bedeutenderem Umfang chemisch gebundenen Sauerstoff eine eher geringe Rolle. Dieser Zustandsform wird jedoch eine große biologische Bedeutung beigemessen. Bevor die Sauerstoffmoleküle eine chemische Verbindung eingehen können, müssen sie erst in gelöster Form zu ihren Reaktionspartnern wandern. Das bedeutet, dass jedes Sauerstoffmolekül, das in der Lunge oder im Gewebe ausgetauscht wird, zuvor den Zustand der physikalischen Lösung durchlaufen hat. Dies gilt auch für den Transport von Kohlendioxid im Körper.

## 2. Chemisch gebunden an Erythrozyten

Der überwiegende Teil des im Blut transportierten Sauerstoffs ist chemisch

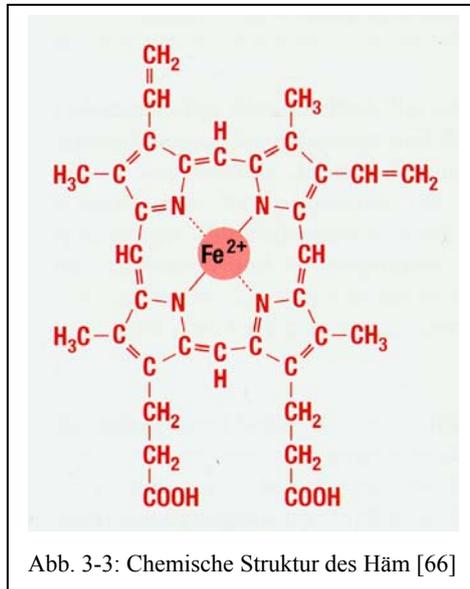


Abb. 3-3: Chemische Struktur des Häm [66]

an das Hämoglobin gebunden. Hämoglobin ist ein Chromoprotein, das aus Globin und vier Häm-Molekülen besteht. Das Globin des Erwachsenen setzt sich aus vier Untereinheiten zusammen, je zwei helleren  $\alpha$ -Ketten und zwei dunkleren  $\beta$ -Ketten. Das Häm besteht aus einem Protoporphyrinring, gebildet aus vier Pyrrolringen, die über Methinbrücken miteinander verbunden sind und charakteristische Seitenketten tragen. Entscheidend für die Funktion ist das zentral angeordnete Eisenatom Fe<sup>2+</sup> (siehe Abb. 3-3).

Entscheidend für die Funktion ist das zentral angeordnete Eisenatom Fe<sup>2+</sup> (siehe Abb. 3-3).

An dieses zweiwertige Eisenatom wird Sauerstoff ohne Wertigkeitsänderung reversibel angelagert. Das Hämoglobin (Hb) geht in Oxyhämoglobin (HbO<sub>2</sub>) über. Man spricht hier von Oxygenation, um deutlich zu machen, dass die Sauerstoffanlagerung ohne Wertigkeitsänderung stattfindet. Die Reaktion des Sauerstoffs folgt dem Massenwirkungsgesetz. Es ist demnach vom Sauerstoffpartialdruck abhängig, wieviel Hämoglobin in Oxyhämoglobin übergeht. Der Anteil des Oxyhämoglobins am insgesamt vorliegenden Hämoglobin wird als Sauerstoffsättigung (SO<sub>2</sub>) bezeichnet und in Prozent angegeben. Dieser Zusammenhang stellt sich graphisch als charakteristische s-förmige Kurve, der Sauerstoffbindungskurve, dar. Die Sauerstoffaffinität zum Hämoglobin wird außerdem durch verschiedene Faktoren wie Temperatur, pH-Wert und CO<sub>2</sub>-Partialdruck bestimmt (s. Abb. 3-4).

### 3.2.1.2.2 *O<sub>2</sub>-Transportkapazität*

Durch den tetrameren Molekülaufbau des Hämoglobins (s. Abb. 3-3) kann ein Hämoglobinmolekül maximal vier O<sub>2</sub>-Moleküle binden. Das heißt, dass 1 mol Hämoglobin in der Lage ist 4 mol O<sub>2</sub> zu binden. Wenn man das Molvolumen für ideale Gase (22,4 l) berücksichtigt, stellt man fest, dass 1 g Hb 1,39 ml O<sub>2</sub> bindet. Durch Blutgasanalysen wurde von HÜFNER ein etwas kleinerer Wert für die O<sub>2</sub>-Bindungskapazität des Hämoglobins von 1,34 ml O<sub>2</sub>/g Hb (Hüfner-Zahl) angegeben.

Die Konzentration an Hämoglobin ist geschlechtsspezifisch und beträgt für Männer 155 g/l Blut und für Frauen 145 g/l. Daraus ergibt sich eine O<sub>2</sub>-Transportkapazität von 210 ml O<sub>2</sub>/l bei Männern bzw. 195 ml O<sub>2</sub>/l bei Frauen.

### 3.2.1.2.3 *Veränderungen der O<sub>2</sub>-Affinität des Hämoglobins*

Funktionelle Änderungen der O<sub>2</sub>-Affinität des Hämoglobins ergeben sich aus einer Rechts-Links-Verschiebung der Lage und einer veränderten Form der O<sub>2</sub>-Bindungskurve sowie einer reversiblen oder nicht reversiblen Blockierung der O<sub>2</sub>-Transportfähigkeit.

#### 1. Temperatureinfluss

Wie bei den meisten chemischen Prozessen beeinflusst die Temperatur auch das Gleichgewicht der Sauerstoff-Hämoglobin-Reaktion. Bei einer Erhöhung der Temperatur verläuft die O<sub>2</sub>-Bindungskurve flacher, bei einer Erniedrigung der Temperatur verläuft sie steiler (siehe Abb. 3-4: A). Dieser Effekt ist beim Menschen normalerweise von geringer biologischer Bedeutung, jedoch ist er in bestimmten Fällen wie z.B. Hypothermie oder bei Fieber zu berücksichtigen.

#### 2. Einfluss des pH-Werts und des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks

Der pH-Wert ist das Maß für die Protonenkonzentration im Blut. Mit steigender Protonenkonzentration nimmt die Azidität des Blutes zu und es erfolgt eine Verringerung des pH-Wertes. Durch den niedrigeren pH-Wert sinkt die Affinität des Sauerstoffs zum Hämoglobin und die O<sub>2</sub>-Bindungskurve nimmt einen flacheren Verlauf an (siehe Abb. 3-4: B). Diese pH-Abhängigkeit der

O<sub>2</sub>-Bindungskurve wird als Bohr-Effekt bezeichnet. Der Bohr-Effekt erleichtert die Sauerstoffaufnahme des Blutes in der Lunge sowie die Sauerstoffabgabe im Gewebe.

Außerdem steht der pH-Wert in enger Beziehung zum jeweils vorliegenden CO<sub>2</sub>-Partialdruck. Das Ansteigen des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks führt wiederum zu einem Absinken der Affinität des Sauerstoffs zum Hämoglobin, und auch hier verläuft die O<sub>2</sub>-Bindungskurve flacher (s. Abb. 3-4: C). Auch diese Abhängigkeit der O<sub>2</sub>-Bindungskurve vom CO<sub>2</sub>-Partialdruck wird als Bohr-Effekt bezeichnet. Eine genauere Betrachtung lässt jedoch vermuten, dass der CO<sub>2</sub>-Einfluß auf die O<sub>2</sub>-Bindungskurve nicht allein auf die entsprechende pH-Änderung zurückgeführt werden kann, sondern dass zudem noch eine „spezifische CO<sub>2</sub>-Wirkung“ angenommen werden muss [66].

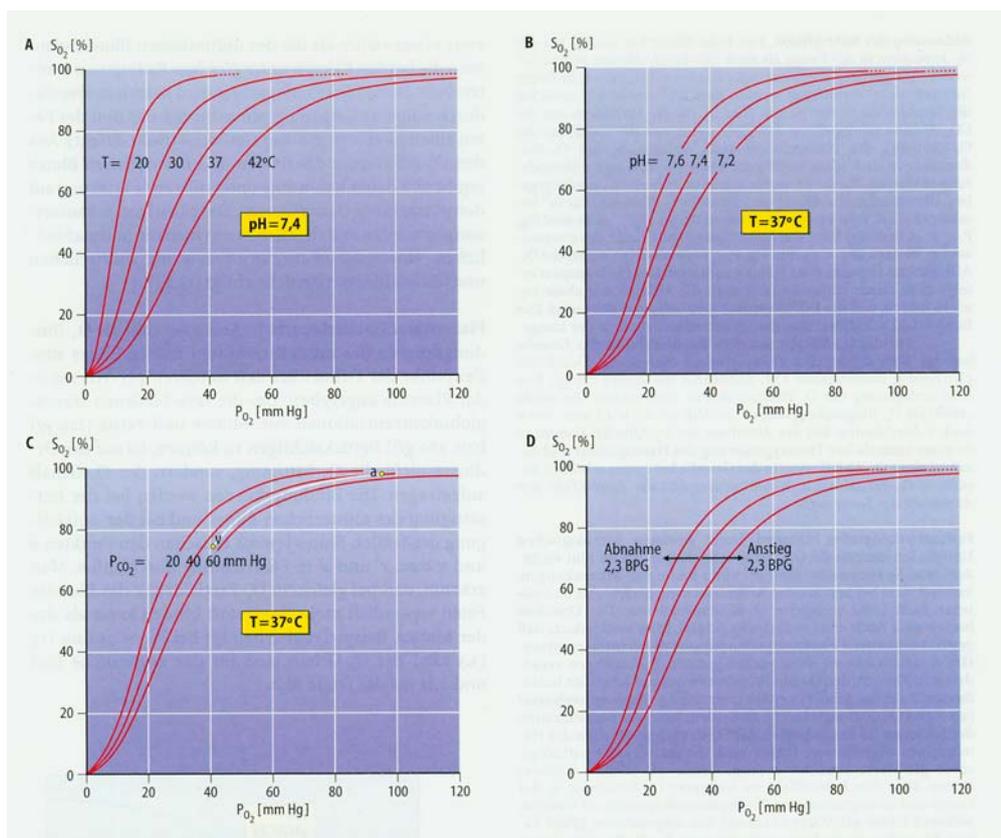


Abb. 3-4: Abhängigkeit der O<sub>2</sub>-Bindungskurve des Blutes von verschiedenen Parametern. A Temperaturabhängigkeit, B pH-Abhängigkeit (Bohr-Effekt), C Abhängigkeit vom CO<sub>2</sub>-Partialdruck, D Abhängigkeit von der intraerythrozytären Konzentration des 2,3-Biphosphoglycerat [66]

### 3. Einfluss des 2,3-Biphosphoglycerats (2,3-BPG)

Gewisse pathophysiologische Faktoren können die O<sub>2</sub>-Transportbedingungen beeinträchtigen. Zu ihnen gehört vor allem das 2,3-Biphosphoglycerat. Es handelt sich dabei um eine organische Phosphatverbindung, deren intraerythrozytäre Konzentration unter pathologischen Bedingungen verändert sein kann und die Sauerstoffbindung an das Hämoglobin umgekehrt proportional beeinflusst (s. Abb. 3-4: D).

#### 3.2.1.2.4 *Inaktive Formen des Hämoglobins*

##### 1. Carboxyhämoglobin

Kohlenmonoxid (CO) ist ein farbloses, geruchloses Gas, das bei der unvollständigen Verbrennung von organischen Substanzen entsteht. Eine Verbindung von Kohlenmonoxid mit Hämoglobin wird als Carboxyhämoglobin (HbCO) bezeichnet. Kohlenmonoxid hat eine etwa 300-mal größere Affinität zu Hämoglobin als Sauerstoff und ist in geringen inspiratorischen Fraktionen in der Lage, Sauerstoff aus der Hämoglobinverbindung zu verdrängen. Auf diese Weise ist der Blutfarbstoff für den Sauerstofftransport blockiert.



Das Reaktionsgleichgewicht dieser Gleichung ist durch die große Affinität des Kohlenmonoxids zum Hämoglobin sehr stark nach rechts verlagert. Dies führt bei der CO-Bindungskurve des Hämoglobins zu deren sehr steilem Verlauf.

Für die Giftigkeit des Kohlenmonoxids ist neben der Blockierung des Hämoglobins noch ein weiterer Faktor ausschlaggebend. Ist ein Teil des Hämoglobins in Carboxyhämoglobin umgewandelt, dann weist das noch unblockierte Hämoglobin eine nach links verlagerte Sauerstoffbindungskurve auf, die schließlich sogar Hyperbelform annehmen kann. Dadurch sinken die Sauerstoffpartialdrücke in den Gewebekapillaren noch weiter ab.

Im Durchschnitt liegt etwa 1% des Hämoglobins als HbCO vor, bei starken Rauchern können abends bis zu 15% HbCO gemessen werden.

## 2. Methämoglobin

Methämoglobin (Met Hb, Hämiglobin) entsteht durch die Oxidierung des zweiwertigen Eisens des Häms ( $\text{Fe}^{2+}$ ) zum dreiwertigen ( $\text{Fe}^{3+}$ ) spontan oder durch Oxidationsmittel (z.B. Nitrate, Nitrite, anilinhaltige Stoffe), weshalb  $\text{O}_2$  nicht mehr reversibel angelagert werden kann. Die Reduktion des  $\text{Fe}^{3+}$  erfolgt im Organismus durch die Methämoglobinreduktase.

### 3.2.1.3 Kohlendioxidtransport im Blut

Der Kohlendioxidtransport im Blut erfolgt im wesentlichen über drei unterschiedliche Transportformen [79]:

1. Physikalisch gelöst im Plasma: Der Haupttransport des  $\text{CO}_2$  erfolgt physikalisch gelöst, da die Löslichkeit des Kohlendioxids mehr als 20 mal so hoch ist wie die des Sauerstoffs.
2. Als Bicarbonat in den Erythrozyten und im Plasma, reversibel chemisch gebunden :  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$
3. Als Carbamat an freien Aminosäuren der Proteine, besonders des Hämoglobins.

### 3.3 Einführung in die Höhenphysiologie

#### 3.3.1 Abfall des arteriellen $PO_2$ und der $HbO_2$ -Sättigung

Die Einatemsluft wird bei der Passage durch die oberen Atemwege komplett mit Wasser gesättigt ( $P_{H_2O}$  bei  $37^\circ C = 47 \text{ mmHg}$ ). Der intraalveoläre  $PO_2$  sinkt dadurch in Meereshöhe auf einen Wert von  $149 \text{ mmHg}$  gegenüber  $159 \text{ mmHg}$  in der Umgebungs-

luft ab. Wegen der Totraumventilation kommt es bei weiterem Absinken des  $PO_2$  auf  $100 \text{ mmHg}$  zu einem Anstieg des  $PCO_2$  auf  $40 \text{ mmHg}$ .

Da der  $PO_2$  der A. pulmonalis einen Wert von  $40 \text{ mmHg}$  hat und in der Alveole ein  $PO_2$  von  $100 \text{ mmHg}$  anzutreffen ist, entsteht ein Partialdruckgefälle von  $60 \text{ mmHg}$  für  $O_2$  von Alveole zu Lungenkapillare.

Der Sauerstoffpartialdruck wird hierbei durch die inspiratorisch zugeführte  $O_2$ -Menge, die expiratorisch abgeführte  $CO_2$ -Menge, sowie die alveoläre Ventilation bestimmt. Vom Alveolarraum durch das Kapillarendothel in die Lungenkapillare wird die Arterialisierung des Blutes durch Diffusionsvorgänge ermöglicht. Dadurch werden arterielle Sauerstoffpartialdruckwerte erreicht, die bei gesunden Menschen fast das alveolär bestimmte Niveau erreichen (siehe Abb. 3-5). Der Austausch der Atemgase erfolgt auf

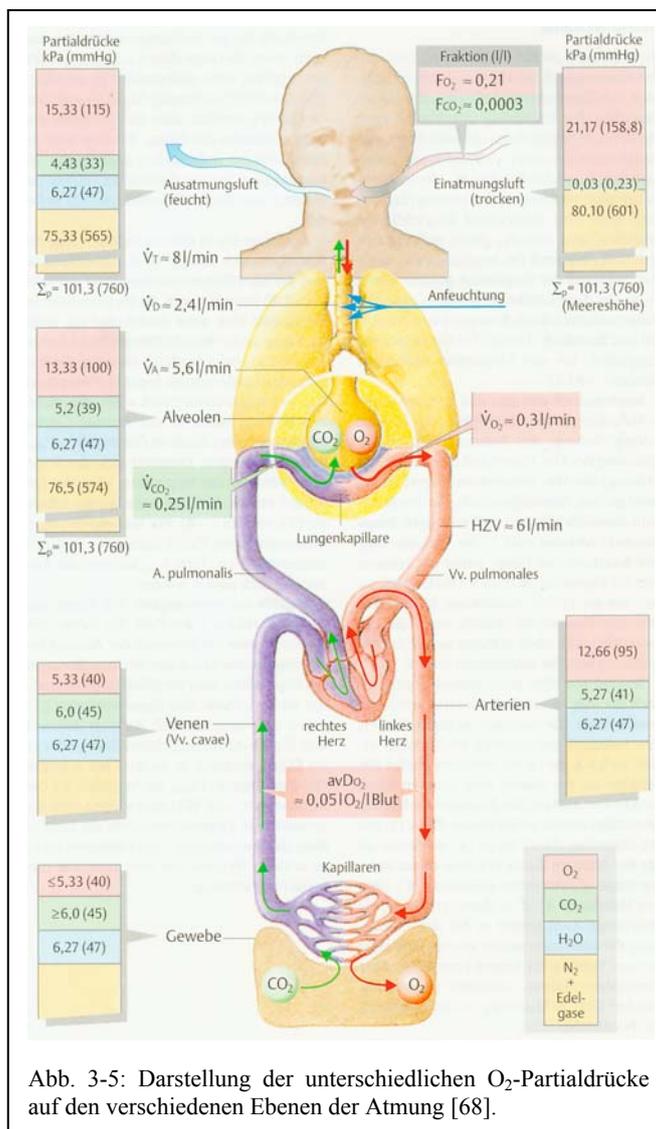


Abb. 3-5: Darstellung der unterschiedlichen  $O_2$ -Partialdrücke auf den verschiedenen Ebenen der Atmung [68].

des Blutes durch Diffusionsvorgänge ermöglicht. Dadurch werden arterielle Sauerstoffpartialdruckwerte erreicht, die bei gesunden Menschen fast das alveolär bestimmte Niveau erreichen (siehe Abb. 3-5). Der Austausch der Atemgase erfolgt auf

Gewebeebene zwischen Kapillarblut und Zelle durch Diffusion, analog dem Atemgasaustausch in der Lunge.

Die Gesetzmäßigkeiten der Diffusion auf den verschiedenen Ebenen des Lungen- und Kreislaufsystems, also auf alveolärer, arterieller, kapillärer, zellulärer, venöser und expiratorischer Ebene, auf denen das Verhalten des Sauerstoffpartialdrucks und der übrigen Atemgase begründet ist, wurden von A. Fick genauer definiert (siehe Gasdiffusionsgesetz Kapitel 3.1.4).

Die oben beschriebenen Gasaustauschvorgänge bleiben unter den Bedingungen der Höhenexposition prinzipiell vergleichbar mit denen in Meereshöhe. Der ausschlaggebenden Unterschied liegt jedoch darin, dass, durch den reduzierten inspiratorischen  $PO_2$  bedingt, der alveoläre  $PO_2$  ebenfalls reduziert ist und somit der geringere Diffusionsgradient auf alle nachgeschalteten Diffusionsebenen Auswirkung hat. Auf arterieller, kapillärer, zellulärer und venöser Ebene werden nur noch geringere Sauerstoffpartialdrücke und arterielle  $HbO_2$ -Sättigungen erreicht.

Der in Meereshöhe gemessene arterielle  $PO_2$  von 94 mmHg und die arterielle  $HbO_2$ -Sättigung von 97% fallen bei einem Höhengaufstieg auf 8000 ft ( 2438 m) auf Werte von 60 mmHg arterieller  $PO_2$  und 89% arterielle  $HbO_2$ -Sättigung ab. Bei einem weiteren Höhengaufstieg findet ein wesentlich stärkerer Abfall der Werte statt, so dass in 14 000 ft (4268 m) nur noch ein arterieller  $PO_2$  von 46 mmHg und eine arterielle  $HbO_2$ -Sättigung von 77 % messbar sind [40].

Vorwiegend unter Verwendung von arteriellem  $PO_2$  und  $HbO_2$ -Sättigung differenziert Hultgren drei verschiedene Höhenstufen nach physiologischen Bedingungen:

High Altitude	8000 – 14 000 ft (2438 – 4270 m)
Very High Altitude	14 000 – 18 000 ft (4270 – 5490 m)
Extreme Altitude	18 000 – 29 000 ft (5490 – 8848 m)

Andere Autoren haben nahezu übereinstimmende Vorstellungen [36, 49, 52], obwohl eine scharfe Trennung der einzelnen Höhenbereiche nach physiologischen bzw. pathophysiologischen Kriterien nicht möglich ist. Einmütig werden jedoch 7000 – 8000 ft ( 2134 – 2438 m) teilweise schon seit Anfang der Druckkabinenära als

gerade noch akzeptable maximale Höhe angesehen, der man unadaptierte Personen, wie z.B. Flugpassagiere, unter Abwägung aller Vor- und Nachteile noch aussetzen kann [36, 49, 52]. Bei einem normalen Kollektiv von Passagieren, unter denen sich erfahrungsgemäß auch Patienten befinden können, würden bei noch höheren Kabinendruckhöhen klinisch relevante höhenbedingte Veränderungen und Krankheiten erheblich häufiger in Erscheinung treten.

Die in diesem Kapitel teilweise dargestellten Auswirkungen des in der Höhe geringer werdenden Gesamtdrucks auf die Gasaustauschvorgänge im menschlichen Organismus sind schon seit vielen Jahren gemessen und beschrieben worden [13, 23, 27, 30, 35, 37]. Die Auswirkungen auf ältere Menschen sind unseren Kenntnissen nach jedoch nur wenig untersucht worden [48, 55].

### **3.3.2 Zunahme der pulmonalen Ventilation**

Bei einer Verminderung des arteriellen  $O_2$ -Drucks kommt es über die Vermittlung von Chemorezeptoren zu einer Hyperventilation. In einer Höhe von ca. 20 000 ft (ca. 6000 m) führt dies zu einer Verdoppelung des Atemminutenvolumens [60]. Als Chemorezeptoren dienen die Rezeptoren im Glomus caroticum und die in den Paraganglien des Aortenbogens (Glomera aortica) lokalisierten Rezeptoren. Die hier gebildeten Nervenimpulse gelangen über afferente Fasern des N. vagus zum Atemzentrum. Die Chemorezeptoren in den genannten Paraganglien antworten mit einer Aktivitätszunahme, d.h. mit einer Zunahme der Impulsfrequenz, wenn der  $O_2$ -Partialdruck abnimmt. Die dadurch bedingte Hyperventilation bewirkt eine verstärkte  $CO_2$ -Exspiration, welche eine Hypokapnie und eine respiratorische Alkalose mit einem pH-Wert-Anstieg zur Folge hat. Nach einigen Tagen Höhenexposition bewirken renale Kompensationsmechanismen eine Normalisierung dieser Werte, ungeachtet der noch vorhandenen Hypokapnie [40].

### **3.3.3 Abnahme des Plasmavolumens**

Auf die durch die zelluläre Hypoxie bedingten „fluid shifts“ vom vaskulären zum intrazellulären Raum hin lässt sich am wahrscheinlichsten die 10 – 15%-ige Vermin-

derung des Plasmavolumens innerhalb der ersten Tagen nach Höhenexposition zurückführen [20, 40]. Dies erklärt mutmaßlich auch den Anstieg von Vollblut-, Plasmaviskosität, Hämatokrit, Hämoglobin usw. bereits in den ersten 24 Stunden nach Höhenexposition [24].

### **3.3.4 Steigerung der Erythropoese**

Innerhalb der ersten Tage nach Höhenexposition kommt es durch eine hypoxiebedingte Stimulation der renalen Erythropoetinproduktion zu einem Anstieg von Hämoglobin und Hämatokrit. Die vergrößerte Transportkapazität des Blutes gleicht somit die verringerte O<sub>2</sub>-Sättigung aus. Jedoch kann eine Beeinträchtigung der Zirkulation durch eine erhöhte Blutviskosität verursacht sein [54]. Für das erhöhte Auftreten thromboembolischer Komplikationen bei längeren Höhenexpositionen muss dieser Mechanismus als mit ursächlich angesehen werden [69].

### **3.3.5 Zunahme der Sympathikus-Aktivität**

Puls- und Blutdruckanstieg, Zunahme der kardialen Auswurfleistung und Anstieg des Basalstoffwechsels stellen sich nach wenigen Tagen der Höhenexposition als Zeichen einer zusätzlichen Aktivierung des sympathischen Nervensystems ein. Jedoch fällt nach längerem Höhengedächhalt das sympathische Aktivitätsniveau auf Werte, die unter dem ursprünglichen Ausgangswert auf Meereshöhe liegen [40].

### **3.3.6 Abnahme von Herzschlagvolumen und kardialem Auswurf**

Das Herzschlagvolumen und die kardiale Auswurfleistung, sowohl in Ruhe als auch unter Belastung, sinken nach ein- bis zweiwöchiger Höhenexposition unter die Ausgangswerte in Meereshöhe [3]. Die pathophysiologischen Mechanismen hierzu sind noch nicht endgültig geklärt.

### 3.3.7 Abnahme der linksventrikulären Dimension

Eine Volumenverminderung der linken Herzkammer wird parallel zur Abnahme des Herzschlagvolumens und der kardialen Auswurfleistung beobachtet. Als Ursache wird das verminderte Plasmavolumen diskutiert [29].

### 3.3.8 Veränderung der O<sub>2</sub>-Bindungskurve

Die Reaktion des Sauerstoffs mit dem Hämoglobin folgt dem Massenwirkungsgesetz. Das bedeutet, dass die Konzentration des physikalisch gelösten O<sub>2</sub>, die nach dem Henry-Dalton-Gesetz (siehe Kapitel 2.1.4 ) dem O<sub>2</sub>-Partialdruck proportional ist, bestimmt, welcher Anteil des Hämoglobins in Oxyhämoglobin überführt wird. Dieser Konzentrationsanteil des Oxyhämoglobins an der insgesamt vorliegenden Hämoglobinkonzentration wird O<sub>2</sub>-Sättigung genannt.

Mit zunehmender Höhe nimmt der O<sub>2</sub>-Partialdruck ab, die Sättigung bleibt durch den s-förmigen Verlauf der O<sub>2</sub>-Bindungskurve jedoch anfangs relativ stabil. Die Steigung der Kurve wird, wie schon in Kapitel 1.2.1.2.1. beschrieben, durch verschiedene Faktoren wie PCO<sub>2</sub>, pH-Wert und Temperatur beeinflusst.

Ausgehend von einer Sauerstoffbindungskurve bei einem pH-Wert von 7,4 und einem PCO<sub>2</sub> von 40 mmHg (Abb. 3-6, rote Kurve) kommt es bei einer über einen gewissen Zeitraum andauernden Höhenexposition durch die Steigerung des Atemminutenvolumens, welches durch die hypobare hypoxische Hypoxie bedingt ist, zu einer Hypokapnie und einer respiratorischen Alkalose. Dies führt durch die Veränderung des pH-Wertes zu einer Linksverschiebung der Sauerstoffbindungskurve (Abb. 3-6, gelbe Kurve), die eine physiologisch sinnvolle Bedeutung für den Gasaustausch hat und wie schon in Kapitel 3.2.1.2.3 beschrieben als Bohr-Effekt bezeichnet wird. Die Linksverschiebung der O<sub>2</sub>-Bindungskurve führt zu einer O<sub>2</sub>-Affinitätszunahme, dadurch wird die Sauerstoffaufnahme auf alveolärer Ebene begünstigt. Auf kapillärer Ebene bedingt das CO<sub>2</sub>-reiche, saure Milieu eine Rechtsverschiebung der Sauerstoffbindungskurve mit der Folge einer erleichterten Sauerstoffabgabe an das Gewebe, was wiederum auf das erniedrigte Bindungsvermögens des Blutes für O<sub>2</sub> zurückzuführen ist.

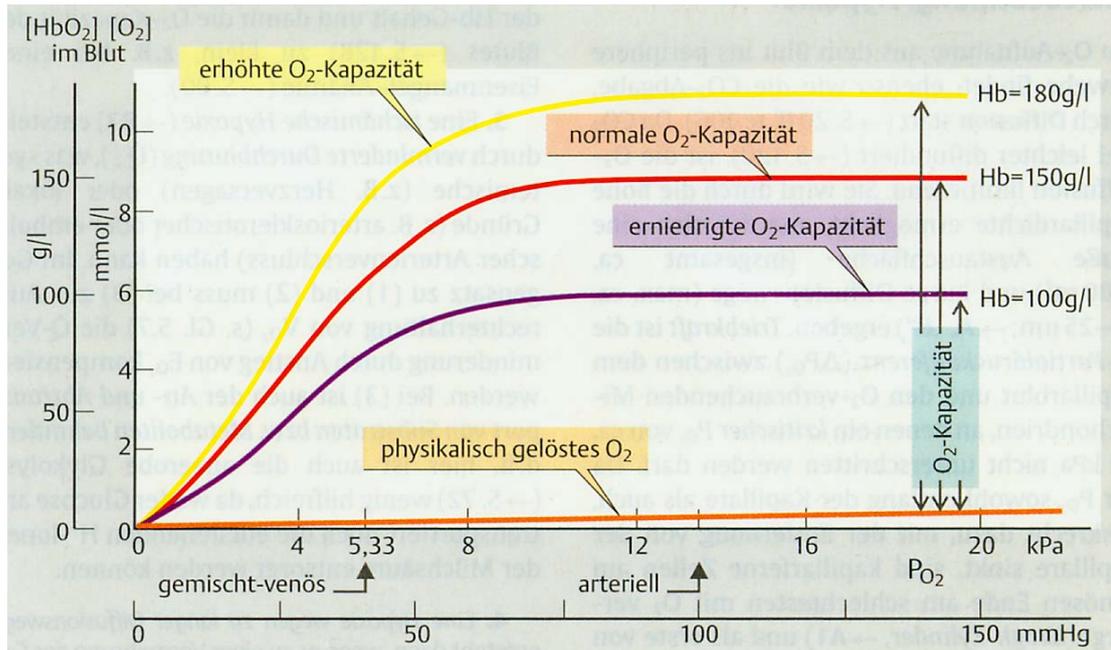


Abb. 3-6: O<sub>2</sub>-Bindungskurve des Blutes [68]

### 3.3.9 Abnahme der sensomotorischen Leistung

Unter milder Hypoxie kommt es für die meisten physiologischen Parameter nur zu geringen, klinisch nicht relevanten Änderungen. Bei bestimmten psychomotorischen, sensomotorischen und mnestischen Funktionen hingegen kann es bei entsprechend sensitiven Untersuchungsmethoden bereits bei geringer Höhenexposition zu Funktionsbeeinträchtigungen kommen [51], die sich unter Umständen ungünstig auf die Leistungsfähigkeit der jeweiligen Einzelperson auswirken können.

So wiesen beispielsweise Denison et al. (1966) mit einem komplexen Reaktionstest bereits bei einer Höhenexposition von 5000 ft (1525 m) eine verminderte Leistungsfähigkeit nach [19]. Auch bei der Wahrnehmung der Lichtintensität und der Dunkeladaptation kommt es schon bei geringer Höhenexposition zu Leistungseinschränkungen [21, 32, 52].

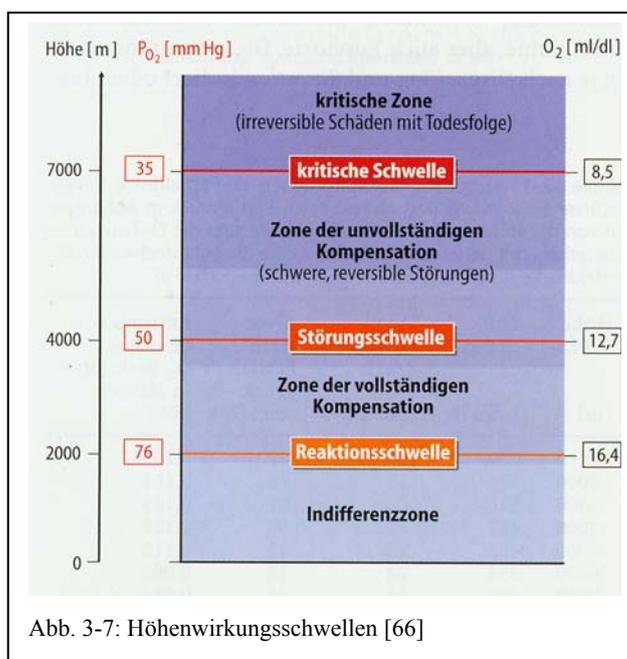
### 3.3.10 Höhenumstellung und Höhenakklimatisation

Anhand ihres zeitlichen Verlaufs können die unter hypobarer hypoxischer Hypoxie eintretenden unterschiedlichen physiologischen Veränderungen eingeteilt werden. Abhängig davon, ob die unterschiedlichen physiologischen Mechanismen bei der akuten Höhenexposition innerhalb der ersten Minuten bis Stunden oder innerhalb

von wenigen Tagen bis Monaten in Erscheinung treten, wird bei teilweise fließenden Übergängen zwischen Höhenumstellung und Höhenakklimatisation unterschieden. Hierbei sind die unterschiedlichen Veränderungen im Organismus bei Höhenbelastung aber nicht nur durch die gewählte Höhenstufe bedingt, sondern ebenso abhängig von der Art der Höhenexposition, Expositionsdauer, Geschwindigkeit des Aufstiegs und der körperlichen Belastung in der Höhe usw. [35].

H. Strughold führte 1957 den Begriff der Höhenwirkungsschwelle in die Flugphysiologie ein [71]. Anhand von praktischen und quantitativen Gesichtspunkten der Wirkung des Sauerstoffmangels auf den menschlichen Organismus unterscheidet die Flugmedizin für den gesunden, untrainierten Menschen zwischen vier Höhenzonen, die durch Höhenwirkungsschwellen begrenzt werden (siehe Abb. 3-7).

In der Indifferenzzone werden die Funktionen des Organismus gar nicht oder nur



wenig beeinträchtigt. Die Indifferenzzone endet in ca. 2000 m (6562 ft) Höhe an der Reaktionsschwelle, die in die Zone der vollständigen Kompensation überführt und bis in eine Höhe von 4000 m (13 123 ft) reicht. In dieser Zone reagiert der Organismus bereits in Ruhe auf das verringerte  $O_2$ -Angebot. Die physische sowie die psychische Leistungsfähigkeit sind spürbar vermindert. Begibt

man sich über die Störungsschwelle, so kommt man in die Zone der unvollständigen Kompensation, in der es zu erheblicher Beeinträchtigung der physischen Leistungsfähigkeit, des Reaktionsvermögens und der Entscheidungsfähigkeit kommt. Die Störungen sind jedoch reversibel.

In 7000 m (23 000 ft) Höhe, an der kritischen Schwelle, beginnt die kritische Zone. Hier unterschreitet der  $O_2$ -Partialdruck in der Alveolarluft die kritische Schwelle von 30-35 mmHg. Es treten lebensbedrohliche zentralnervöse Störungen auf, die nur

durch schnelle Erhöhung des inspiratorischen  $PO_2$  noch reversibel sind, dies ist allerdings nur innerhalb einer kurzen Zeitspanne möglich.

Die Zeitreserve, die dem Luftfahrer beim Aufenthalt in größerer Höhe bleibt, um sich z.B. bei Defekt der Druckkabine vor Bewusstlosigkeit zu schützen, nennt man Selbstrettungszeit oder Time of Useful Consciousness (TUC). Sie verkürzt sich mit zunehmender Höhe drastisch. Während in Reiseflughöhen von 9000 m bis 10 000 m (29 000 ft bis 33 000 ft) die TUC etwa 1 bis 1,5 Minuten beträgt, bleiben in 13 000 m (43 000 ft) gerade mal 15 Sekunden Zeit [28].

Bei der Betrachtung der Höhenwirkungsschwellen kann man feststellen, dass erst ab der Störschwelle, also ab 4000 m, beim Verlassen der Zone der vollständigen Kompensation mit nachteiligen Auswirkungen auf die Funktion des menschlichen Organismus und gesundheitlichen Störungen gerechnet werden muss. Allerdings kann es schon bei wesentlich geringeren Höhen aufgrund der großen interindividuellen und intraindividuellen Variationsbreite in der Reaktion auf Sauerstoffmangelexposition zu Zwischenfällen kommen. Im Besonderen gilt dies für Menschen mit flugmedizinisch relevanten Vorerkrankungen wie z.B. koronare Herzkrankheit, chronisch arterielle Verschlusskrankheit, pulmonale Insuffizienz oder Anämie [47, 73], da bei ihnen von eingeschränkten kompensatorischen Möglichkeiten ausgegangen werden muss.

Aber auch schon in relativ moderaten Höhen können andere flugmedizinische Aspekte relevante Auswirkungen zeigen. So wird von Rudge (1990) ein Fall von akuter Dekompressionskrankheit bei einem erfahrenen Boeing B-52-Piloten bereits bei einer Höhenexposition von 8000 ft (2438 m) beschrieben [65].

### 3.4 Historischer Abschnitt

#### 3.4.1 Die Anfänge der Luftfahrt

Von Anbeginn der Menschheit war wohl auch der Traum geboren, sich eines Tages wie die Vögel in die Lüfte zu erheben und den Himmel zu erobern. Viele Flugpioniere kamen dabei um, als sie diesen Traum zu verwirklichen versuchten. Der Bekannteste der griechischen Mythologie war Ikarus, der deshalb abstürzte, weil er der Sonne zu nahe kam und seine Flügel schmolzen [64] (was nach heutigen Kenntnissen jedoch eher nicht in Betracht kommt, da die Temperatur mit zunehmender Höhe abnimmt (siehe Kapitel 1.1.3.)). Es dauerte noch einige hundert Jahre länger, bis die Gebrüder Mongolfier 1783 mit ihrem berühmten Heißluftballon die Ära der Luftfahrt einläuteten. Viele weitere Flugpioniere stürzten sich zu Tode.

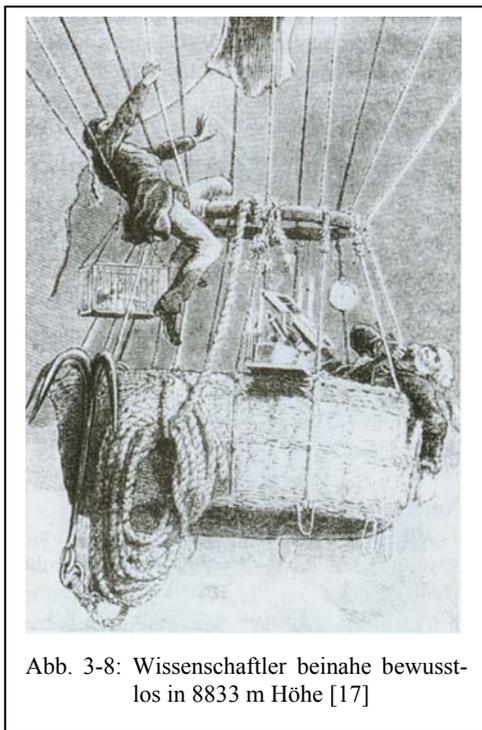


Abb. 3-8: Wissenschaftler beinahe bewusstlos in 8833 m Höhe [17]

Die ersten Opfer, die während des Aufstiegs ums Leben kamen und den Folgen von Hypoxie erlagen, waren Crocé-Spinelli und Sivel im April 1875. Mit an Bord war der Wissenschaftler Tissandier. Sie führten zwar einen kleinen Vorrat an Sauerstoff (440 l) mit sich, was ihnen aber nichts nützte, da sie bis zum allerletzten Moment abwarteten und daraufhin bewusstlos wurden. Tissandier, der als einziger überlebt hatte, beschrieb hinterher die klassischen physiologischen Symptome der Hypoxie [17]. Es dauerte jedoch noch viele Jahre, bis die physiologischen Vorgänge erforscht wurden. Eine entschei-

dende Rolle spielte dabei das Institut für Luftfahrtmedizin in Hamburg-Eppendorf (1927-1945). Ludolph Brauer galt als einer der Pioniere der deutschen Luftfahrtmedizin und nach der Stagnation des Ersten Weltkrieges war er es, der den Neuanfang in der Hansestadt machte. Die Eppendorfer Institution war für die deutsche Luftfahrtmedizin von herausragender Bedeutung, wobei neben höhenphysiologischen Aufgabenstellungen auch die Fragen der Fliegertauglichkeit bearbeitet wurden [34].

### 3.4.2 Die ersten Jet Airliner

Mit Erfindung der Strahlentriebwerke versuchte man in immer größere Höhen vorzudringen. Dort konnte schneller geflogen werden, da der Widerstand geringer ist. Um der lebensfeindlichen Umgebung in diesen Höhen zu trotzen, mussten Druckkabinen entwickelt werden, die den Luftdruck anfänglich möglichst auf Starthöhe hielten.



Abb. 3-9: Comet 1 DeHavilland D.H. 106 [78]

Der erste Jet Airliner war die Comet, DeHavilland D.H.106. Zwischen Oktober 1952 und April 1954 waren fünf rätselhafte Totalverluste dieses Flugzeugtyps zu beklagen. Langandauernde Untersuchungen zeigten, dass die Unfälle durch eine Materialermüdung in der Rumpfbeplankung der Fenster-

sektionen der Druckkabine verursacht wurden. Ein Phänomen, das bisher noch weitgehend unbekannt war. Abb. 3-10 zeigt dunkel schraffiert die geborgenen Wrackteile der BOAC G-ALYP. Das Ergebnis der Unfalluntersuchung ist mit einem Pfeil gekennzeichnet, dort lag die ursprüngliche Schwachstelle der Druckkabine. Die Comet war ihrer Zeit also weit voraus und musste dafür einen hohen Preis zahlen. Die nachfolgenden Flugzeugkonstruktionen profitierten sehr wohl aus den damals gewonnen Erkenntnissen und derartige Fehler wurden nicht

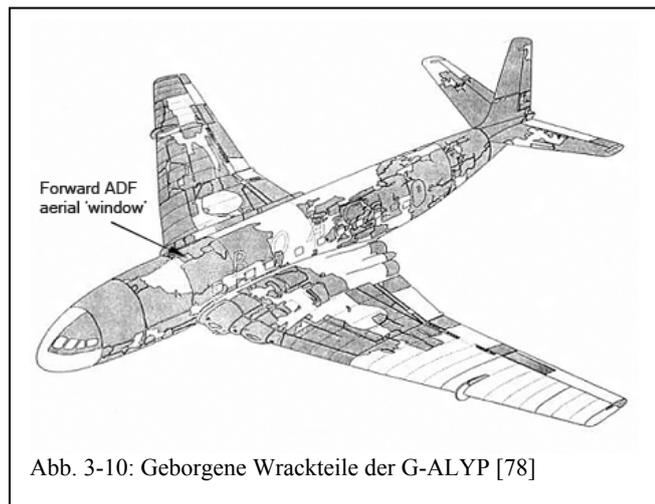


Abb. 3-10: Geborgene Wrackteile der G-ALYP [78]

mehr begangen. Die letzte Variante dieses Flugzeugtyps, die Comet 4, flog dann viele Jahre ohne Zwischenfälle [31, 70].

### 3.4.3 Andere Wege in der Raumfahrt

In der Raumfahrt wurden mit Beginn der Apollo-Missionen neue Wege eingeschlagen. Je höher der Differenzdruck ( $\Delta P$ ) zwischen Kabine bzw. Cockpit und Umgebung, umso stabiler und schwerer musste die Druckkabine gebaut sein. Um ein ge-



Abb. 3-11: Ausgebranntes Cockpit der Apollo 1 [57]

ringeres Strukturgewicht zu erzielen, senkten die amerikanischen Konstrukteure den Innendruck möglichst weit ab, um  $\Delta P$  gering zu halten. Da die Astronauten trotzdem mit genügend Sauerstoff versorgt werden mussten, wurde der  $O_2$ -Gehalt angehoben. Das führte anfangs zu einem großen Vorsprung verglichen mit den Weltraumprojekten der UdSSR, endete jedoch mit einem herben Rückschlag. Durch einen Kurzschluss verursacht, brach bei einem Routine-Preflight-Test in der fast reinen Sauerstoffatmo-

sphäre ein katastrophales Feuer aus und die drei Astronauten Virgil Grissom, Roger Chaffee und Edward White kamen in den Flammen um [57].

## **3.5 Heutige Gegebenheiten**

### **3.5.1 Funktionsweise moderner Druckklimaanlagen**

Das Verkehrsflugzeug hat in den letzten Jahrzehnten stetig an Bedeutung gewonnen und bei der Bewältigung langer Strecken sogar eine Monopolstellung erlangt. Trotz der Routine, Zuverlässigkeit und der hohen Sicherheit darf nicht übersehen werden, dass das heute Selbstverständliche einen sehr komplexen Vorgang darstellt und ein großer technischer und organisatorischer Aufwand am Boden sowie im Flugzeug erforderlich ist. Eines der wichtigsten Systeme und auf den ersten Blick nicht gleich sichtbar, ist die Druckregel-Klimaanlage, welche mehrere überlebenswichtige Aufgaben erfüllt. Um den Flugverkehr mit modernen Jettriebwerken wirtschaftlich zu betreiben, ist es notwendig in solchen Höhen zu operieren, die für Menschen nur für sehr kurze Zeit mit dem Leben vereinbar sind. In den üblichen Reiseflughöhen von 33 000 – 41 000 ft (10-12,5 km) beträgt der Luftdruck nur noch 18-26% des Drucks in Meereshöhe und es herrschen Temperaturen von -50 bis -56°C (siehe Kapitel 3.1.3 Tabelle 3-2). Die Hauptaufgabe der Druckregel-Klimaanlage besteht darin, diese feindliche Umgebung für die Passagiere so angenehm zu machen, dass sie sich komfortabel für mehrere Stunden dort aufhalten können.

Der Systemaufbau einer Druckregel-Klimaanlage besteht aus einer Luft- und Energiequelle, Luftmengenregelung und Kühlung, Temperaturregelung und Luftverteilung und außerdem aus einer Druckregelung (siehe Abb. 3-12).

Die Druckregel-Klimaanlage wird mit Luft aus den Turbinen versorgt. Dabei wird so genannte Zapfluft aus definierten Stufen des Hochdruckkompressors der Triebwerke entnommen. Dort werden Temperaturen von etwa 450°C und Drücke von bis zu 18 bar erreicht. Durch diese Entnahme im Hauptstrom des Kerntriebwerks verringert sich jedoch dessen Wirkungsgrad und es entstehen Kosten infolge von Mehrverbrauch an Kerosin. Die heiße Hochdruckluft wird zunächst in eine Druckluftanlage geleitet, die dafür sorgt, dass im anschließenden Leitungssystem zur eigentlichen Klimaanlage hin ein konstanter Druck von 3 bar mit einer Temperatur von nunmehr 180-200°C herrscht. Auch dieses System ist im Grundaufbau einfach, in der Detailausführung aber relativ komplex, da es mannigfaltige Regel- und Überwa-

chungsfunktionen einzuhalten gilt, die von Computern ausgeführt werden. Defekte und Fehler in diesem Bereich sind meist gravierend und führen häufig zu einem Abbruch des Fluges und folglich zu einer kostspieligen Ausweichlandung. Da die Zapfluft nicht gefiltert wird, entspricht die Luftqualität derjenigen der Außenluft. Eine Ausnahme bilden so genannte Ozonkonvektoren, die mittlerweile in allen Langstreckenflugzeugen eingebaut sind [44].

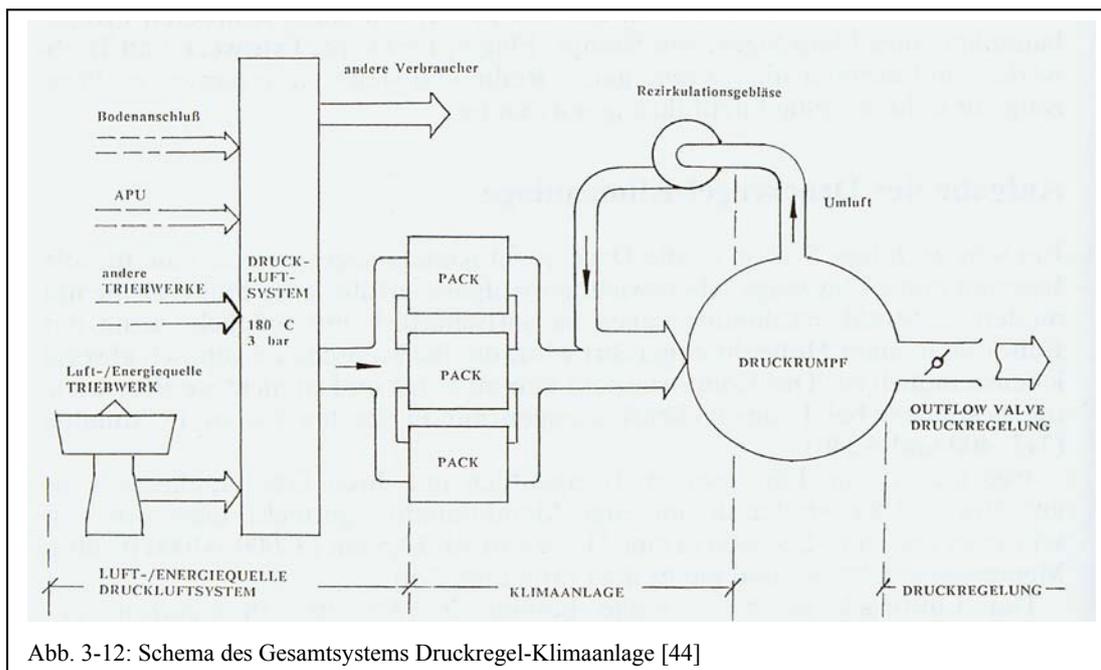


Abb. 3-12: Schema des Gesamtsystems Druckregel-Klimaanlage [44]

Die eigentliche Klimaanlage besteht aus den so genannten Air Conditioning Unit Packs. Diese sind aus Redundanzgründen, wie fast alle wichtigen Systeme, gleich mehrfach vorhanden und sind für die Belüftung, die Regelung der Luftmenge und die Temperaturregelung verantwortlich (siehe Abb. 3-13). Da jeder Passagier sitzend in Ruhe etwa 100-120 Watt an Wärme abgibt, müssen die Packs bei vollbesetzten Maschinen in der Lage sein, die Kabinentemperatur herunterzukühlen. Sie fungieren nur bei spärlich besetzten Flügen als „Heizung“. Auf eine Luftbefeuchtung muss unter anderem aus Korrosionsgründen und Kurzschlussgefahr bei Schweißwasserbildung verzichtet werden. Deshalb wird der nun geregelten Luft vor Verlassen der Packs noch einmal Feuchtigkeit entzogen.

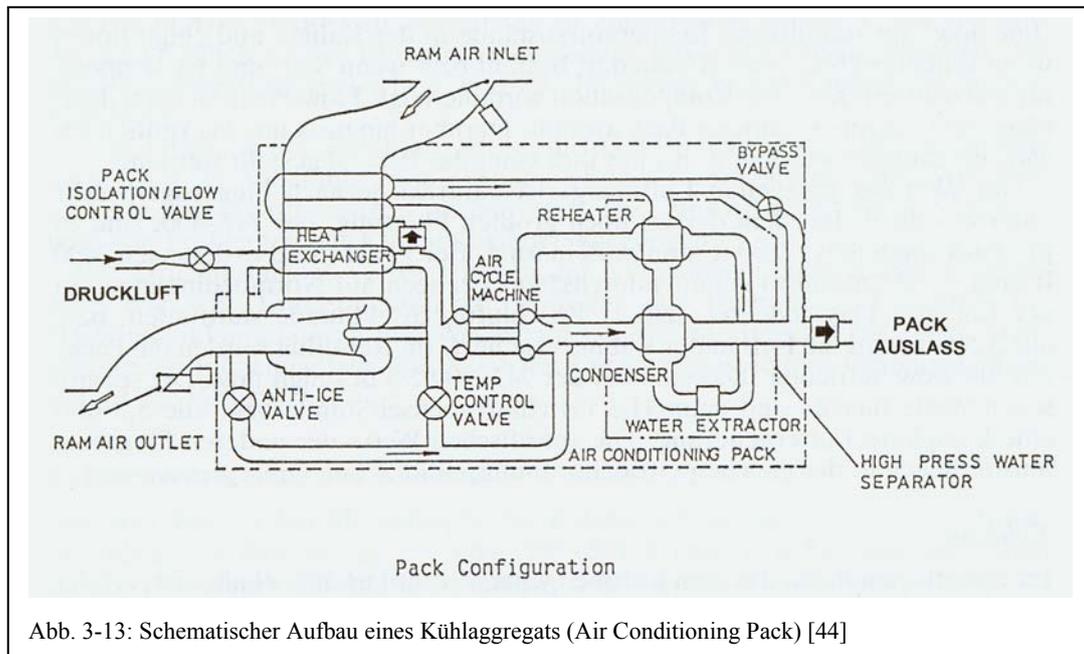


Abb. 3-13: Schematischer Aufbau eines Kühlaggregats (Air Conditioning Pack) [44]

Durch einen so genannten Distribution Manifold wird die Frischluft im Cockpit und in den verschiedenen Kabinenkompartimenten verteilt und über Belüftungsschlitze sowie individuell einstellbare Frischluftdüsen an der Kabinendecke zu den Passagieren geleitet (siehe Abb. 3-14). Die Luftgeschwindigkeit sollte im Kopf- und Körperbereich nicht mehr als 0,2 m/s betragen, um Zugluft zu vermeiden. Der Wert der zugeführten Luftmenge ist für jeden Flugzeugtyp unterschiedlich. Der Jumbo-Jet (747-400) versorgt seine Passagiere mit drei Packs im high flow à 79 m<sup>3</sup>/min, das bedeutet, dass 17 Frischluftwechsel pro Stunde stattfinden bzw. alle 3,5 Minuten die Kabinenluft komplett erneuert wird. Während des Reisefluges wird auf low flow umgestellt, was immer noch eine komplette Lufterneuerung alle 5,3 Minuten darstellt. Dass ein entsprechender Luftaustausch wichtig ist, weiß man unter anderem von Klimaanlage in Gebäuden. Liegt die Austauschrate unterhalb von fünf pro Stunde, können Symptome wie Kopfschmerz, Schwindel, Hautirritationen und anderes auftreten. Dieser Symptomenkomplex wird als „Sick-Building-Syndrom“ bezeichnet [44].

Die Abluft wird über Öffnungen am Kabinenboden zu den Drosselventilen (Outflow Valves) am hinteren Druckschott geleitet. Dort wird sie entweder nach draußen geleitet oder nach Filterung über Rezirkulationsanlagen (Recirculation Fans) der Kabine erneut zugeführt. Der Anteil an Rezirkulationsluft kann in Verkehrsflugzeugen

der neuesten Generation bis zu 50 % betragen, was zu einer erheblichen Einsparung an Treibstoff führt.

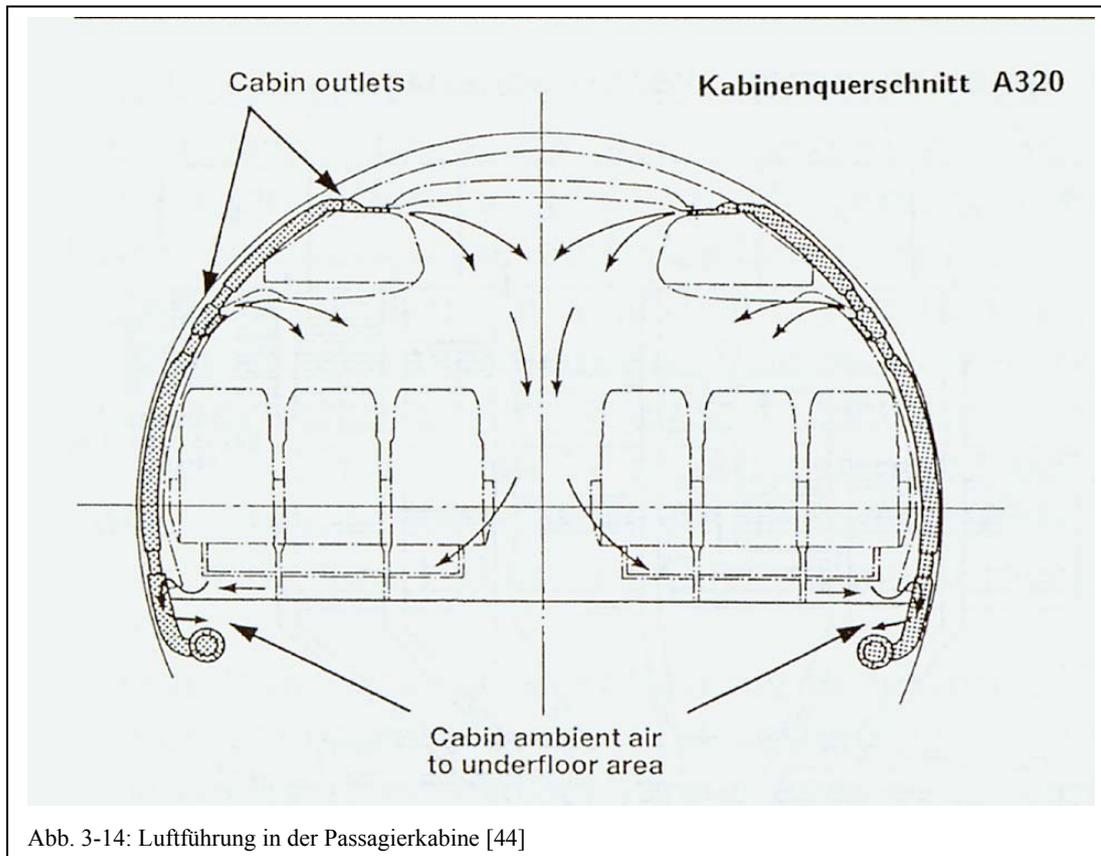


Abb. 3-14: Luftführung in der Passagierkabine [44]

### 3.5.2 Druckregelung

Wenn die Flugzeugtüren geschlossen sind, ist die Druckkabine nicht hermetisch abgeschlossen. Durch immer vorhandene Leckagen in der Struktur und an den Dichtungen entweicht ständig Luft, ebenso durch die Lüftungssysteme des Wasserabflusses in der Küche und in den Handwaschbecken. Die Druckregelung erfolgt durch ein eigenständiges System, dessen mechanische Teile aus den schon angesprochenen Outflow Valves bestehen, die sich am Ende des Rumpfs befinden und die Luft wieder an die Umgebung abführen [45]. Zur besseren Anschaulichkeit werden Druckwerte in der Kabine nicht in Pascal oder bar angegeben, sondern in äquivalenten Höhenwerten entsprechend der Standardatmosphäre. Die Kabine steigt und sinkt analog zum Flugzeug, dies geschieht jedoch mit geringerer Geschwindigkeit (siehe Abb. 3-15).

Das Flugzeug steigt und sinkt je nach Flugzeugtyp mit 2000 bis 3000 ft/min, während die Kabine auf 500 ft/min steigen und 300 ft/min sinken limitiert ist. Dies dient dem Passagierkomfort. Bei Start und Landung sind Flugzeug- und Kabinendruckhöhe gleich, innen und außen herrscht also derselbe Druck. Nach dem Start befinden sich Flugzeug und Kabine im Steigflug, jedoch mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Zu Beginn des Fluges erreichen die vollbesetzten Maschinen meist die endgültige Reiseflughöhe noch nicht, da sie noch zu schwer sind. Erst wenn genügend Treibstoff verbraucht ist und damit Gewicht reduziert wurde, erreichen die Flugzeuge über manchmal mehrere so genannte Step-Climbs die effizienteste Flughöhe, in unserem illustrierten Beispiel in 39 000 ft.

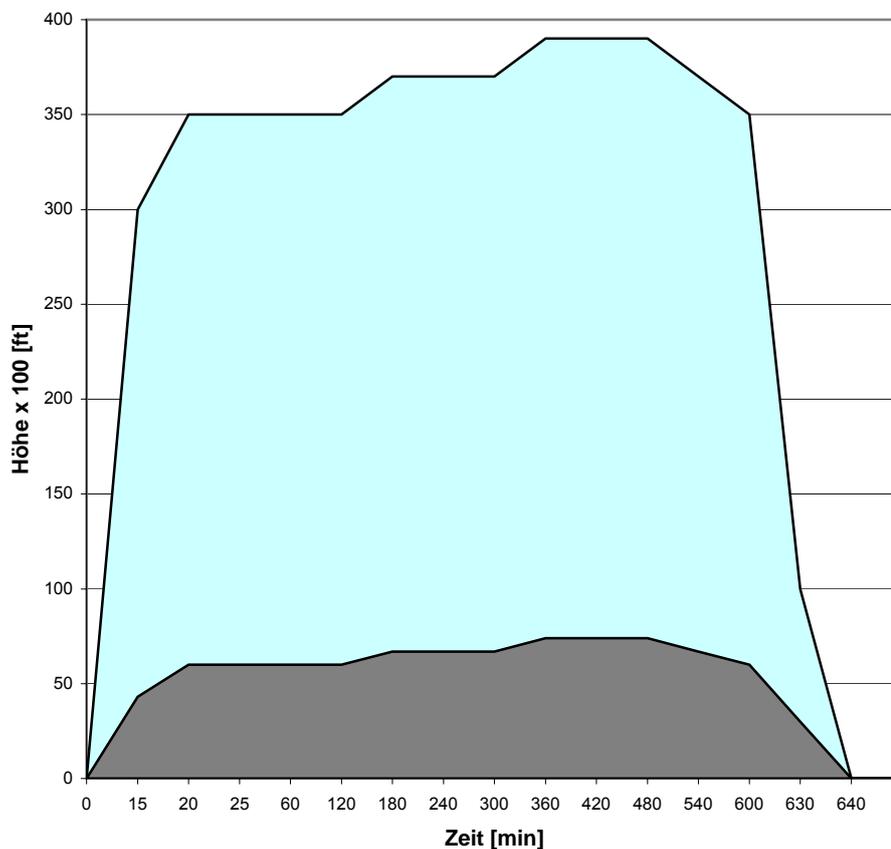


Abb. 3-15: Standardflugprofil eines Langstreckenfluges. Flughöhe (blau) gegenüber der Kabinendruckhöhe (grau).

Die Kabinendruckhöhe steigt mit der Flughöhe an, bis ein maximaler Differenzdruck ( $\Delta P$ ) erreicht ist. Dieser ist wiederum von Flugzeugtyp abhängig und beträgt zwischen 8,7 und 8,9 psi (pounds per square inch), was ungefähr 0,6 bar entspricht.

Moderne Druckklimaanlagen erreichen diesen Wert mit Erreichen der Dienstgipfelhöhe. Tabelle 3-4 zeigt die zusammengehörenden Druckhöhen, die eingehalten werden müssen, um  $\Delta P$  nicht zu überschreiten [8].

Tab. 3-4: Gegenüberstellung der Flugfläche (Cruise Flight Level) und der Kabinendruckhöhe (Target Cabin Altitude) des Canadair Regional Jets. Die Flughöhe entspricht dem Cruise Flight Level  $\times$  100 ft [8]

<b>Cruise Flight Level</b>	<b>160</b>	<b>180</b>	<b>200</b>	<b>220</b>	<b>240</b>	<b>260</b>	<b>280</b>	<b>290</b>	<b>300</b>	<b>310</b>
<b>Target Cabin Altitude [feet]</b>	1500	1700	2000	2400	2800	3200	3700	4100	4500	4900

<b>Cruise Flight Level</b>	<b>320</b>	<b>330</b>	<b>340</b>	<b>350</b>	<b>360</b>	<b>370</b>	<b>380</b>	<b>390</b>	<b>400</b>	<b>410</b>
<b>Target Cabin Altitude [feet]</b>	5300	5700	6100	6400	6800	7100	7500	7700	7900	8000

Da sämtliche Vorgänge der Druckkabine computergesteuert und vollautomatisch arbeiten, bestehen die Überwachungsinstrumente im Cockpit lediglich aus einer Temperatur- und einer Druckhöhenanzeige (siehe Abb. 3-16). Die Luftqualität bzw. der Sauerstoffgehalt können nicht überwacht werden.



Abb. 3-16: Cockpitinstrumente: Gegenüberstellung Flughöhe, Kabinendruckhöhe und  $\Delta P$

Fällt der Druck in der Kabine ab, werden automatisch die Outflow Valves geschlossen. Die Förderleistung der Packs von Großraumflugzeugen ist so groß, dass Schäden bis zur Größe eines Fensters ohne Druckverlust ausgeglichen werden können. Kann der Kabinendruck nicht mehr gehalten werden und erreicht dieser eine Höhe von 14 000 ft, fallen aus der Kabinendecke automatisch Sauerstoffmasken für die Passagiere und ein Notabstieg in tiefere Luftschichten muss unverzüglich eingeleitet werden. Im Falle eines plötzlichen Druckverlustes ist dies die einzig rettende Maßnahme. Die Gefahren eines langsamen Druckverlustes sind jedoch nicht zu unterschätzen. Letzten Endes war dies die Ursache, die zum Absturz von Helios Flight 522 im August 2005 führte. Auch hier warteten die Piloten zu lange, ehe sie sich mit Sauerstoff versorgten [2].

## 4. Material und Methoden

### 4.1 Untersuchung im Verkehrsflugzeug

#### 4.1.1 Airline, Flugzeugtyp, Strecken

Für die Messung des aktuellen Sauerstoffgehalts in der Kabinenluft wurden 30 Langstreckenflüge ausgewählt. Die Flüge unterschieden sich in Flugdauer, Route und Flughöhe. Wir beschränkten uns auf die vier in Europa gängigsten Langstreckenmuster Boeing B747, B757, B767 und den Airbus A340. Außerdem wurden 20 Mittelstreckenflüge mit den Regional-Jet-Mustern CRJ und ARJ untersucht, um festzustellen, ob Unterschiede zwischen Lang- und Mittelstrecke bestehen. Kurzstreckenflüge wurden außer Acht gelassen. In der Auswahl wurde der Schwerpunkt auf möglichst ausgebuchte Flüge mit sehr langen Flugzeiten gelegt, um den höchstmöglichen Sauerstoffverbrauch an Bord zu haben.

Flug /Type	B747 / 400				Strecke	MUC -- LAX	
Datum	20. April 2001				NAME:	Schimanski Ma.	
Auslastung: <input checked="" type="radio"/> 1/1 <input type="radio"/> 3/4 <input type="radio"/> 1/2 <input type="radio"/> 1/4 <input type="radio"/> 1/1 <input type="radio"/> 3/4 <input checked="" type="radio"/> 1/2 <input type="radio"/> 1/4 <input type="radio"/> 1/1 <input type="radio"/> 3/4 <input type="radio"/> 1/2 <input checked="" type="radio"/> 1/4							
nach Take off	Flughöhe	Economy	Business	First	Cockpit	Sonstiges	
1h	33.000	20,9%	20,9%	20,9%	20,9%		
2h	33.000	20,9%	20,9%	20,9%	20,9%		
3h	34.000	20,9%	20,9%	20,9%	20,9%		
4h	35.000	20,9	20,9%	20,9%	20,9%	recirculation fan off	
5h	35.000	20,9	20,9%	20,9%	20,9	5	
6h	35.000	20,9	20,9%	20,9%	20,9	fan "on"	
7h	35.000	20,9	20,9	20,9	20,9		
8h	35.000	20,9	20,9	20,9	20,9		
9h	35.000	20,9	20,9	20,9	20,9		
10h	39.000	20,9	20,9	20,9	20,9		
11h	35.000	20,9	20,9	20,9	20,9		

Abb. 4-1: Protokoll des Langstreckenfluges München – Los Angeles am 20.04.2001 mit einem Jumbo-Jet

Folgende Daten wurden aufgezeichnet: Datum, Airline, Flugzeugmuster, Flughöhe, Kabinendruckhöhe, Abflughafen, Zielflughafen, Buchungslage, Raucher- / Nichtraucherflüge und der Sauerstoffgehalt der Kabinenluft.

#### 4.1.2 Sauerstoffmessung

Zur Messung des Sauerstoffgehalts wurde das Gerät microPac Plus der Firma Dräger Medical AG, Aerospace GmbH, Lübeck, verwendet (siehe Abb. 4-2). Der Messbereich des Gerätes liegt zwischen 0 und 25% Sauerstoff [22]. Der Sauerstoffgehalt wurde regelmäßig einmal pro Stunde bestimmt und zwar in allen Flugzeugkompartimenten: Cockpit, First Class, Business Class und Eco Class.

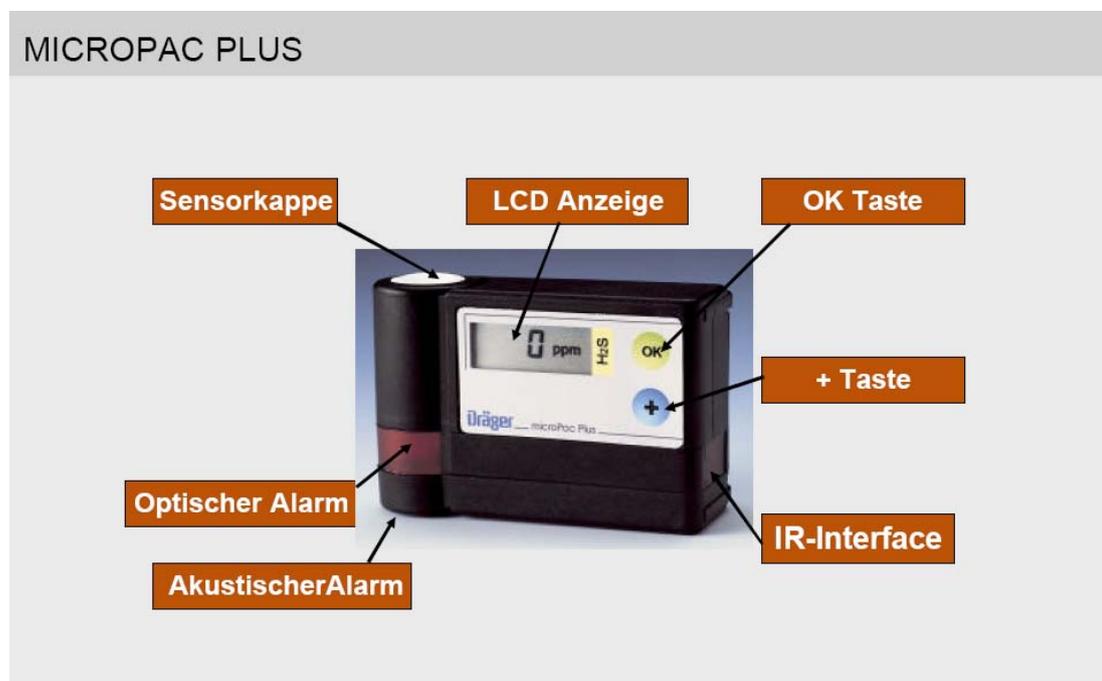


Abb. 4-2: Sauerstoffmessgerät [22]

## 4.2 Untersuchung in der Höhen-Klima-Simulationsanlage

### 4.2.1 Höhen-Klima-Simulationsanlage

#### 4.2.1.1 Allgemeine Beschreibung

Die Höhen-Klima-Simulationsanlage (HKS) in der Außenstelle der Luftwaffe für Flugmedizin in Königsbrück (Sachsen) wurde 1987 von der damaligen NVA hauptsächlich zum Zwecke der flugmedizinischen Eignungsbegutachtung bzw. Ausbildung genutzt. Außerdem wurden Untersuchungen zum Verhalten von Werkstoffen

und Systemen unter verschiedenen Bedingungen wie Unterdruck, schnelle Druckänderungen und extreme klimatische Bedingungen untersucht. Im Zuge der Wiedervereinigung Deutschlands ging sie in das Eigentum der Bundeswehr über.

Die HKS besteht aus einer größeren Hauptkammer (Nutzfläche 28 m<sup>2</sup>) und einer kleineren Dekompressionskammer (Nutzfläche 4,1 m<sup>2</sup>). Die Dekompressionskammer dient als Schleuse für die Hauptkammer und wird zu Dekompressionsuntersuchungen verwendet, bei denen die Hauptkammer als Saugtank genutzt wird. Außer der für zwei Personen ausgelegten großen Schleuse gibt es noch wesentlich kleinere, die das Ausschleusen von z.B. Blutproben während laufender Untersuchungen ermöglichen.



Abb. 4-3: Blick in die Hauptkammer der Höhen-Klima-Simulationsanlage

In der HKS können auf sechs um 90° nach hinten klappbaren und vier weiteren Untersuchungsstühlen bis zu zehn Personen gleichzeitig untersucht werden. Die große Einbringungsöffnung (90 × 170 cm) ermöglicht es, neben speziellen Untersuchungsgeräten auch größere Gegenstände, wie z.B. Klinikbetten, problemlos in die Kammer zu befördern.

Um die Beobachtung der Geschehnisse in der HKS zu gewährleisten, befinden sich an allen Seiten Fenster. Besondere Bedeutung kommt dabei dem Platz des Untersuchungsleiters zu, der sich außerhalb der Kammer unmittelbar vor dem größten Fenster befindet. Die aus der Überwachung der Kammeratmosphäre bzw. der Sauerstoff-Durchflussmenge gewonnenen Daten stehen an diesem Platz kontinuierlich zur Verfügung. Zwischen der Kammer und der Außenwelt kann über eine Wechselsprechanlage kommuniziert werden.

#### **4.2.1.2 Technische Beschreibung**

Die mit acht Pumpen betriebene HKS kann mit 5-100 m/s (ca. 20 000 ft/min) auf eine Höhe von 25 000 m (82 000 ft, etwa 25 hPa Absolutdruck) steigen und diese Höhe mindestens acht Stunden halten. Höhen bis 5000 m (16 400 ft) können im Langzeitbetrieb über mindestens 21 Tage, Höhen bis 7000 m (23 000 ft) über sieben Tage gehalten werden.

Die Klimatisierung ermöglicht bis in eine Höhe von 7500 m (25 000 ft) die Temperatur bei einer Umtemperierungsgeschwindigkeit von maximal 16 K/h stufenlos zwischen +15°C und +50°C einzustellen. Die relative Luftfeuchtigkeit kann bei einer Umfeuchtegeschwindigkeit von max. 10%/h zwischen 35% und 80% ebenfalls stufenlos eingestellt werden [4].

Die computergesteuerte Überwachung der vorgegebenen Höhen-Zeit-Profile (Abb. 4-4) macht deren exakte Einhaltung möglich, wobei die bei einer Höhenkonstanz von 10 000 m zulässige Abweichung weniger als 1% beträgt. Ebenfalls macht diese Rechnersteuerung eine freie Auswahl der Höhen-Zeit und Klima-Profile möglich und garantiert die Voraussetzung für eine genau Reproduzierbarkeit dieser Profile, welche für wissenschaftliche Untersuchungen unabdingbar sind.

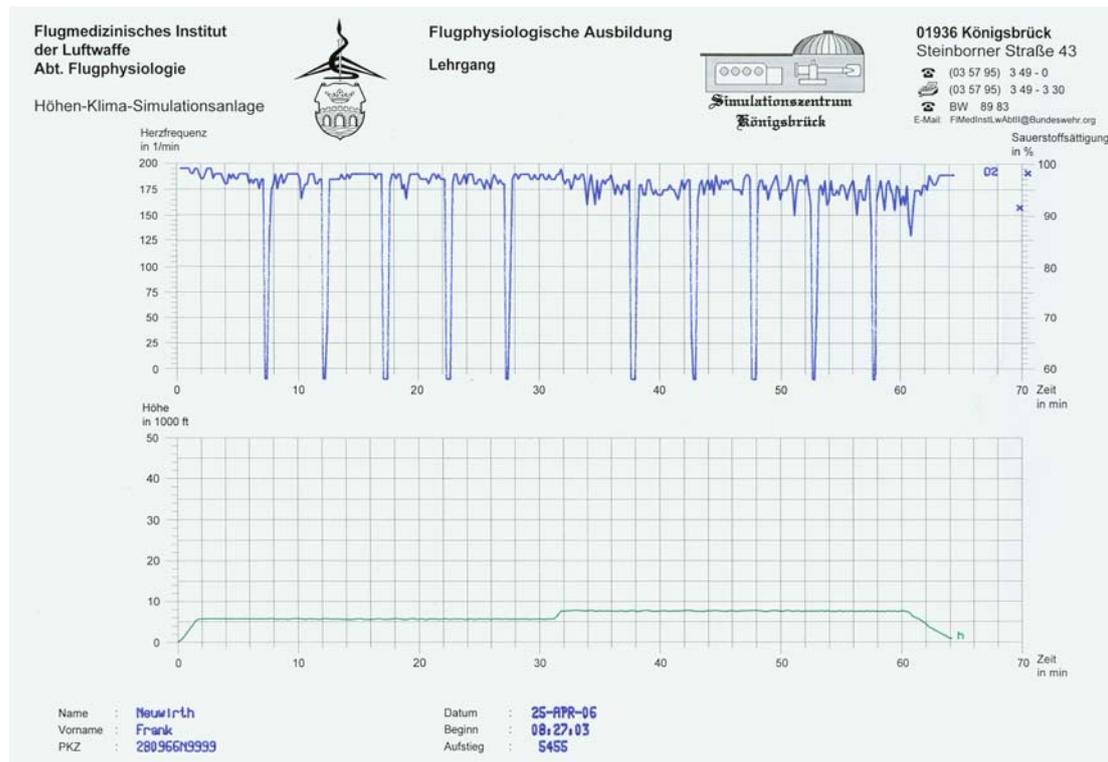


Abb.4-4: Grafische Dokumentation der pulsoxymetrischen Sauerstoffsättigung über dem Höhen-Zeit-Profil

#### 4.2.1.3 Sicherheitstechnische Einrichtungen

Durch ein unabhängiges Rechnersystem wird die Einhaltung der vorgegebenen Höhen-Zeit-Profile in definierten Toleranzen ständig durch den Vergleich von Soll- und Istwert überwacht. Sollte beim Betrieb in der HKS eine Überschreitung der Toleranzen des gewünschten Enddrucks bzw. des festgelegten Druckgradienten erfolgen, wird die Unterdruckkammer automatisch hermetisiert, d.h., der jeweilige Druckzustand bleibt erhalten und die Anlage steht still. Dasselbe geschieht bei einem Ausfall der Stromversorgung oder einer anderen technischen Störung. Ist eine Behebung des Defekts innerhalb einer bestimmten Zeitspanne nicht möglich, stehen verschiedene Notabstiegsprogramme zum Erreichen der Ortshöhe zur Verfügung.

Neben jedem Untersuchungsplatz sind als Notfallsysteme ausgelegte personenbezogene Sauerstoffversorgungseinheiten installiert, die im Bedarfsfall sofort 100% Sauerstoff über eine Atemmaske zur Verfügung stellen. Diese Sauerstoffsysteme sind außerdem notwendig, um überhaupt Untersuchungen in Höhen durchzuführen, in denen ein Aufenthalt ohne zusätzliche Sauerstoffzufuhr unmöglich wäre. In Abb. 4-5 ist der Kontrollplatz der HKS dargestellt. Es werden nicht nur die technischen Ein-

richtungen überwacht, sondern über zwei unabhängig voneinander arbeitende Kameras kann die gesamte Kammer kontrolliert werden.



Abb.4-5: Überwachungspult der HKS

Da durch Verwendung von Sauerstoff eine erhöhte Brandgefahr besteht, wird die Kammeratmosphäre mit Hilfe von Gasanalyseeinrichtungen kontinuierlich überwacht und der Durchfluss des einströmenden Sauerstoffs zu den personenbezogenen Sauerstoffversorgungssystemen quantitativ bestimmt und kontrolliert. Eine Gaslöschanlage, die durch den Einstrom von Stickstoff die Sauerstofffraktion in der Kammer innerhalb von zwei Minuten auf 0,15% zu reduzieren in der Lage ist und somit jedes Feuer zum ersticken bringt, kann nach Sicherstellung der Atemgasversorgung für die Personen in der Kammer in Betrieb genommen werden [5].

#### 4.2.1.4 Messwerterfassung und Verarbeitung

Vakuumdichte Steckverbindungen ermöglichen über Koaxialleitungen die in der Kammer gewonnenen Daten kodiert nach außen zu leiten. Außerhalb der Kammer werden diese Daten an entsprechende Datenverarbeitungsanlagen zur Aufarbeitung und Speicherung weitergeleitet und gleichzeitig direkt auf Monitoren zur Anzeige gebracht, um den Untersuchern eine Echtzeit-Betrachtung der Messdaten zu erlauben.

Das Betreiben von Messgeräten für die Sauerstoffsättigung und die dazugehörige computerisierte Datenerfassung in der Kammer ist möglich.



Abb. 4-6: Monitore zur Überwachung der pulsoxymetrischen Sauerstoffsättigung

## 4.2.2 Beschreibung der untersuchten Parameter

### 4.2.2.1 Blutbild

Blut für das Blutbild wurde vor Beginn der Messungen von einer erfahrenen Medizinisch Technischen Assistentin (MTA) aus der Fingerbeere der Probanden entnommen. Hauptaugenmerk lag dabei auf der Anzahl der Erythrozyten (Ery), Hämoglobin (Hb) und Hämatokrit (HK). Die Analyse erfolgte vollautomatisch mit dem Gerät Pentra 60 der Firma HORIBA ABX, Montpellier (Frankreich).

#### 4.2.2.2 Blutgasanalyse

Als Blutentnahmestelle zur Blutgasanalyse diente das rechte Ohrfläppchen der Versuchsperson. Zuvor wurde das Ohrfläppchen mit Finalgon hyperämisiert, um die Blutgewinnungszeit möglichst kurz und somit einen eventuellen Fehler durch Diffusion gering zu halten. Pro Proband und Höhenstufe wurden mindestens zwei Kapillaren Blut von einer erfahrenen MTA abgenommen und sofort auf Eis gelegt. Mit Hilfe des Analysegerätes i-STAT der Firma Abbott Laboratories erfolgte die Blutuntersuchung innerhalb von 30 Minuten ab Blutabnahme. Das i-STAT System misst den Sauerstoffpartialdruck ( $P_{O_2}$ ) amperometrisch, der Partialdruck des Kohlendioxids ( $P_{CO_2}$ ) und der pH-Wert werden durch Direktpotentiometrie ermittelt. Der Basenüberschuss der Extrazellulärflüssigkeit ( $BE_{ecf}$ ) und die Sauerstoffsättigung ( $sO_2$ ) werden berechnet [1].

#### 4.2.2.3 Pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung

Die Messung der arteriellen Sauerstoffsättigung ( $SaO_2$ ) mit Hilfe der Pulsoxymetrie ( $SpO_2$ ) ist die gängigste Methode, da sie nichtinvasiv, kontinuierlich und direkt in vivo Bestimmungen zulässt [67]. Diese Sättigung wird auch als funktionelle Sättigung angesehen, da sie mit desoxygeniertem Hämoglobin in Beziehung steht und dieses vom Pulsoxymeter erkannt wird [12]. Eine gute Übereinstimmung zwischen  $SpO_2$  und der Referenzmethode arterielle Blutgasanalyse wurde von einigen Autoren berichtet [7, 9], jedoch nicht immer von anderen Autoren bestätigt [6, 73, 80].

Für die kontinuierlichen Messungen der  $SpO_2$ -Werte wurde das Oxymeter 504-USP der Firma Criticare Systems benützt. Die Messsonde wurde nach Anweisung des Autors am Endglied des linken Zeige- bzw. Mittelfingers der Probanden mit Hilfe eines Fingerklipps angebracht.

Hämoglobin findet sich im Blut in verschiedenen Formen:

- als sauerstoffangereichert (mit Sauerstoff verbunden,  $O_2$ -Hb)
- desoxygeniertes Hämoglobin (mit keinem anderen Molekül verbunden, Hb)
- Dyshämoglobin (Carboxyhämoglobin und Methämoglobin)

Das Pulsoxymeter 504 definiert arterielle Sauerstoffanreicherung als das Verhältnis von Sauerstoff angereichertem Hämoglobin zur Gesamtmenge Hämoglobin, die zur Verbindung mit Sauerstoff verfügbar ist.

$$\% \text{ Sättigung O}_2 = \frac{\text{Oxyhämoglobin}}{\text{Oxyhämoglobin} + \text{Desoxyhämoglobin}} \times 100\%$$

Dyshämoglobin wie Carboxyhämoglobin und Methämoglobin werden nicht direkt gemessen und gehen deshalb nicht in die Messung ein.

### **Methode**

Das 504-Oxymeter bestimmt die prozentuale Sauerstoffsättigung und die Pulsfrequenz auf der Grundlage der Spektrophotometrie und der Plethysmographie. Der Sensor für Sauerstoffsättigung enthält LEDs, die Licht zweier spezifischer Wellenlängen durch ein pulsierendes Gefäßbett ermitteln. Der Sensor ist völlig isoliert. Es besteht keine Hitzequelle, die einen Probanden brennen könnte.

Da O<sub>2</sub>Hb und Hb Licht selektiv und berechenbar absorbieren, können diese zwei Verbindungen durch die Messungen bei der jeweiligen Wellenlänge an der Messstelle bestimmt werden. Ein Photodetektor, der der Lichtquelle gegenüber liegt, misst die Intensität jeder Wellenlänge, die durch die Messstelle ermittelt wird. Die Lichtintensität wird in ein elektrisches Signal umgewandelt, welches dem Oxymeter eingegeben wird. Die Effekte der Hautfarbe, des Bluts in Venen und andere Elementarbestandteile werden durch Trennung der pulsierenden Absorptionsdaten eliminiert [16].

### **Anwendungsbereiche**

Eine kontinuierliche Überwachung der arteriellen Sauerstoffsättigung ist sinnvoll in allen Situationen, in denen Sauerstoffgabe indiziert ist. Die Angabe von Echtwertzeiten ermöglicht eine frühere Erkennung von Hypoxie oder Hyperoxie, als die, die durch arterielle Blutentnahme möglich wäre. Die Auswirkungen von Veränderungen der Sauerstofftherapie können sofort beurteilt und die Häufigkeit von Blutgasanalysen in gewissen Situationen reduziert werden.

Das 504-Oxymeter kann bei einer Temperatur von +10°C bis +40°C, einer relativen Luftfeuchte von 30% bis 95% und einem Luftdruck von 667 hPa bis 1067 hPa die Pulsfrequenz mit einer Genauigkeit von  $\pm 2$  Schlägen pro Minute und die O<sub>2</sub>-Sättigung im Bereich von 87,5% bis 100% mit einer Genauigkeit von  $\pm 2\%$  und im Bereich von 70,5% bis 87,5% mit einer Genauigkeit von  $\pm 4\%$  messen [16].

#### 4.2.2.4 Messung der Fingertemperatur

Zur Messung der Fingertemperatur wurde das Infrarotthermometer Mini-Flash TFA der Firma Dostmann GmbH & Co. KG verwendet, welches berührungslos, schnell und zuverlässige Messwerte ergibt.

Technische Daten:	Messbereich	-33°C bis +220°C
	Messgenauigkeit	$\pm 1,5^\circ\text{C}$ im Bereich von 0-50°C
	Reproduzierbarkeit	$\pm 1\%$
	Ansprechzeit	ca. 0,5 sec
	Anzeigeauflösung	0,1°C

Da jeder Körper eine infrarote Energie abstrahlt, kann diese mittels eines optischen Detektors wahrgenommen werden. Der Detektor übersetzt gleichzeitig die Information und bringt sie in eine digitale Anzeige [72]. Die Messungen konnten vom Doktoranden selbst nicht durchgeführt werden, da er als Proband mitwirkte. Stattdessen wurde ein Mitarbeiter des Instituts nach Unterweisung durch den Autor mit dieser Aufgabe betraut. Um einen etwaigen Fehler durch unterschiedliche Messmethoden auszuschließen, wurden alle Messungen bei allen Untersuchungen von der selben Person ausgeführt.

#### 4.2.2.5 Statistische Auswertung

Die Messergebnisse wurden mit Anova, Wilcox Signed Rank Test p-values und Fischer's r to z statistisch ausgewertet. Wenn es sinnvoll erschien, wurden für die Ergebnisse Mittelwerte und Standardabweichung angegeben. Außerdem wurden für verschiedene Werte die Korrelationen und die partiellen Korrelationskoeffizienten berechnet (Pearson Produkt Korrelationskoeffizient).

Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit beruht nicht darauf, den Einfluss der unterschiedlichen Flughöhen auf den Sauerstoffpartialdruck zu systematisieren.

Dafür ist bei der in der Literatur bekannten [55] und der in unserem Kollektiv bestätigten großen Streuung das untersuchte Kollektiv zu klein. Es geht vielmehr darum, die Ursachen der in Vorversuchen gesehenen Unterschiede in den pulsoxy-metrischen Messwerten der Frauen und Männer zu erläutern.

### 4.2.3 Beschreibung des untersuchten Kollektivs

Das Kollektiv der Probanden bestand aus 30 gesunden Untersuchungsteilnehmern (15 Frauen, 15 Männer) unterschiedlichen Alters. Wegen Rekrutierungsschwierigkeiten der Deutschen Luftwaffe war das Kollektiv nicht exakt homogen und nicht zufällig ausgewählt. Die jüngeren Probanden waren hauptsächlich Mitarbeiter des Instituts, die älteren waren deren Eltern bzw. die Eltern des Autors oder kamen aus seinem Bekanntenkreis. Niemand der Befragten hat die Untersuchung abgelehnt. Der Großteil der Probanden hatte wenig Flugerfahrung, während vier Vielflieger waren. 20 Probanden kamen aus dem Umkreis von Dresden und lebten auf einer Meereshöhe von 250 – 300 ft, sechs waren aus dem Kreis Göppingen mit einer Höhe von 1200 – 1400 ft, drei kamen aus Hamburg (15 ft) und einer aus Frankfurt (400 ft). Die Männer waren im Durchschnitt etwas älter als die Frauen (Durchschnittsalter: Männer = 57,7 Jahre, Frauen = 51,9 Jahre), was jedoch statistisch nicht signifikant war. Unter den Probanden befanden sich drei Raucher, der Rest waren Nichtraucher.

Tabelle 4-1: Untersuchtes Kollektiv: Frauen

Alter [Jahre]	Größe [cm]	Gewicht [kg]	BMI [kg/m <sup>2</sup> ]	Blutdruck [mmHg]	Puls [Anzahl/min]	Rauchen [Stück/Tag]	Erythrozyten [Mill./mcl]	Hämoglobin [g/dl]	Hämatokrit [%]
26	180	63	19,44	124/57	69	0	4,44	13,0	39,0
27	166	53	19,23	115/70	61	0	4,82	14,1	42,7
34	172	78	26,37	139/74	83	15	4,91	15,0	43,7
40	159	52	20,57	132/79	69	0	4,14	12,4	37,1
43	160	56	21,88	130/73	72	0	4,12	12,5	37,8
48	164	59	21,94	120/73	74	0	4,56	11,4	35,6
53	170	63	21,80	134/84	67	0	4,09	13,2	39,8
56	158	62	24,84	164/80	63	0	4,6	14,2	40,9
60	167	57	20,44	131/61	76	0	4,4	13,1	39,3
61	156	59	24,24	142/76	77	0	4,52	14,3	42,9
63	158	60	24,03	147/78	75	0	4,65	13,5	40,5
65	160	60	23,44	135/76	76	0	4,87	14,2	45,0
65	163	83	31,24	149/77	64	0	4,5	13,6	40,4
67	163	66	24,84	140/72	76	0	4,16	13,0	38,8
70	162	72	27,43	155/94	87	0	4,74	13,7	41,6

Tabelle 4-2: Untersuchtes Kollektiv: Männer

Alter [Jahre]	Größe [cm]	Gewicht [kg]	BMI [kg/m <sup>2</sup> ]	Blutdruck [mmHg]	Puls [Anzahl/min]	Rauchen [Stück/Tag]	Erythrozyten [Mill./mcl]	Hämoglobin [g/dl]	Hämatokrit [%]
26	183	92	27,47	132/76	65	6	5,22	16,2	46,6
39	184	96	28,36	149/91	95	0	5,66	16,1	47,7
40	183	82	24,49	163/103	62	0	4,59	14,3	42,5
41	191	96	26,32	109/80	76	0	5,62	16,4	49,6
44	182	90	27,17	126/70	80	0	5,26	15,5	45,7
54	182	62	18,72	122/79	90	20	4,71	15,1	44,0
61	176	74	23,89	152/83	66	0	4,17	14,0	40,2
62	180	92	28,40	149/72	63	0	5,46	16,0	47,4
62	186	89	25,73	154/95	68	0	4,75	14,7	42,8
63	156	51	20,96	143/62	68	0	4,40	13,3	40,2
67	165	93	34,16	140/73	58	0	4,81	14,9	44,7
71	184	85	25,11	144/74	60	0	4,77	14,2	43,4
75	174	85	28,08	159/66	69	0	5,05	15,9	45,5
76	168	74	26,22	135/70	77	0	4,57	11,8	37,7
85	168	77	27,28	168/106	88	0	4,99	13,6	43,5

## 4.2.4 Untersuchungsablauf

### 4.2.4.1 Voruntersuchung

Das Studienprotokoll wurde vor der Untersuchung von der Ethikkommission der Sächsischen Landesärztekammer genehmigt. Alle Probanden bekamen eine Woche vor Untersuchungsbeginn Informationsunterlagen bezüglich der Studie zugeschickt und wurden noch einmal mündlich im Rahmen eines Vorgesprächs am Untersuchungstag vom leitenden Arzt aufgeklärt.

Im Zuge einer orientierenden körperlichen Untersuchung wurde auch auf eventuelle anamnestische Vorerkrankungen eingegangen, so dass z.B. kardiale, pulmonale oder hämatologische Risiken sowie Gefäßerkrankungen ausgeschlossen werden konnten. Im Anschluss daran wurde aus der Fingerbeere Kapillarblut entnommen und ein kleines Blutbild erstellt.

### 4.2.4.2 Vorbereitung in der HKS

Vor der ersten Untersuchungsreihe am jeweiligen Untersuchungstag wurden sämtliche benötigten Pulsoxymeter laut Bedienungsanleitung kalibriert.

Pro Untersuchung nahmen jeweils drei bzw. vier Probanden teil, so dass ausreichend Platz für die Blutabnahme der MTA und zur Messung der Fingertemperatur durch

eine weitere Person zur Verfügung stand. Die Probanden saßen in aufrechter Haltung, die Arme bequem auf die vor ihrem Körper befindlichen Klappstühle abgelegt. Am Zeige- bzw. Mittelfinger der linken Hand wurde der Fingerclip des Pulsoxymeters befestigt und das rechte Ohrflüppchen mit Finalgon hyperämisiert. Die Probanden wurden angehalten sich körperlich ruhig zu verhalten und möglichst wenig zu sprechen.

#### 4.2.4.3 Flugprofil

Da bei unserer Untersuchung die Kabinendruckhöhen üblicher Linienflüge simuliert werden sollten, wurden Messreihen auf Ortshöhe (250 ft), in 6000 ft und in 8000 ft durchgeführt. Bei einem kleinen Teil der jüngeren Probanden (7 Frauen, 3 Männer) wurden zusätzlich die militärischen Flughöhen 10 000 ft und 12 000 ft untersucht. Diese Höhen waren für die älteren Probanden unzumutbar.

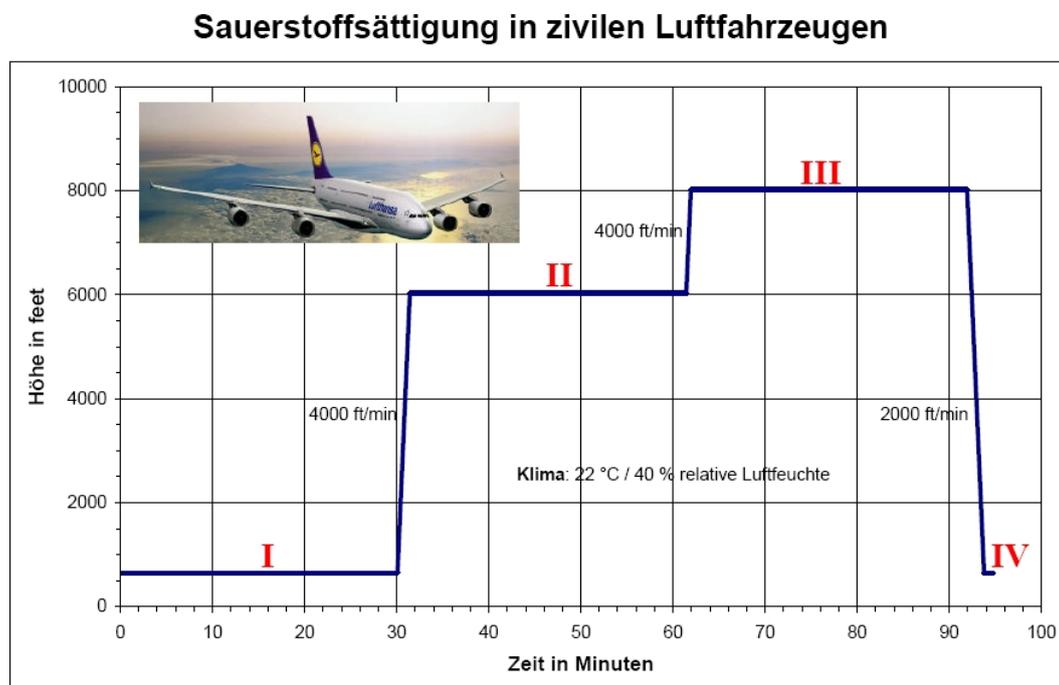


Abb. 4-7: Simuliertes Flugprofil von zivilen Luftfahrzeugen



Abb. 4-8: Simuliertes Flugprofil von zivilen und militärischen Luftfahrzeugen

#### 4.2.4.4 Datenerfassung

Nach einer gewissen Eingewöhnungszeit von etwa 15 Minuten wurde noch vor der eigentlichen Untersuchung in der Kammer auf Ortshöhe (250 ft) Blut zur Blutgasanalyse abgenommen. Weitere Blutabnahmen erfolgten jeweils nach einer Stabilisierungsphase von 20 Minuten auf der neuen Druckhöhe, sprich in 6000 ft und 8000 ft, bzw. 10 000 ft und 12 000 ft.

Die Messung der pulsoxymetrischen Sauerstoffsättigung erfolgte kontinuierlich und wurde gemittelt über jeweils 10 Sekunden automatisch per Computer protokolliert. Die jeweils doppelte Messung der Fingertemperatur am Messfinger der pulsoxymetrischen Sauerstoffsättigung erfolgte alle 5 Minuten. Dabei wurde die Sonde des Pulsoxymeters kurzzeitig entfernt, um bei der Temperaturmessung möglichst nahe an dem Punkt zu messen, den auch der Pulsoxymeter zur Messung benützt. Durchgeführt wurden die Messungen stets von derselben Person, mit möglichst gleich bleibendem geringen Abstand des Messensors zum Messfinger. Die Ergebnisse wurden über die Gegensprechanlage nach draußen geleitet und dort schriftlich festgehalten.

Abbildung 4-9 zeigt den Ablauf der Untersuchung schematisch auf. Die graphische Darstellung der Messwerte sowie der Zeitpunkte der Messungen wurden am Beispiel von Proband Nr. 3 eingezeichnet.

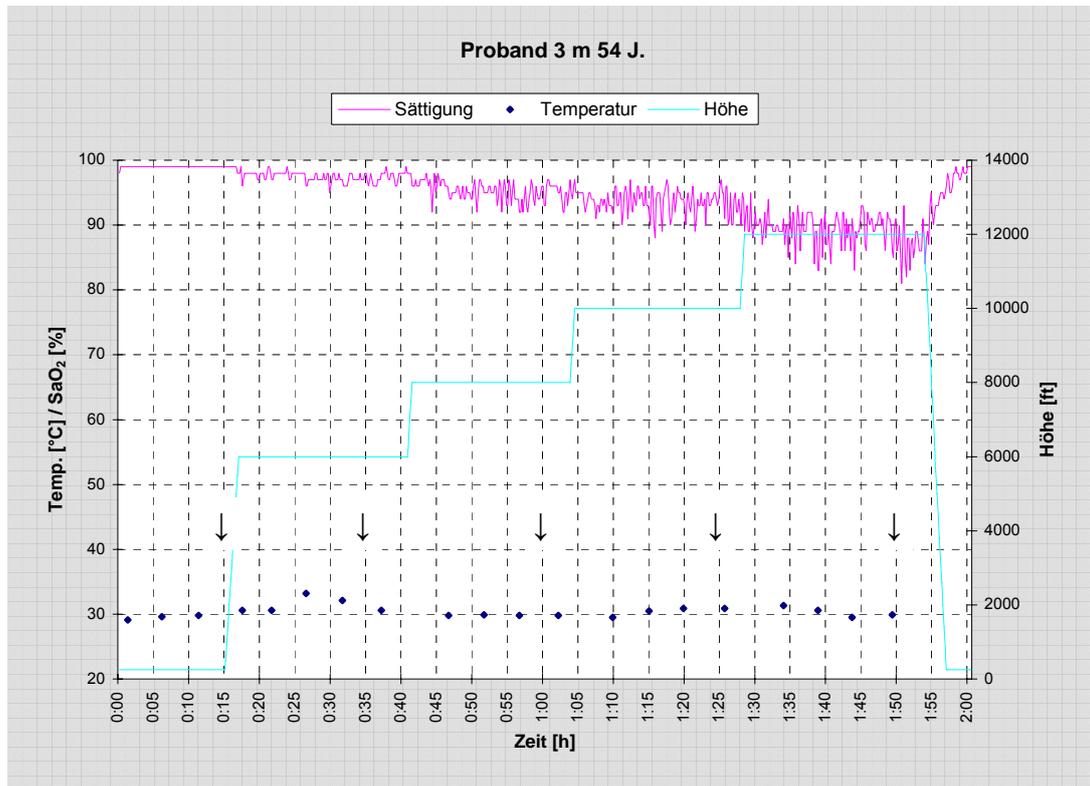


Abb. 4 -9: Fingertemperatur, Sättigung, Höhenprofil im Verlauf der Untersuchung.  
Bei ↓ wurde Blut für die Blutgasanalyse (BGA) abgenommen.

Der Autor war bei sämtlichen Untersuchungen anwesend und stand zur Diskussion der Messergebnisse zur Verfügung.

## **5. Ergebnisse**

### **5.1 Ergebnisse in der Flugzeugkabine**

Die Flughöhen auf den untersuchten Langstreckenflügen variierten zwischen 33 000 ft und 39 000 ft (10 058 m - 11 887 m), die Kabinendruckhöhen zwischen 5 000 ft und 7 400 ft (1 524 m - 2 256 m). Die durchschnittliche Flugdauer lag bei zehn Stunden.

Auf sämtlichen Flügen, in allen Flughöhen und Flugzeugkompartimenten betrug der gemessene Sauerstoffgehalt der Kabinenluft 20,9%. Sogar während den Zeiten, in denen die Klimaanlage auf Rezirkulation gestellt war, konnte kein Abfall des Sauerstoffgehaltes festgestellt werden. Das selbe Ergebnis erhielt man auf den Mittelstreckenflügen.

Auf einem einzigen Flug sank der Sauerstoffgehalt in der hinteren Kücheneinheit eines Jumbo-Jets von 20,9% auf 19,9% nach 5 h Flugzeit. Dieser Wert war bis zum Ende des Fluges für mehrere Stunden reproduzierbar. Da auf diesem Flug in der hinteren Galley viel Trockeneis zur Kühlung mitgeführt wurde, könnte ein Anstieg des CO<sub>2</sub> zu der verminderten O<sub>2</sub>-Konzentration geführt haben. Dies würde auch erklären, warum dieser Wert bei den Messungen auf dem Folgeflug dieser Maschine nicht mehr festgestellt werden konnte.

### **5.2 Ergebnisse in der Höhen-Klima-Simulationsanlage**

#### **5.2.1 Allgemeinbefinden**

Während der gesamten Versuchstage wurden keinerlei Zwischenfälle festgestellt. Keiner der Probanden gab an, körperliche oder psychische Beschwerden während der Untersuchung verspürt zu haben. Somit konnten alle Untersuchungen planmäßig und ohne Unterbrechungen durchgeführt werden.

#### **5.2.2 Luftzusammensetzung in der Unterdruckkammer**

Im Langzeitbetrieb können die eingestellten Parameter bis zu einer Höhe von 23 000 ft (7000 m) für mindestens 7 Tage konstant gehalten werden. Minimale Schwankungen durch einen Wechsel des Durchlaufs sind so gering, dass von einem

annähernd konstanten Sauerstoffpartialdruck in der Höhen-Klima-Simulationsanlage ausgegangen werden kann.

### 5.2.3 Sauerstoffpartialdruck im Kapillarblut

Der Sauerstoffpartialdruck ( $PO_2$ ) sinkt mit zunehmendem Alter (in 250 ft;  $PO_2 = -0,418 \times \text{Jahre} + 97,281$ ;  $r = -0,674$ ,  $p < 0,0001$ ), offensichtlich ist die Abnahme jedoch nicht linear. In Ortshöhe, in unserem Fall 250 ft (siehe Abb. 5-1: weiße Dreiecke), sind die  $PO_2$ -Werte der jüngsten Probanden am höchsten, danach tritt ein Plateau bei den ca. 40- bis 60-Jährigen auf, anschließend sinken die Werte erneut. Besonders niedrig sind die  $PO_2$ -Werte bei den Älteren mit einem zusätzlich hohen Body-Mass-Index (BMI), (siehe Tabelle 5-1 und 5-2). Die pulsoxymetrisch gemessene Sauerstoffsättigung ( $SpO_2$ ) sinkt auch mit dem Alter ab, jedoch flacher (siehe Abb. 5-3 weiße Kreise).

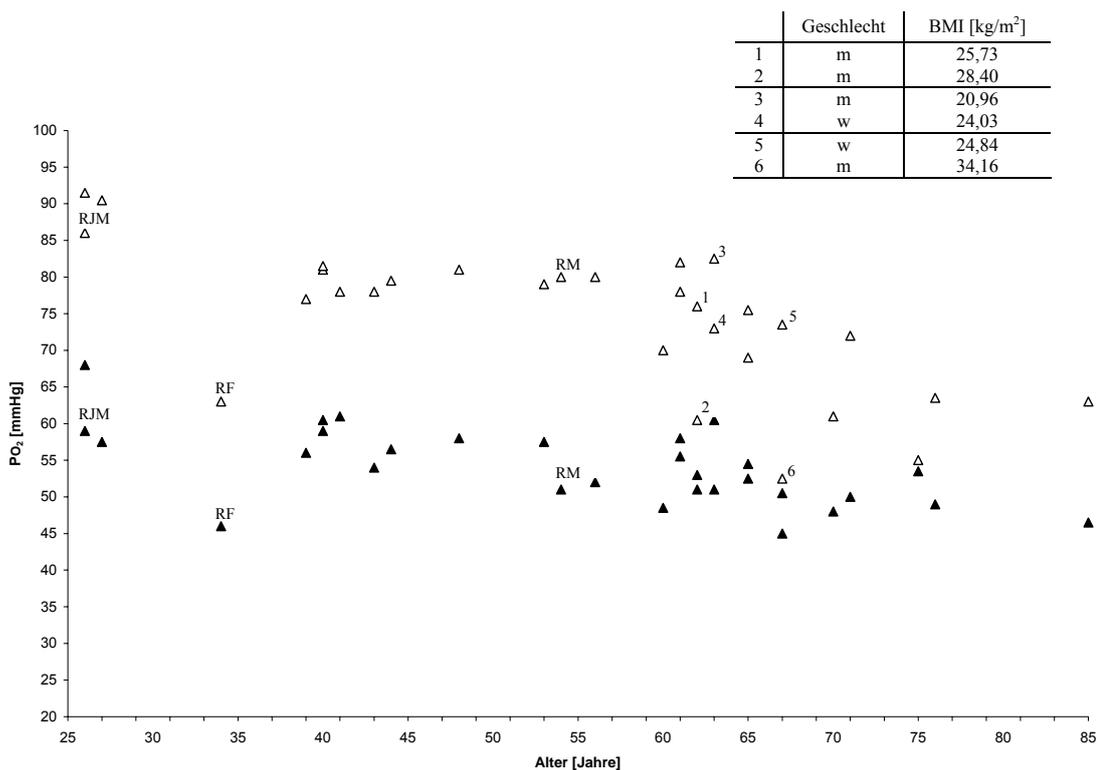


Abb.5-1: Sauerstoffpartialdruck ( $PO_2$ ) in 250 ft (weiße Dreiecke) gegenüber dem Alter ( $r = -0,674$ ,  $p < 0,0001$ ) und in 8000 ft (schwarze Dreiecke) gegenüber dem Alter ( $r = -0,651$ ,  $p < 0,0001$ ).  
RF = Raucherin, RM = Raucher, RJM = Junger Raucher.

Ein Proband ist auffällig: Eine 34 Jahre alte Raucherin (15 Zigaretten/d) mit einem erhöhten BMI von  $26,4 \text{ kg/m}^2$  (Normwert  $20\text{-}25 \text{ kg/m}^2$ ), (siehe Abb. 5-1: RF). Ihr  $PO_2$

ist mit 63 mmHg für ihr Alter sehr gering. Der SpO<sub>2</sub> ist mit 99% normal. Diese Diskrepanz entsteht möglicherweise dadurch, dass der Pulsoxymeter nicht zwischen Oxyhämoglobin (HbO<sub>2</sub>) und Carboxyhämoglobin (HbCO) unterscheiden kann [14, 15]. Ein weiterer Raucher (20 Zigaretten/d) ist ein 54-jähriger schlanker Mann mit einem BMI von 18,7 kg/m<sup>2</sup>, (siehe Abb. 5-1: RM). Sein extrem niedriger BMI (Normalbereich für das Alter von 45-54 Jahren = 22-27 kg/m<sup>2</sup>) ist möglicherweise der Grund dafür, dass er sich von den anderen Probanden nicht abhebt. Sein PO<sub>2</sub> am Boden ist mit 80 mmHg normal. Der dritte Raucher (RJM) in unserem Kollektiv ist auf Grund seines niedrigen Alters (26 Jahre) und seines geringen Tabakkonsums (6 Zigaretten/d) unauffällig, obwohl sein BMI von 27,47 kg/m<sup>2</sup> etwas über dem Normalwert liegt (Normalbereich für das Alter von 25-34 Jahre = 20-25 kg/m<sup>2</sup>).

In 8000 ft sinkt der PO<sub>2</sub> bei allen Probanden wie erwartet ab. Die Abhängigkeit vom Alter (in 8000 ft: PO<sub>2</sub> = -0,240 × Jahre + 67,681; r = -0,651; p < 0,0001) erscheint nun eher linear zu sein (statistisch nicht geprüft). Das Plateau zwischen 40 und 60 Jahren ist verschwunden und der Gesamtabfall von ganz jung zu alt ist offensichtlich geringer, verglichen mit 250 ft (siehe Abb. 5-1: schwarze Dreiecke). Daraus ist ersichtlich, dass bei älteren Probanden der Abfall des Sauerstoffpartialdruckes in der Außenluft den arteriellen Sauerstoff weniger stark senkt als bei jüngeren Probanden. Das wird besonders auffällig, wenn man die drei ältesten mit den drei jüngsten Probanden vergleicht (250 ft: Durchschnitt der Alten = 60,5 mmHg, Durchschnitt der Jungen = 89,33 mmHg; 8000 ft: Durchschnitt der Alten = 49,66 mmHg, der der Jungen = 61,5 mmHg; durchschnittliches Absinken bei den Alten = 10,84 mmHg, durchschnittliches Absinken bei den Jungen = 27,83 mmHg), (s. Abb. 5-1).

Vergleicht man die Frauen mit den Männern, so fällt auf, dass sowohl bei 250 ft als auch bei 8000 ft die Mittelwerte bei den Frauen (250 ft: 76,43 ± 8,67 mmHg; 8000 ft: 54,87 ± 6,44 mmHg) etwas höher sind als bei den Männern (250 ft: 72,3 ± 10,6 mmHg; 8000 ft: 53,83 ± 5,2 mmHg). Beide Unterschiede sind statistisch nicht signifikant.

Die Zahlenpaare in Abb. 5-1 verbinden Personen gleichen Alters, bei denen sich der BMI (Zahlen in der Tabelle im Einschub) unterscheidet. Jeweils die Person mit dem

größten BMI hat den geringsten arteriellen Sauerstoffpartialdruck. Überhaupt korreliert der Sauerstoffpartialdruck negativ mit dem BMI (250 ft:  $r = -0,683$ ,  $p < 0,0001$ ; 6000 ft:  $r = -0,343$ ,  $p = 0,0629$ ; 8000 ft:  $r = -0,450$ ,  $p = 0,0119$ ).

Aus ethischen Gründen wurde von einer Untersuchung der über 60-Jährigen in größeren Höhen als 8000 ft abgesehen. Vergleicht man die Gruppe der 40 bis 60-Jährigen, die alle Höhen durchlaufen haben (6 Probanden), findet man beinahe ein lineares Absinken des  $PO_2$  mit zunehmender Höhe ( $PO_2 = -0,003 \times \text{Höhe ft} + 80$ ), (siehe Abb. 5-2: graue Dreiecke).

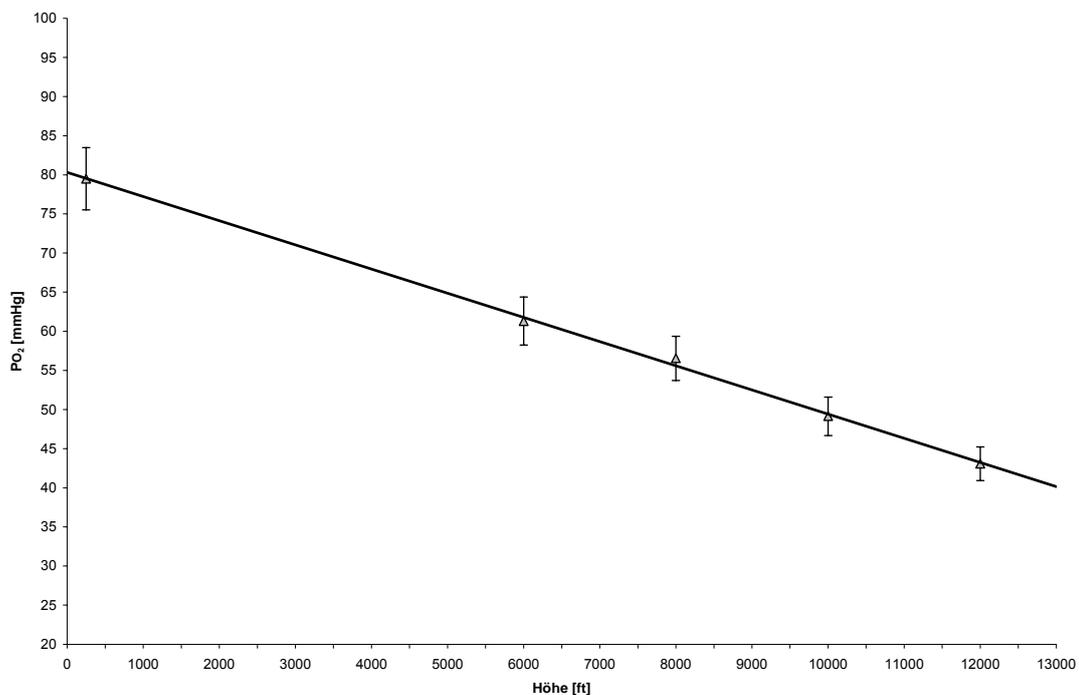


Abb. 5-2: Durchschnittlicher Sauerstoffpartialdruck ( $PO_2$ ) der 40 bis 60-Jährigen (Teilkollektiv 6 Probanden) auf Ortshöhe, 6000 ft, 8000 ft, 10 000 ft und 12 000 ft.

## 5.2.4 Sauerstoffsättigung

Ebenso wie der arterielle Sauerstoffdruck sinkt auch die pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung ( $SpO_2$ ) deutlich mit dem Alter und der Kabinendruckhöhe ab. In Abbildung 5-3 werden die  $SpO_2$ -Werte in 250 ft und 8000 ft miteinander verglichen.

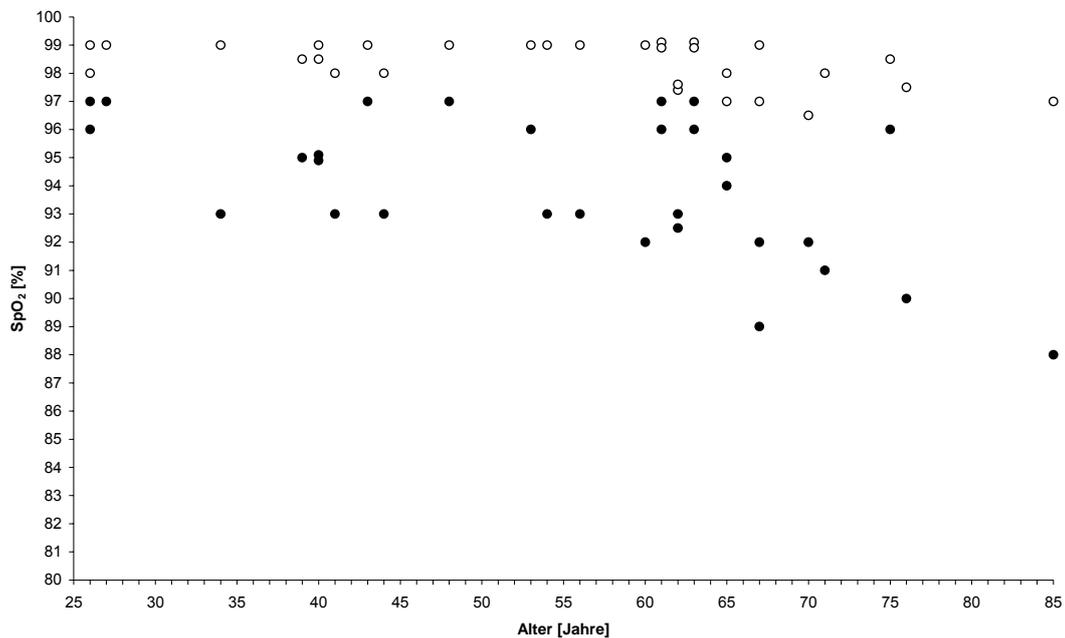


Abb. 5-3: Pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung (SpO<sub>2</sub>) in 250 ft (weiße Kreise) und in 8000 ft (schwarze Kreise) gegenüber dem Alter. Die in dieser Abb. nicht dargestellten sO<sub>2</sub>-Werte (berechnete Sättigung aus der Blutgasanalyse) liegen immer unter den dargestellten Werten.

Im Gegensatz zum Sauerstoffpartialdruck ist die Differenz des SpO<sub>2</sub> zwischen 250 ft und 8000 ft bei den Älteren größer als bei den Jüngeren (250 ft: Durchschnitt der Älteren = 97,7%, Durchschnitt der Jungen = 98,7%; 8000 ft: Durchschnitt der Älteren = 91,3%, der der Jungen = 96,7%; durchschnittliches Absinken der Älteren = 6,4%, bei den Jungen = 2,0%). Dies ist darauf zurückzuführen, dass im bei den älteren Probanden gemessenen Sauerstoffdruckbereich die Sättigungskurve des Hb in den steilen Bereich übergeht.

Ein Vergleich der SpO<sub>2</sub>-Werte der Männer und Frauen auf Ortshöhe (250 ft) zeigt keinen signifikanten Unterschied. In 8000 ft jedoch scheinen die Werte der Frauen (Abb. 5-4: weiße Kreise) höher zu liegen als die der Männer (Abb. 5-4: schwarze Kreise). Trotzdem ist dieser Unterschied in diesen Gruppen statistisch nicht signifikant (Durchschnitt SpO<sub>2</sub> Frauen = 94,8 ± 1,9%, Durchschnitt SpO<sub>2</sub> Männer = 93,2 ± 2,8%, p = 0,1524). Jedoch findet sich in 6000 ft ein signifikanter Unterschied des SpO<sub>2</sub> (Durchschnitt Frauen = 96,8 ± 1,2%; Männer = 95,4 ± 2,3%; 0,02 < p < 0,05).

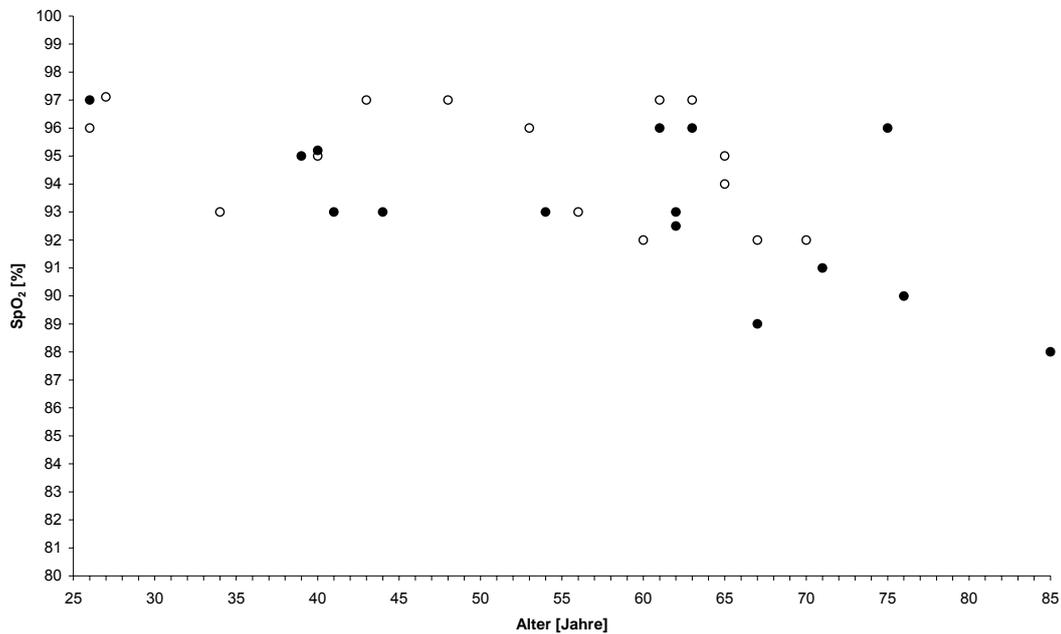


Abb. 5-4: Pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung (SpO<sub>2</sub>) der Frauen (weiße Kreise) und der Männer (schwarze Kreise) gegenüber dem Alter in 8000 ft Druckhöhe.

Im Vergleich zur aus der Blutgasanalyse errechneten Sauerstoffsättigung (sO<sub>2</sub>), liegen die Werte der pulsoxymetrischen Sauerstoffsättigung (SpO<sub>2</sub>) höher. Bei 250 ft beträgt die Differenz im Mittel  $3,52 \pm 2,07\%$ , bei 8000 ft dagegen  $5,53 \pm 2,02\%$ . Dieser Unterschied ist statistisch zu sichern ( $0,001 < p < 0,002$ ).

Vergleicht man die Sauerstoffsättigung (SpO<sub>2</sub>) mit dem Sauerstoffpartialdruck (PO<sub>2</sub>), so korrelieren sie in den Höhen 250 ft ( $r = 0,562$ ;  $p = 0,001$ ) und 8000 ft ( $r = 0,693$ ;  $p < 0,0001$ ) sehr gut. In 6000 ft ( $r = 0,377$ ;  $p = 0,0395$ ) ist die Korrelation nur schwach erkennbar, was sehr wahrscheinlich streuungsbedingt ist, da die Sauerstoffbindungskurve vom flachen in den steileren Teil übergeht.

### 5.2.5 Fingertemperatur

Da die Sauerstoffsättigung des Blutes für einen bestimmten Sauerstoffpartialdruck von der Temperatur abhängt [66], wurde zusätzlich die Temperatur des Messfingers bestimmt. Zwischen Ortshöhe und 8000 ft erhöht sich die durchschnittliche Fingertemperatur der Probanden schwach (Durchschnitt 250 ft:  $28,1 \pm 3,6^\circ\text{C}$ ; Durchschnitt

8000 ft:  $28,9 \pm 3,5^\circ\text{C}$ ;  $0,01 < p < 0,02$ ). Dieser geringe Anstieg mag allerdings auch von der Verweildauer in der Unterdruckkammer bedingt sein.

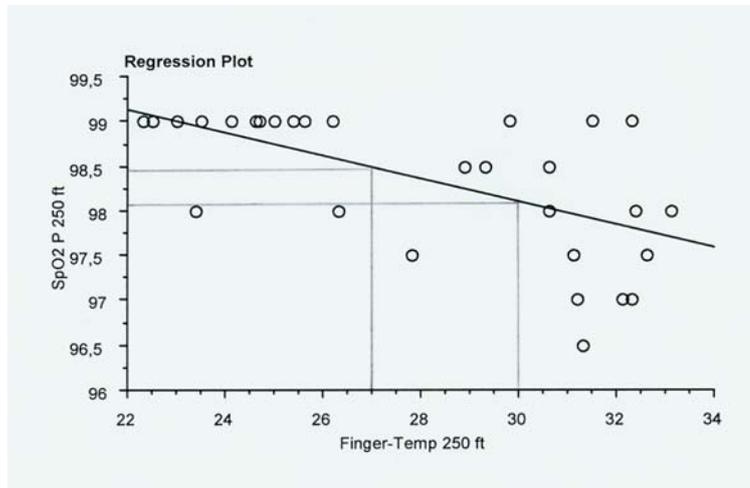


Abb. 5-5: Korrelation: Pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung ( $\text{SpO}_2$ ) gegen Fingertemperatur in 250 ft.

Die Unterscheidung zwischen Frauen und Männer zeigt sowohl in 250 ft (Durchschnitt Frauen =  $25,7 \pm 2,8^\circ\text{C}$ ; Durchschnitt Männer =  $30,5 \pm 2,7^\circ\text{C}$ ;  $p = 0,0007$ ) als auch in 8000 ft (Durchschnitt Frauen =  $26,6 \pm 3,3^\circ\text{C}$ ; Durchschnitt Männer =  $31,2 \pm 2,1^\circ\text{C}$ ,  $p = 0,0004$ ) einen signifikanten Unterschied. Der Abfall der Sättigung mit zunehmender Temperatur ist besonders deutlich. Eine statistisch signifikante Abhängigkeit der  $\text{SpO}_2$ -Werte von der Fingertemperatur konnte festgestellt werden (in 250 ft:  $r = -0,588$ ;  $p = 0,0005$ ), (Abb. 5-5).

Die Korrelation zwischen Fingertemperatur und  $\text{SpO}_2$  wird mit zunehmender Höhe schwächer, in 8000 ft ist keine gesicherte Abhängigkeit mehr nachweisbar. Eine partielle Korrelation ist jedoch trotzdem nachzuweisen, wenn  $\text{PO}_2$  rechnerisch konstant gehalten wird ( $r = -0,551$ ;  $p = 0,0013$ ).

Wie schon oben erwähnt wurde nur ein Teil des Kollektivs (10 Probanden) in den Höhen 10 000 ft und 12 000 ft untersucht. Aufgrund der geringen Datenmenge wird auf die Auswertung der Messergebnisse der Fingertemperatur in 10 000 ft und 12 000 ft Höhe verzichtet.

### 5.2.6 Hämatokrit

Da der Einfluss des Hämatokritwerts auf die pulsoxymetrischen Ergebnisse in der Literatur beschrieben ist [38], wurde auch dieser Blutwert statistisch ausgewertet. Die Hämatokritwerte (HK) der Frauen und die der Männer unterscheiden sich signifikant (Durchschnitt HK Gesamt =  $42,2 \pm 3,4\%$ ; Durchschnitt HK Frauen =  $40,4 \pm 2,6\%$ ; Durchschnitt HK Männer =  $44,1 \pm 3,2\%$ ;  $p = 0,0039$ ). Der Einfluss des Hämatokrits auf die  $SpO_2$  war auch bei uns angedeutet (in 250 ft:  $r = -0,225$ ,  $p = 0,233$ ; in 6000 ft:  $r = -0,378$ ,  $p = 0,0388$ ; in 8000ft:  $r = -0,168$ ,  $p = 0,3781$ ). Abbildung 5-6 zeigt die Abhängigkeit der pulsoxymetrischen Sauerstoffsättigung vom Hämatokrit in 6000 ft.

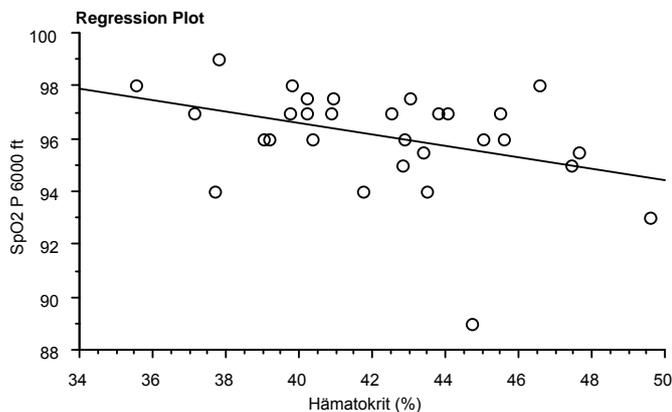


Abb. 5-6: Korrelation: Pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung ( $SpO_2$ ) gegen Hämatokrit in 6000 ft ( $r = -0,378$ ,  $p = 0,0388$ ).

Eine signifikante Korrelation des Hämatokrits und der Fingertemperatur konnte sowohl in 250 ft als auch in 8000 ft festgestellt werden (in 250 ft:  $r = 0,410$ ; in 8000 ft:  $r = 0,411$ ; für beide:  $0,02 < p < 0,05$ ).

### 5.2.7 Partialdruck des Kohlendioxids

In allen von uns gemessenen Höhen steigt der  $PCO_2$  mit dem Alter leicht an (in 250 ft:  $r = 0,446$ ;  $0,01 < p < 0,02$ ; in 6000 ft:  $r = 0,469$ ;  $0,005 < p < 0,01$ ; in 8000 ft:  $r = 0,458$ ;  $0,01 < p < 0,02$ ). Der Höhengaufstieg ist allerdings im Mittel mit einem leichten Abfall des  $PCO_2$  verbunden (durchschnittlicher  $PCO_2$  in 250 ft:  $38,08 \pm 3,251$  mmHg; durchschnittlicher  $PCO_2$  in 8000 ft:  $36,036 \pm 3,391$  mmHg;  $p < 0,001$ ).

Vergleicht man jedoch die drei ältesten mit den drei jüngsten Probanden, so ist der Abfall des  $\text{PCO}_2$  beim Aufstieg auf 8000 ft bei den Älteren geringfügig höher als bei den Jüngeren (durchschnittlicher Abfall des  $\text{PCO}_2$  bei den Älteren = 2,9 mmHg und bei den Jüngeren = 1,7 mmHg).

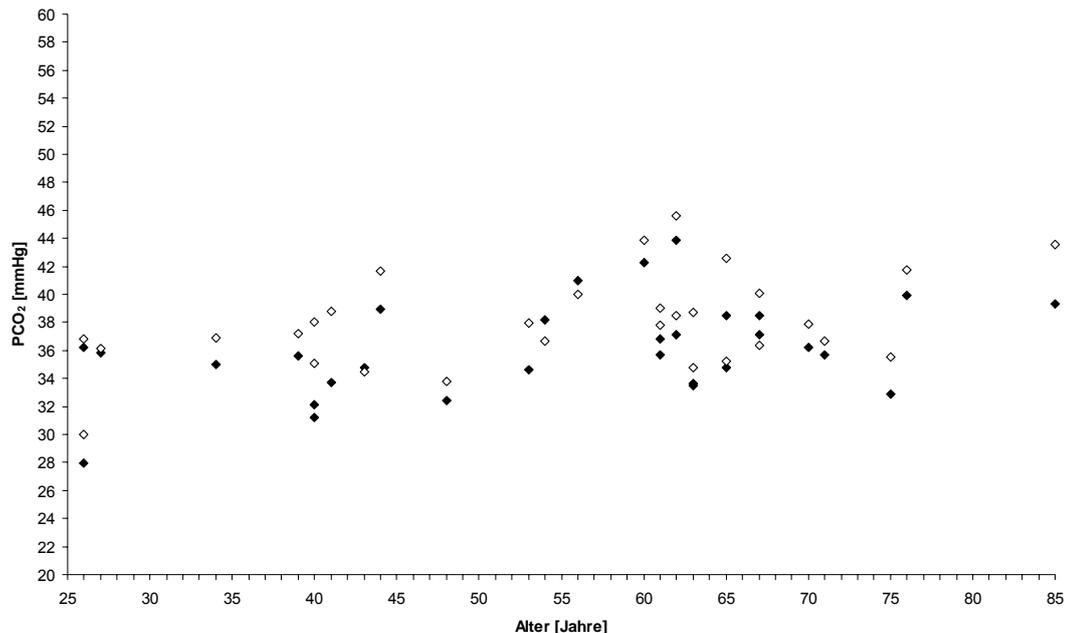


Abb.5-7:  $\text{CO}_2$ -Partialdruck ( $\text{PCO}_2$ ) in 250 ft (weiße Raute) gegenüber dem Alter ( $r = 0,446$ ,  $p = 0,0127$ ) und in 8000 ft (schwarze Raute) gegenüber dem Alter ( $r = 0,458$ ,  $p = 0,0101$ ).

Mit dem Abfall des  $\text{PCO}_2$  ist ein Anstieg des pH-Wertes von  $7,444 \pm 0,019$  in 250 ft auf  $7,462 \pm 0,023$  in 8000 ft feststellbar ( $p < 0,0001$ ).

Der gleichzeitig beobachtete Anstieg des Basenexzess (250 ft:  $1,95 \pm 1,872$ ; 8000 ft:  $2,05 \pm 2,171$ ) ist statistisch nicht zu sichern. Dagegen ist der Basenexzess in Ortshöhe (250 ft) eng mit dem  $\text{PCO}_2$  verbunden ( $r = 0,636$ ;  $p < 0,0001$ ).

Des weiteren unterscheiden sich die  $\text{PCO}_2$ -Werte von Frauen und Männern in 8000 ft nicht signifikant (Durchschnitt Frauen:  $\text{PCO}_2 = 35,48 \pm 3,59$  mmHg; Durchschnitt Männer:  $\text{PCO}_2 = 36,65 \pm 3,19$  mmHg). Die Werte der drei jüngsten Probanden sind niedriger als die der drei ältesten (Durchschnitt Jüngere:  $\text{PCO}_2 = 33,0$  mmHg; Durchschnitt Ältere:  $\text{PCO}_2 = 37,4$  mmHg). Es besteht keine signifikante Abhängigkeit des Basenüberschuss der Extrazellulärflüssigkeit ( $\text{BE}_{\text{ecf}}$ ) vom Alter, trotzdem sind die

Werte der drei ältesten Probanden höher als die der drei jüngsten (Durchschnitt Jüngere:  $BE_{ecf} = 0,83$  mmol/l; Durchschnitt Ältere:  $BE_{ecf} = 3,67$  mmol/l).

### 5.2.8 Alter, Gewicht und Körpergröße

Wie schon zuvor erwähnt, sind die Frauen in unserer Studie etwas jünger, jedoch statistisch nicht signifikant (Altersdurchschnitt Frauen =  $51,8 \pm 14,7$  y; Altersdurchschnitt Männer =  $57,7 \pm 16,6$  y;  $p = 0,3195$ ). Da der  $PO_2$  mit dem Alter abnimmt, ist der Durchschnittswert der Frauen etwas höher als der der Männer (in 8000 ft:  $PO_2$  Frauen =  $54,9 \pm 6,4$  mmHg;  $PO_2$  Männer =  $53,8 \pm 5,2$  mmHg; n.s.). Das gilt auch für die Durchschnittswerte der Sauerstoffsättigung ( $sO_2$ ), (in 8000 ft:  $sO_2$  Frauen =  $89 \pm 3\%$ ;  $sO_2$  Männer =  $87,7 \pm 3,6\%$ ; n. s.).

Die Gewichts- und Körpergrößenunterschiede (Durchschnittsgewicht Frauen =  $62,8 \pm 8,7$  kg; Durchschnittsgewicht Männer =  $82,5 \pm 13$  kg; Durchschnitt Körpergröße Frauen =  $163,87 \pm 6,4$  cm; Durchschnitt Körpergröße Männer =  $177,47 \pm 9,49$  cm) sind geschlechtsspezifisch. Der Body-Mass-Index (BMI) steigt mit dem Alter an, jedoch lässt sich diese Relation statistisch nicht sichern ( $r = 0,349$ ;  $p = 0,058$ ). Er ist in unserem Kollektiv bei den Frauen signifikant kleiner als bei den Männern (Frauen:  $24,487 \pm 3,2578$  kg/m<sup>2</sup>, Männer:  $26,1573 \pm 3,5172$  kg/m<sup>2</sup>,  $0,01 < p < 0,02$ ).

**Tabelle 5-1:** Frauen: wichtige Daten (z.B. Körpermaße, Fingertemperatur, Blut- und Sättigungswerte).

Alter [Jahre]	Größe [cm]	Gewicht [kg]	BMI [kg/m <sup>2</sup> ]	Finger-Temp. 8000 ft [°C]	Hk [%]	BE 8000 ft [mmol/l]	Po <sub>2</sub> 250 ft [mmHg]	Po <sub>2</sub> 8000 ft [mmHg]	Pco <sub>2</sub> 250 ft [mmHg]	Pco <sub>2</sub> 8000 ft [mmHg]
26	180	63	19,44	29,0	39,8	-1	91,5	70,0	31,0	28,0
27	166	53	19,23	25,1	43,1	2	90,5	57,5	36,2	35,8
34	172	78	26,37	21,6	43,8	3	63,0	46,0	36,9	35,0
40	159	52	20,57	27,1	37,1	-1	81,5	65,0	35,0	31,2
43	160	56	21,88	24,6	37,8	1	78,0	54,5	34,4	34,7
48	164	59	21,94	29,6	35,6	1	81,0	58,0	33,8	32,4
53	170	63	21,80	23,9	39,8	1,5	77,0	58,5	38,1	34,6
56	158	62	24,84	24,3	40,9	7	80,0	52,0	40,0	41,0
60	167	57	20,44	25,7	39,2	3	70,0	48,5	43,9	42,3
61	156	59	24,24	24,3	42,9	1,5	82,0	57,0	39,0	36,8
63	158	60	24,03	31,3	40,9	0,5	73,0	51,0	34,8	33,6
65	160	60	23,44	25,0	45,0	3,5	75,5	52,5	42,6	38,5
65	163	83	31,24	31,8	40,4	-1	69,0	54,0	35,2	34,9
67	163	66	24,84	24,5	39,0	1	73,5	50,5	36,4	37,1
70	162	72	27,43	32,1	41,7	2,5	61,0	48,0	37,9	36,3

**Tabelle 5-2:** Männer: wichtige Daten (z.B. Körpermaße, Fingertemperatur, Blut- und Sättigungswerte).

Alter [Jahre]	Größe [cm]	Gewicht [kg]	BMI [kg/m <sup>2</sup> ]	Finger-Temp. 8000 ft [°C]	Hk [%]	BE 8000 ft [mmol/l]	Po <sub>2</sub> 250 ft [mmHg]	Po <sub>2</sub> 8000 ft [mmHg]	Pco <sub>2</sub> 250 ft [mmHg]	Pco <sub>2</sub> 8000 ft [mmHg]
26	183	92	27,47	33,1	46,6	1,5	86,0	62,0	36,8	35,2
39	184	96	28,36	32,8	47,7	4	77,0	56,0	37,2	35,6
40	183	82	24,49	30,5	42,5	4	81,0	59,0	38,0	32,1
41	191	96	26,32	32,3	49,6	-1	78,0	60,0	38,8	33,2
44	182	90	27,17	33,9	45,6	2	79,5	56,5	41,6	38,9
54	182	62	18,72	29,8	44,0	3	80,0	51,0	36,7	38,2
61	176	74	23,89	29,3	40,2	0,5	78,0	55,5	37,8	35,7
62	180	92	28,40	32,6	47,4	1,5	60,5	51,0	38,5	37,2
62	186	89	25,73	27,6	42,8	6	76,0	52,0	45,6	43,8
63	156	51	20,96	27,0	40,2	1	82,5	60,5	38,7	33,5
67	165	93	34,16	32,3	44,7	2	52,5	45,0	40,1	38,6
71	184	85	25,11	32,8	43,4	1,5	72,0	50,0	36,6	35,5
75	174	85	28,08	30,5	45,5	-1	55,0	53,5	35,6	32,9
76	168	74	26,22	31,3	37,7	8,5	63,5	49,0	41,7	39,9
85	168	77	27,28	32,8	43,5	3,5	63,0	46,5	43,5	39,4

## 6. Diskussion

Wie die Sauerstoffversorgung des Organismus für die Aufrechterhaltung der Funktion des Gehirns gewährleistet werden kann, ist eine wesentliche Aufgabe der Höhenphysiologie und damit auch der Flugmedizin. Für Piloten und Passagiere wäre es am angenehmsten, in der Kabine den Druck auf Meereshöhe einzustellen, womit eine ausreichende Sauerstoffversorgung gewährleistet ist. Ein solch hoher Kabinendruck würde jedoch die Kosten im Flugzeugbau und im Betrieb der Flugzeuge stark erhöhen, denn insbesondere für Langstreckenflüge sind Flughöhen von mehr als 10 000 m optimal. Der Spritverbrauch ist in großen Flughöhen wegen des kleineren Strömungswiderstandes und des verbesserten Wirkungsgrades geringer. Zusätzlich erhöht die Benutzung des Flugraumes in hohen Höhen die Sicherheit des Flugbetriebes, denn es muss nicht jedem Gebirge ausgewichen werden, der Flug findet über dem Wettergeschehen statt, der Luftraum kann besser für Kurz- und Langstreckenflüge unterteilt werden und außerdem wird bei Überlandflügen die Wohnbevölkerung weniger gestört. Die Vereinigung dieser beiden Optima würde jedoch wegen des hohen transmuralen Druckes sehr starke Wände der Druckkabine des Flugzeuges erfordern, die sowohl den Bau verteuerten als auch den Treibstoffverbrauch durch die beträchtliche Gewichtszunahme sehr stark erhöhten.

Ein seit Jahrzehnten bewährter Kompromiss beruht auf einem minimalen Kabinendruck von 565 mmHg mit einem Sauerstoffpartialdruck von ca. 115 mmHg. Dies entspricht in der Außenatmosphäre einer Höhe von etwa 8000 ft bzw. 2438 m über dem Meeresspiegel. Die arterielle O<sub>2</sub>-Sättigung für diese Höhe wird unterschiedlich zwischen 80% und 94% angegeben [79]. Bereits diese leichte Hypoxie soll sich in gewissen Symptomen wie die Beeinträchtigung des Gesichtssinns [21, 32, 52] Schläfrigkeit, Urteilsschwäche, verschlechterter Koordination und verringerter Leistungsfähigkeit [19, 25, 50, 51, 61, 74] zeigen. Kurzzeitiger Aufenthalt in einer Höhe von 8000 ft wird relativ gut vertragen, so gaben unsere Probanden an, keinerlei Beschwerden zu haben. Jedoch häufen sich die Berichte über Unbehagen und Diskomfort nach drei bis neun Stunden Aufenthalt. Wobei sich die über 60-Jährigen am wenigsten beklagten und die meisten Beschwerden in der Gruppe der Frauen mittleren Alters auftraten [56]. Der in der Luftfahrt eingegangene Kompromiss kann

also durchaus Piloten und Passagiere beeinträchtigen. Insofern ist es immer wieder erforderlich, sich ein Bild über das Sauerstoffangebot und das Ausmaß der leichten Hypoxie zu machen.

Das Sauerstoffangebot ergibt sich aus dem Partialdruck des Sauerstoffs in der Inspirationsluft. Bei nur geringer Luftfeuchtigkeit, wie sie im Flugzeug vorliegt, berechnet sich der Partialdruck aus Sauerstoffgehalt und Gesamtdruck. Letzterer unterliegt im Flugzeug strenger Kontrolle. Trotzdem kann sein Abfall zur hypoxiebedingten Handlungsunfähigkeit führen (vgl. Helios Flight 522 Kapitel 3.5.2). Der Sauerstoffgehalt wird nicht kontrolliert [46]. Er beträgt in der angesaugten Außenluft 20,9%. Da aber die den Verbrauchern zugeführte Luft rezirkuliert wird, ist besonders auf ausgebuchten Flügen ein Abfall des Sauerstoffgehaltes in der Kabinenluft denkbar, der die leichte druckbedingte Hypoxie verstärken könnte und damit durchaus zu schwereren Beeinträchtigungen der Piloten, des Kabinenpersonals und der Passagiere führen könnte.

Der in unterschiedlichen Flugzeugtypen, auf unterschiedlichen Flugrouten und bei mehreren Fluggesellschaften immer wieder in kleinen Zeitintervallen gemessene Sauerstoffgehalt von 20,9% zeigt, dass sein Abfall von den Flugzeugkonstrukteuren nicht regelhaft in Kauf genommen sondern eher sorgfältig vermieden wird. Damit aber ist es möglich, die in der Höhenklimasimulationsanlage erzielten Ergebnisse auf die Verhältnisse in Routineflügen zu übertragen.

Als Indikator für eine ausreichende Sauerstoffversorgung des Gewebes dient üblicherweise die Methode der Pulsoxymetrie [67], z.B. bei der Patientenüberwachung während Operationen. Aber auch in der Höhenphysiologie und in der Flugmedizin ist sie wiederholt eingesetzt worden, um drohende Hypoxien erfassen zu können [15, 41, 55, 80].

Bei einer solchen Untersuchung durch unsere Arbeitsgruppe [58] fiel auf, dass in größeren Höhen bei den Frauen die O<sub>2</sub>-Sättigung etwas höher lag als bei den Männern. Auch in einer groß angelegten Studie von Muhm 2007 mit 502 Probanden viel dieser Geschlechterunterschied auf, es wird jedoch nicht näher darauf eingegangen und die Frage bleibt im Raume stehen [56].

Der primäre Verdacht, es könnte sich um einen Einfluss des Nagellacks handeln, hat sich nicht bestätigt, da die teilnehmenden Frauen anamnestisch keinen Nagellack benutzten. Auch wurden die Probanden dieser Studie explizit unterrichtet an den Versuchstagen keinen Nagellack zu tragen. Forscht man in der Literatur nach, so finden sich mehrere Arbeiten zu diesem Thema. Kataria und Lampkins 1986 fanden in systematischen Untersuchungen keinen nennenswerten Einfluss des Nagellacks auf die pulsoxymetrisch gemessene Sauerstoffsättigung des Hb [42]. Auch die Arbeit von Hinkelbein et al. 2007 bestätigt diese Ergebnisse, es wird sogar angeführt, dass bei den meisten Farben zu niedrige Werte gemessen werden [39]. Somit musste nach anderen Ursachen gesucht werden.

Von einem Unterschied im Sättigungsverhalten des Hämoglobins bei Männern und Frauen ist nichts bekannt. Weitere Ursachen könnten auch lokale Besonderheiten an der Messstelle oder Differenzen im arteriellen Sauerstoffpartialdruck sein. Letzterer wurde mit Hilfe einer Blutgasanalyse im kapillären Blut festgestellt, das aus dem mit Finalgon hyperämisierten Ohrläppchen gewonnen wurde.

Das Blut bekommt bei der Abnahme Kontakt mit der Außenluft und kann Sauerstoff aufnehmen und Kohlendioxid abgeben, wenn nicht sehr schnell und sorgfältig gearbeitet wird. Solche fehlerhaften Bestimmungen zeigen dann einen hohen Sauerstoffpartialdruck, einen niedrigen CO<sub>2</sub>-Partialdruck und einen zum Alkalischen zeigenden pH-Wert. Obwohl in den vorgelegten Ergebnissen durchaus hohe Sauerstoffdrücke und niedrige CO<sub>2</sub>-Drücke besonders bei den jüngeren Probanden auftraten, ist ein solcher Fehler, zumindest was den Sauerstoffpartialdruck betrifft, höchst unwahrscheinlich, denn diese liegen sowohl für den Ausgangsbereich bei 250 ft als auch für den Höhenbereich 8000 ft in den Größenordnungen, wie sie in der Literatur angegeben sind [79]. Außerdem passen die unabhängig von der Blutgasanalyse erhobenen Werte der pulsoxymetrisch gemessenen Sauerstoffsättigung zu den Druckwerten. In zwei Studien, die in Verkehrsflugzeugen durchgeführt wurden, wird von niedrigeren Sättigungswerten berichtet [15, 43]. Muhm 2007 bestätigte die Ergebnisse unserer Untersuchung [56]. Insofern können diese Druckwerte den wahren Verhältnissen im Blut als angenähert betrachtet werden.

Der Sauerstoffpartialdruck ist in starkem Maße vom Alter abhängig, wie auch in der Literatur [66] beschrieben. Insofern sind sehr viele Tabellenangaben über seinen Wert in unterschiedlichen Höhen nur mit Vorsicht zu verallgemeinern, es sei denn, das Alter der Probanden, an denen die Werte gewonnen wurden, ist angegeben.

In unserer Studie tritt in 250 ft bei den Probanden zwischen etwa 40 und 60 Jahren ein relativ vom Alter unabhängiger Wert um 80 mmHg auf. Leider können wir nicht feststellen, in welchem Alter dieses Plateau beginnt, weil uns Versuchspersonen in den frühen und mittleren dreißiger Jahren fehlen. Die einzige 34-jährige Probandin ist Raucherin und dazu noch sehr korpulent. Dies weist auf zwei weitere Faktoren hin, die den Sauerstoffpartialdruck im Blut beeinflussen. Sicher lassen die drei Raucher in unserem Kollektiv keine weitreichenden Schlussfolgerungen zu, sie weisen jedoch auf die Schädlichkeit von Rauchen und Übergewicht für die Sauerstoffversorgung des Gewebes hin. Auch in den größeren Höhen (6000 ft und 8000 ft) bleibt der nun allgemein abgefallene Sauerstoffpartialdruck noch abhängig vom Alter. Jedoch verläuft diese Kurve nun flacher, so dass bei den jüngeren Probanden der  $PO_2$  in der Höhe stärker abfällt als bei den älteren. Offensichtlich existieren bei den Jüngeren nur wenige Antriebe, den Abfall zu korrigieren, während bei den Älteren entsprechende Gegenmaßnahmen auftreten können. Solche Maßnahmen könnten sich als eine leichte Hyperventilation in dem beobachteten Abfall des  $PCO_2$  in der größeren Höhe ausdrücken. Dann müsste der Abfall des  $PCO_2$  bei den älteren Probanden größer sein als bei den jüngeren. Dies ist allerdings nur zu erkennen, wenn man die drei jüngsten mit den drei ältesten Probanden vergleicht.

Auch der  $PCO_2$  zeigt generell eine Altersabhängigkeit, in dem er mit zunehmendem Alter etwas ansteigt. Dies zusammen mit dem Abfall des  $PO_2$  mit dem Alter könnte so gedeutet werden, dass ältere Leute in Ruhe leicht hypoventilieren. Der damit verbundene Abfall des pH-Wertes wird zumindest teilweise renal durch Anstieg des Basenexzesses kompensiert. Dem entspräche auch der leichte statistisch nicht zu sichernde Anstieg des Basenexzesses mit zunehmendem Alter. Man könnte vorsichtig spekulieren, dass im Alter die Empfindlichkeit des Atemantriebs auf  $CO_2$  geringer wird und der Antrieb über Sauerstoffmangel einen größeren Anteil am Gesamtantrieb bekommt. Wenn sich das so bestätigen ließe, wäre eine Sauerstoffgabe bei älteren Menschen mit besonderer Aufmerksamkeit zu kontrollieren.

Die Abnahme des Sauerstoffpartialdrucks mit wachsendem Body-Mass-Index (BMI) zeigt, dass Übergewicht nicht nur das Risiko eine tiefe Venenthrombose zu erleiden erhöht [10, 11], sondern bestätigt sich durch unsere Befunde auch als Risikofaktor einer nicht zureichenden Sauerstoffversorgung [18].

Damit steigt die Gefährdung bei älteren Reisenden, wenn sie ein größeres Übergewicht haben. In unserem Kollektiv unterscheiden sich Männer und Frauen signifikant im BMI (Frauen:  $24,487 \pm 3,2578 \text{ kg/m}^2$ , Männer:  $26,1573 \pm 3,5172 \text{ kg/m}^2$ ,  $0,01 < p < 0,02$ ). Dies mag ein weiterer Grund für die etwas höheren Sauerstoffpartialdrücke bei den Frauen sein.

Für Routine-Zwecke ist die Blutgasanalyse für Untersuchungen im Flugzeug, aber auch in der Druckkammer weniger geeignet. Wie bildet sich nun der Sauerstoffpartialdruck auf die pulsoxymetrisch gemessene Sauerstoffsättigung ab?

Die dominierende Funktion ist die Sauerstoffsättigungskurve des Hämoglobins. Trotz ihres flachen Verlaufs im Bereich hoher Drücke lässt sie doch in 250 ft Höhe die Altersabhängigkeit erkennen, wenn auch weniger deutlich als der Partialdruck. Dies aber bedeutet, dass in Meereshöhe Sättigungswerte von 96% und 97% bereits zu hinterfragen sind, z.B. nach dem Alter, dem BMI oder einer anderen möglichen Beeinträchtigung.

Wie nicht anders zu erwarten, fällt mit zunehmender Höhe auch die pulsoxymetrisch gemessene Sauerstoffsättigung ab. Im Gegensatz zum Partialdruck ist aber nun die Differenz zwischen 250 ft und 8000 ft bei den älteren Leuten größer als bei den jungen Leuten. Das weist darauf hin, dass sich insbesondere die alten Leute dem steilen Teil der Sättigungskurve nähern. Dies bedeutet nicht nur eine Verringerung der transportierten Sauerstoffmenge sondern auch eine empfindlichere Reaktion auf Schwankungen des Sauerstoffdruckes [53], z.B. dessen Abnahme bei einer ungünstigen Sitzposition, übermäßigem Verzehr von Speisen mit anschließender Einschränkung der Zwerchfellexkursionen oder bei plötzlichem Sauerstoffdruckabfall in der Außenatmosphäre.

Der funktionelle Zusammenhang zwischen  $\text{O}_2$ -Partialdruck im Blut und der pulsoxymetrisch gemessenen Sauerstoffsättigung ( $\text{SpO}_2$ ) wird von mehreren Größen verändert. Bekannt ist, dass mit höherem Hämatokrit bei gleichem Druck der

Sättigungswert abnimmt, umgekehrt wird bei niedrigem Hämatokrit die arterielle Sauerstoffsättigung ( $\text{SaO}_2$ ) im Mittel durch die  $\text{SpO}_2$  überschätzt [38]. In der Tat konnten auch wir eine schwache Abhängigkeit zwischen Sättigung und Hämatokrit feststellen. Da Frauen im Durchschnitt einen niedrigeren Hämatokrit als Männer haben, wäre darin ein weiterer Grund zu suchen für die etwas höheren Sättigungswerte bei Frauen, wie es auch in dieser Studie angedeutet ist. Über den biophysikalischen Zusammenhang Hämatokrit und pulsoxymetrisch gemessenen Sättigungswerten ist in der Literatur kein Hinweis zu finden.

Weiterhin bekannt ist die Abhängigkeit des Verlaufs der Sauerstoffbindungskurve von der Temperatur. Mit fallenden Temperaturen wird sie nach links verschoben [66]. Unseres Wissens wurde noch nicht systematisch geprüft, inwieweit die Temperatur am Messfinger die pulsoxymetrische Messung beeinflusst. Dies tut sie nun deutlich. Da die Fingertemperatur in unserem Kollektiv bei Frauen deutlich niedriger ist als bei Männern, ist die schwach positive Korrelation zwischen Fingertemperatur und Hämatokrit nicht verwunderlich (in 250 ft:  $r = 0,41$ ; in 6000 ft:  $r = 0,285$ ; in 8000 ft:  $r = 0,411$ ; für alle Höhen:  $0,02 < p < 0,05$ ). Beide Parameter beeinflussen die pulsoxymetrisch gemessene Sauerstoffsättigung in dem Sinn, dass sie bei Frauen etwas höher als bei Männern gefunden wird.

Die 34-jährige Probandin zeigt bei 250 ft trotz sehr niedrigem  $\text{O}_2$ -Partialdruck eine 99%-ige Sättigung, und auch bei 8000 ft ist die Sättigung höher als es dem Druck entspricht. Dies könnte am Carboxyhämoglobingehalt liegen, der den Abfall der  $\text{O}_2$ -Sättigung verschleiern kann [14, 15]. Genauso wahrscheinlich aber ist auch die niedrige Fingertemperatur, mit  $21,6^\circ\text{C}$  die niedrigste im gesamten Kollektiv.

Die vom Pulsoxymeter angegebene Sauerstoffsättigung liegt bei allen Einzelmessungen über der aus der Blutgasanalyse berechneten. Der Temperaturunterschied kommt dafür quantitativ nicht in Frage, auch wenn der Wert in der Blutgasanalyse mit  $37^\circ\text{C}$  angenommen wird, denn die Temperaturabhängigkeit beträgt etwa 0,5% pro  $3^\circ\text{C}$  (Abb. 5-5, S. 60). Möglicherweise liegt es an der Eichung der von uns benutzten Instrumente. Dies muss man berücksichtigen, wenn man mit der Pulsoxymetrie mehr als nur einen orientierenden Indikatorwert erfassen möchte. Der Unter-

schied zwischen den Höhen ergibt sich aus dem Umstand, dass Werte über 100% nicht existieren und die von uns benutzten Pulsoxymeter bei 99% am Anschlag sind.

## 7. Zusammenfassung

Besonders bei Interkontinentalflügen werden Flughöhen von 10 000 m bis 13 000 m bevorzugt. Zur Material- und damit zur Treibstoffeinsparung wird bei Langstreckenflügen durch Absenkung des Kabinendrucks auf 565 mmHg, was einer Höhe von 2438 m bzw. 8000 ft über dem Meeresspiegel entspricht, der transmurale Druck reduziert. Die bei diesem Umgebungsdruck auftretende leichte Hypoxie [15, 53] kann bereits Störungen auslösen: Abnahme der Nachtsehtauglichkeit [21, 32, 52], Schläfrigkeit, Urteilsschwäche [19, 25, 50, 51, 61, 74]. Insofern ist es äußerst wichtig, dass das Sauerstoffangebot nicht zusätzlich zum gesenkten Druck noch durch eine rezirkulationsbedingte Abnahme des Sauerstoffgehalts reduziert wird. Diesbezügliche Messungen in unterschiedlichen Flugzeugen unterschiedlicher Fluggesellschaften ergaben selbst bei vollbesetzten Transatlantikflügen stets einen Sauerstoffgehalt von 20,9%. Trotz steigender Spritpreise wird demnach derzeit am Frischluftdurchsatz nicht gespart.

Die Wirkung des verminderten Sauerstoffangebotes auf den Sauerstoffhaushalt der Fluggäste wurde in der Höhen-Klima-Simulationsanlage des Flugmedizinischen Instituts der Luftwaffe Königsbrück bei Dresden an 15 Frauen im Alter von 26 bis 70 Jahren ( $51,8 \pm 14,0$  Jahre) und 15 Männer im Alter von 26 bis 85 Jahren ( $57,7 \pm 16,6$  Jahre) mit Hilfe der Blutgasanalyse und der pulsoxymetrischen Hämoglobinsättigung gemessen. Zusätzlich wurde ein kleines Blutbild erstellt und am Messfinger der Puls oxymetrie die Fingertemperatur gemessen. Das gesamte Kollektiv wurde von 250 ft (Ortshöhe) auf Höhen von 6000 ft und 8000 ft gebracht, 10 Teilnehmern wurden außerdem die Höhen 10 000 ft und 12 000 ft zugeteilt. Jeder Höhe waren die Probanden aufsteigend für etwa 30 Minuten ausgesetzt.

Die Ergebnisse aus den Versuchsreihen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Der arterielle Sauerstoffpartialdruck folgt der Höhe linear:  $PO_2 = -0,003 \times \text{Höhe ft} + 80$ . In Ortshöhe folgt der  $PO_2$  dem Alter:  $PO_2 = -0,418 \times \text{Alter} + 97,3$  ( $r = -0,674$ ;  $p < 0,0001$ ). Bei 8000 ft wird die Beziehung etwas flacher:  $PO_2 = -0,24 \times \text{Alter} + 67,7$

( $r = -0,651$ ;  $p < 0,0001$ ). Möglicherweise antworten ältere Menschen auf den Abfall des arteriellen Sauerstoffdrucks etwas stärker als jüngere Menschen.

Der  $PO_2$  korreliert negativ mit dem Body-Mass-Index (bei 250 ft:  $r = -0,683$ ;  $p < 0,0001$ ). Der  $PCO_2$  steigt im Alter leicht an (bei 250 ft:  $r = 0,446$ ;  $0,01 < p < 0,02$ ), er fällt aber bei fast allen Probanden mit zunehmender Höhe als Zeichen einer leichten Hyperventilation etwas ab.

Vergleicht man die Messergebnisse der pulsoxymetrischen Sauerstoffmessung der Frauen mit denen der Männer, so fällt auf, dass die der Frauen im Durchschnitt etwas höher liegen [56]. Die pulsoxymetrisch gemessene Sauerstoffsättigung ist in ähnlicher Weise wie der  $PO_2$  von der Höhe und dem Druck abhängig, allerdings beeinflussen die Temperatur am Messfinger als auch der Hämatokritwert das Messergebnis negativ. Daraus wird ersichtlich, warum unter sonst gleichen Bedingungen die pulsoxymetrischen Sättigungswerte bei Frauen etwas höher liegen.

Da die pulsoxymetrischen Sättigungswerte regelhaft um 2% bis 5% über denen aus der Blutgasanalyse errechneten liegen, sind Werte unter 90%, wie sie bei älteren Personen schon in 8000 ft Höhe auftreten können, durchaus als ernste Hypoxieindikatoren aufzufassen.

## 8. Literaturverzeichnis

1. Abbott Laboratories (2005) i-STAT Kartuschen- und Analyseinformationen, Art: 714258-02F, Illinois, USA
2. AAIASB: Air Accident Investigation & Aviation Safety Board of Hellenic Republic Ministry of Transport and Communications (2006) Aircraft Accident Report: Helios Airways Flight HCY522, Boeing 737-31S at Grammatiko, Hellas on 14th August 2005, p 159
3. Alexander J, Hartleey H, Modelsky M, Grover R (1967) Reduction of stroke volume during exercise in man following ascent to 3100 m altitude. *J Appl Physiol* 23(6):849-858
4. Außenstelle der Luftwaffe für Flugmedizin (2002) Leistungskennziffern der Höhen-Klima-Simulationsanlage (HKS)
5. Außenstelle der Luftwaffe für Flugmedizin (2002) Verfahrenstechnologische Kennziffern der Höhen-Klima-Simulationsanlage (HKS)
6. Benson JP, Venkatesh B, Patla V (1995) Misleading information from pulse oximetry and the usefulness of continuous blood gas monitoring in a post cardiac surgery patient. *Intensive Care Med* 21:437-9
7. Biermann MI, Stein KL, Snyder JV (1992) Pulse oximetry in the postoperative care of cardiac surgical patients. A randomized controlled trial. *Chest* 102:1367-70
8. Bombardier Inc. (2005) Air Conditioning & Pressurization. In: Quick Reference Handbook Vol. 2, Rev. 58. Québec, Montréal (Kanada)

9. Bowes WA 3<sup>rd</sup>, Corke BC, Hulka J (1989) Pulse oximetry: a review of the theory, accuracy, and clinical applications. *Obstet Gynecol* 74:541-6
10. Callanan JG (1977) Medical hazards of air travel. *Br Med J* 1:1473-4
11. Cannegieter SC, Doggen CJ, van Houwelingen HC, Rosendaal FR (2006) Travel-related venous thrombosis: results from a large population-based case control study. *PLoS Med* 3(8):307
12. Chiappini F, Fuso L, Pistelli R (1998) Accuracy of a pulse oximeter in the measurement of the oxyhemoglobin saturation. *Eur Respir J* 11:716-9
13. Christensen E, Krogh A (1939) Die Wirkung niedriger O<sub>2</sub>-Spannung auf Höhenflieger. *Skand. Arch. Physiol* 73:145-154
14. Comroy JP (1969) Smoking and the anesthetic risk. *Anesth Analg* 48:388-400
15. Cottrell JJ, Lebovitz BJ, Fennell RG, Kohn GM (1995) In-flight arterial saturation: continuous monitoring by pulse oximetry. *Aviat Space Environ Med* 66:126-30
16. Criticare Systems, Inc. (1993) 504-USP Gebrauchsanweisung, Handbuch Art.-Nr. 41280B003, Wisconsin, USA
17. DeHart RL (1996) *Fundamentals of aerospace medicine*, 2nd ed. Williams & Wilkins, Baltimore, pp 3-11
18. DeHart RL (2003) Health issues of air travel. *Annu Rev Public Health* 24:133-151
19. Denison DM, Ledwith F, Poulton EC (1966) Complex reaction times at simulated cabin altitudes of 5000 ft and 8000 ft. *Aerosp Med* 10:1010-1013

20. Dill DB, Horvath SM, Dahms T, Parker RE, Lynch J (1969) Hemoconcentration at altitude. *J Appl. Physiol* 27(4):514-518
21. Draeger J, Daumann FJ (1993) Aviation and space ophthalmology. *Ophthalmologie* 90(4):380-6
22. Dräger Medical AG, Aerospace GmbH (2000) Gebrauchsanleitung microPac Plus: Technische Daten, Lübeck
23. Dripps R, Comroe J (1947) The effect of the inhalation of high and low oxygen concentration on respiration, pulse rate, ballistocardiogram and arterial oxygen saturation (oximeter) of normal individuals. *Am J Appl Physiol* 149(2):277-291
24. Ernst E, Altmann CH, Saradeth T (1991) Exposure to moderate high altitude changes blood rheology. *Clin Hemorheol* 11:762
25. Ernsting J (1984) Mild hypoxia and the use of oxygen in flight. *Aviat Space Environ Med* 55(5):407-10
26. Ernsting J, Nicholson AN, Rainford DJ (1999) *Aviation Medicine*, 3<sup>rd</sup> ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, Auckland, Johannesburg, Melbourne, New Delhi p 8
27. Ernsting J, Sharp GR (1999) Hypoxia and hyperventilation. In: Ernsting J, Nicholson AN, Rainford DJ (ed) *Aviation Medicine*, 3<sup>rd</sup> edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, Auckland, Johannesburg, Melbourne, New Delhi
28. Flugmedizinisches Institut der Luftwaffe (1978) *Kompodium der Flugphysiologie*. Fürstenfeldbruck

29. Fowles RE, Hultgren HN (1983) Left ventricular function at high altitude examined by systolic time intervals and M-mode echocardiography. *Am J Cardiol* 52(7):862-866
30. Gemmill C (1947) The relationship between alveolar oxygen tension and arterial blood oxygen saturation in man during work at altitude. *Aviat Med* 10:483-494
31. Grant RG (2002) *Flight: 100 years of aviation*, DK, London, New York, München
32. Gustafsson C, Gennser M, Örnhagen H, Derefeld G (1997) Effects of normobaric hypoxic confinement on visual and motor performance. *Aviat Space Environ Med* 68:985-92
33. Harding RM (1999) The earth's atmosphere. In: Ernsting J, Nicholson AN, Rainford DJ (ed) *Aviation Medicine*, 3<sup>rd</sup> edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, Auckland, Johannesburg, Melbourne, New Delhi, pp 3-13
34. Harsch V (2003) *Das Institut für Luftfahrtmedizin in Hamburg-Eppendorf (1927-1945)*, 1. Aufl.; Rethra Verlag GbR, Neubrandenburg, S 1
35. Hartmann H (1936) Die Wirkung der Höhenanpassung auf das Verhalten von Puls und Muskelkraft bei Sauerstoffmangel. *Luftfahrtmed* 1:2-14
36. Heath D, Williams DR (1989) *High altitude medicine and pathology*, Butterworth, London
37. Henson M, Goldman DE, Catchpole HR, Vollmer EP, King BG, Whaley RV (1947) Arterial oxygen saturation at altitude. *Aviat Med* 4:149-157

38. Hinkelbein J, Genzwuerker HV, Finteis T, Fieldler F (2003) Minor error in measurement by pulse oximetry depending on the hematocrit level in intensive care patients. Oct 11-15; San Francisco, ASA Meeting
39. Hinkelbein J, Genzwuerker HV, Sogl R, Fieldler F (2007) Effect of nail polish on oxygen saturation determined by pulse oximetry in critically ill patients. *Resuscitation* 72(1):82-91
40. Hultgren HN (1989) High altitude medical problems, Scientific American, Washington
41. Humphreys S, Deyermond R, Bali I, Stevenson M, Free JHP (2005) The effect of high altitude commercial air travel on oxygen saturation. *Anaesthesia* 60(5):458-60
42. Kataria BK, Lampkins R (1986) Nail polish does not affect pulse oximeter saturation. *Anaesth Analg* 65(7):824
43. Kelly PT, Swanney MP, Frampton C, Seccombe LM, Peters MJ, Beckert LE (2006) Normobaric hypoxia inhalation test vs. response to airline flight in healthy passengers. *Aviat Space Environ Med* 77:1143-7
44. Kreth J (1996) Klimatisierung und Druckregelung in Verkehrsflugzeugen. In: Landgraf H, Rose DM, Aust PE (Hrsg) *Flugreisemedizin*. Blackwell, Berlin, Wien, S 57-75
45. Lufthansa German Airline Pilots School (1992) *Airplane Systems 2*, Bremen, S 96-135
46. Lufthansa Operation Manual Part B (OM-B) *Canadair Regional Jet* (2000) Air conditioning and Pressurization 12-2:1-45

47. Lomazzi F, Gurtner HP (1981) Höhengaufenthalt und Flugreisen bei Herzkranken. *Schweizer Med Wochenschr* 111:618-624
48. Low AJ, Chan DKY (2002) Air travel in older people. *Age Aging* 31:17-22
49. Macmillan AJF (1999) In: Ernsting J, Nicholson AN, Rainford DJ (ed) *Aviation Medicine*, 3<sup>rd</sup> edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, Auckland, Johannesburg, Melbourne, New Delhi, pp 112-126
50. McCarthy D, Corban R, Legg S, Faris J (1995) Effects of mild hypoxia on perceptual-motor performance: a signal-detection approach. *Ergonomics* 38(10):1979-1992.
51. McFarland RA (1971) Human factors in relation to the development of pressurized cabins. *Aerosp Med* 12:1303-1318
52. McFarland RA, Evans JN (1939) Alterations in dark adaption under reduced oxygen tensions. *Am J. Physiol* 127:37-50
53. Mortazavi A, Eisenberg MJ, Langleben D, Ernst P, Schiff RL (2003) Altitude-related hypoxia: risk assessment and management for passengers on commercial aircraft. *Aviat Space Environ Med* 74:922-7
54. Mountain R (1987) High altitude medical problems. *Clin Orthopaedics* 216:50-54
55. Muhm JM (2004) Predicted arterial oxygenation at commercial aircraft cabin altitudes. *Aviat Space Environ Med* 75:905-912
56. Muhm JM, Rock PB, McMullin DL, Jones SP, Lu IL, Eilers KD, Space DR, McMullen A (2007) Effect of aircraft-cabin altitude on passengers discomfort. *N Engl J Med* 357(1):18-27

57. NASA (2002) Historical Reference Collection. Apollo 1 Accident Review Board, NASA Headquarters, Washington D.C., <http://www.hq.nasa.gov>
58. Neuwirth F, Wiesholler M, Draeger J, Rumberger E, Welsch H (2003) Assessment of oxygen pressure in aircraft cabins on long haul flights correlated with resulting arterial oxygen saturation. Proceeding of the 74<sup>th</sup> AsMA annual scientific meeting; 2003 May 4-8; San Antonio, p 57
59. NOAA (2005) Layers of the Atmosphere, National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington D.C., <http://www.noaa.gov>
60. Papenfuß W (1990) Luftfahrtmedizin – Mit einer Einführung in die Raumfahrtmedizin. 1. Aufl 1990. Brandenburgisches Verlagshaus, Berlin
61. Paul MA, Fraser WD (1994) Performance during mild acute hypoxia. *Aviat Space Environ Med* 65(10 Pt 1):891-899
62. Qureshi A, Porter KM (2005) Emergencies in the air. *Emerg Med J* 22:658-9
63. Rose DM (1996) Luftveränderungen und ihre Auswirkungen auf den Menschen – Dysbarismus und Druckfallkrankheit. In: Landgraf H, Rose DM, Aust PE (Hrsg) *Flugreisemedizin*. Blackwell, Berlin, Wien, S 1-19
64. Rose HJ (1997) *Griechische Mythologie*, 9. Aufl.; München, Beck
65. Rudge FR (1990) A case of decompression sickness at 2347 m (8000 ft). *Aviat Space Environ Med* 61:1026-1027
66. Schmidt RF, Thews G, Lang F (2000) *Physiologie des Menschen*. Springer, Berlin Heidelberg New York
67. Severinghaus JW, Astrup PB (1986) History of blood gas analysis. VI. Oximetry. *J Clin Monit* 2:270-88

- 
68. Silbernagel S, Despopoulos A (1988) Taschenatlas der Physiologie, 3. Auflage, Thieme, Stuttgart
  69. Song SY (1986) Cerebral thrombosis at altitude: Its pathogenesis and the problems of prevention and therapy. *Aviat Space Environ Med* 1:71-76
  70. Spick M (2000) Milestones of manned flight. Salamander Books Ltd. London, p 89
  71. Strughold H, Ruff S (1957) Grundriss der Flugmedizin. Joh. Ambrosius Barth, München
  72. TFA Dostmann GmbH & Co. KG (2005) Gebrauchsanweisung, Kat. Nr. 31.1108, Wertheim-Reicholzheim
  73. Tomashefski JF, Shillito FH, Billings C, Ashe W (1964) Effects of moderate altitude on patients with pulmonary and cardiac impairment. *Calif Med* 101:358-362
  74. Vaernes RJ, Owe JO, Myking O (1984) Central nervous reactions to a 6.5-hour altitude exposure at 3048 meters. *Aviat Space Environ Med* 55(10):921-926
  75. Vicenzi MN, Gombotz H, Krenn H, Dorn C, Rehak P (2000) Transesophageal versus surface pulse oximetry in intensive care unit patients. *Crit Care Med* 28:2268-70
  76. Wagner JL, Ruskin JK (2007) Pulse oximetry: basic principles and applications in aerospace medicine. *Aviat Space Environ Med* 78(10):973-978
  77. Weibel ER, Knight BW (1964) A morphometric study on the thickness of the pulmonary air-blood barrier. *J. Cell Biol* 21:367-384

- 
78. Wikipedia (2007) Boac Flight 781  
[http://en.wikipedia.org/wiki/BOAC\\_Flight\\_781](http://en.wikipedia.org/wiki/BOAC_Flight_781)
79. Wirth D, Rumberger E (2002) Ausgewählte Physiologische Grundlagen der Flugmedizin. In: Draeger J, Kriebel J (Hrsg) Ecomed, Landsberg (Praktische Flugmedizin. S 33-95)
80. Yamaya Y, Bogaard HJ, Wagner PD, Niizeki K, Hopkins SR (2002) Validity of pulse oximetry during maximal exercise in normoxia, hypoxia and hyperoxia. *J Appl Physiol* 92(1):162-8

## 9. Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1	Erdatmosphäre [59]	S. 5
Abb. 3-2:	Erdatmosphäre vom Weltraum betrachtet [59]	S. 6
Abb. 3-3:	Chemische Struktur des Häm [66]	S. 16
Abb. 3-4:	Abhängigkeit der O <sub>2</sub> -Bindungskurve des Blutes von verschiedenen Parametern. A Temperaturabhängigkeit, B pH-Abhängigkeit (Bohr-Effekt), C Abhängigkeit vom CO <sub>2</sub> -Partialdruck, D Abhängigkeit von der intraerythrozytären Konzentration des 2,3-Diphosphoglyzerat [66]	S. 18
Abb. 3-5:	Darstellung der unterschiedlichen O <sub>2</sub> -Partialdrücke auf den verschiedenen Ebenen der Atmung [68].	S. 21
Abb. 3-6:	O <sub>2</sub> -Bindungskurve des Blutes [68]	S. 26
Abb. 3-7:	Höhenwirkungsschwellen [66]	S. 27
Abb. 3-8:	Wissenschaftler beinahe bewusstlos in 8333 m Höhe [17]	S. 29
Abb. 3-9:	Comet 1 DeHavilland D.H. 106 [78]	S. 30
Abb. 3-10:	Geborgene Wrackteile der G-ALYP [78]	S. 30
Abb. 3-11:	Ausgebranntes Cockpit der Apollo 1 [57]	S. 31
Abb. 3-12:	Schema des Gesamtsystems Druckregel-Klimaanlage [44]	S. 33

---

Abb. 3-13:	Schematischer Aufbau eines Kühlaggregats (Air Conditioning Pack) [44]	S. 34
Abb. 3-14:	Luftführung in der Passagierkabine [44]	S. 35
Abb. 3-15:	Standardflugprofil eines Langstreckenfluges: Flughöhe gegenüber Kabinendruckhöhe	S. 36
Abb. 3-16:	Cockpitinstrumente: Gegenüberstellung Flughöhe, Kabinendruckhöhe und $\Delta P$	S. 37
Abb. 4-1:	Protokoll des Langstreckenfluges München – Los Angeles am 20.04.2001 mit einem Jumbo-Jet	S. 39
Abb. 4-2:	Sauerstoffmessgerät [22]	S. 40
Abb. 4-3:	Blick in die Hauptkammer der Höhen-Klima-Simulationsanlage	S. 41
Abb.4-4:	Grafische Dokumentierung der pulsoxymetrischen Sauerstoffsättigung über dem Höhen-Zeit-Profil	S. 43
Abb.4-5:	Überwachungspult der HKS	S. 44
Abb. 4-6:	Monitore zur Überwachung der pulsoxymetrischen Sauerstoffsättigung	S. 45
Abb. 4-7:	Simuliertes Flugprofil von zivilen Luftfahrzeugen	S. 51
Abb. 4-8:	Simuliertes Flugprofil von zivilen und militärischen Luftfahrzeugen	S. 52

- 
- Abb. 4-9: Fingertemperatur, Sättigung, Höhenprofil im Verlauf der Untersuchung. Bei ↓ wurde Blut für die Blutgasanalyse (BGA) abgenommen. S. 53
- Abb. 5-1: Sauerstoffpartialdruck ( $P_{O_2}$ ) in 250 ft (weiße Dreiecke) und in 8000 ft (schwarze Dreiecke) gegenüber dem Alter. RF = Raucherin, RM = Raucher, RJM = Junger Raucher S. 55
- Abb. 5-2: Durchschnittlicher Sauerstoffpartialdruck ( $P_{O_2}$ ) der 40 bis 60-Jährigen auf Ortshöhe, 6000 ft, 8000 ft, 10 000 ft und 12 000 ft S.57
- Abb. 5-3: Pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung ( $SpO_2$ ) in 250 ft (weiße Kreise) und in 8000 ft (schwarze Kreise) gegenüber dem Alter S. 58
- Abb. 5-4: Pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung ( $SpO_2$ ) der Frauen (weiße Kreise) und der Männer (schwarze Kreise) gegenüber dem Alter in 8000 ft Druckhöhe S. 59
- Abb. 5-5: Korrelation: Pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung ( $SpO_2$ ) gegen Fingertemperatur in 250 ft S. 60
- Abb. 5-6: Korrelation: Pulsoxymetrische Sauerstoffsättigung ( $SpO_2$ ) gegen Hämatokrit in 6000 ft S. 61
- Abb. 5-7:  $CO_2$ -Partialdruck ( $P_{CO_2}$ ) in 250 ft (weiße Raute) und in 8000 ft (schwarze Raute) gegenüber dem Alter S. 62

## 10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1	Gaszusammensetzung der Atmosphäre [33]	S. 6
Tabelle 3-2:	ICAO (1964): Standardatmosphäre [26]	S. 7-9
Tabelle 3-3:	Inspiratorische, alveoläre und expiratorische Fraktionen bzw. Partialdrücke der Atemgase bei Ruheatmung in Meereshöhe [66]	S. 14
Tabelle 3-4:	Gegenüberstellung der Flugfläche und der Kabinendruckhöhe des Canadair Regional Jets [8]	S. 37
Tabelle 4-1:	Untersuchtes Kollektiv: Frauen	S. 49
Tabelle 4-2:	Untersuchtes Kollektiv: Männer	S. 50
Tabelle 5-1:	Frauen: wichtige Daten (z.B. Körpermaße, Fingertemperatur, Blut- und Sättigungswerte)	S. 63
Tabelle 5-2:	Männer: wichtige Daten (z.B. Körpermaße, Fingertemperatur, Blut- und Sättigungswerte)	S. 64

## 11. Danksagung

Ganz herzlich möchte ich Herrn Prof. Dr. J. Draeger für die Themenstellung, aktive Teilnahme und Hilfestellung bei der Durchführung des Projekts danken.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. E. Rumberger ganz herzlich für seinen unermüdlichen Beitrag bei den Auswertungen der Ergebnisse, Hilfe bei der Vorbereitung von Vorträgen und die fortwährenden Motivationsschübe bedanken.

Des weiteren möchte ich mich bei Herrn Dr. J. Beckröge, Herrn Dr. V. Jacoby und Herrn Dr. M. Wiesholler für die tatkräftige Unterstützung, der Vereinigung Cockpit für die Freistellung bei meinem Arbeitgeber, sowie bei allen anderen Teilnehmern der Untersuchung, insbesondere auch bei dem technischen und logistischen Personal des Flugmedizinischen Instituts der Luftwaffe in Königsbrück bedanken, besonders bei Herrn Oberstarzt Dr. H. Welsch, Herrn Oberfeldarzt Dr. U. Naschold und Herrn Oberstabsarzt Dr. M. Weise.

Herrn Flugkapitän A. Friederich und Herrn Erster Offizier J. Würfel herzlichen Dank für die seelische Unterstützung bei meinen Vorträgen. Frau D. Däubner, M.A., Frau R. Gerhardt, M.A, und Frau Dr. T. Moises vielen Dank für die Durchsicht meiner Arbeit.

Vielen Dank an Herrn Prof. Dr. E. Weibel, Anatomisches Institut der Universität Bern, für die Begleitung der Studie.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, Else und Hans Neuwirth, den Ehepaaren Schmid und Gorz, sowie meiner Freundin, Andrea Ritter, für die tatkräftige Unterstützung als Probanden.

Ohne die Mithilfe aller wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Nochmals ganz herzlichen Dank!

## 12. Lebenslauf

- Persönliche Daten:** Frank Ulrich Neuwirth  
Hoheluftchaussee 132  
20253 Hamburg  
geb. 28. September 1966, Gingen/Fils  
ledig  
Eltern: Hans Neuwirth, Freier Bildhauer  
Else Neuwirth, Stenokontoristin
- Schulbildung:** 1972-76 Grundschule Gingen  
1976-82 Realschule Süssen  
1982-85 Wirtschaftsgymnasium Geislingen/Steige
- Zivildienst:** 1985-87 Krankenwagenfahrer mit Ausbildung zum Rettungsdiensthelfer, Argenbühl
- Hochschulstudium:** 1987-96 Studium der Humanmedizin, Universität Ulm  
3. Staatsexamen 04/96, Note: gut  
1989-91 Englisch, 4 Semester, Humboldt-Studienzentrum, Ulm
- Famulaturen:**  
1991 British Columbia's Children's Hospital, Vancouver BC, Kanada  
1992 Allgemeinmedizinische Praxis, Oberaudorf  
1993 Allgemeinmedizinische Praxis, Ulm
- Ärztliche Tätigkeit:**  
10/94 - 02/95 Anästhesie, Klinik am Eichert, Göppingen  
02/95 - 06/95 Innere Medizin, Fylkessjukehuset på Nordfjordeid, Norwegen  
06/95 - 02/96 Chirurgie, Fylkessjukehuset på Nordfjordeid, Norwegen  
seit 2002 Mitarbeiter der AG Flugmedizin Vereinigung Cockpit e.V.

- Promotion:** seit Aug. 2002 bei Herrn Prof. Dr. J. Draeger, Hamburg
- Vorträge:**
- AsMA** ASSESSMENT OF OXYGEN PRESSURE IN AIRCRAFT  
Mai 2003, San Antonio CABINS ON LONG HAUL FLIGHTS CORRELATED WITH  
RESULTING ARTERIAL OXYGEN SATURATION
- DGLRM** UNTERSUCHUNG DES TATSÄCHLICH HERRSCHENDEN  
August 2003, Berlin SAUERSTOFFGEHALTS DER KABINENLUFT AUF LANG-  
STRECKENFLÜGEN  
ÜBERPRÜFUNG DER RESULTIERENDEN ARTERIELLEN  
SAUERSTOFFSPANNUNG IN UNTERDRUCKKAMMER-  
VERSUCHEN  
DISKUSSION BEOBACHTETER GESCHLECHTS-  
SPEZIFISCHER DIFFERENZEN
- ICASM** CORRELATION OF OXYGEN PRESSURE IN AIRCRAFT  
Oktober 2003, Madrid CABINS WITH RESULTING ARTERIAL OXYGEN SATURA-  
TION. POSSIBLE REASONS FOR GENDER DIFFERENCES
- Fliegerische Tätigkeit:**
- Nov. 1997-Jan. 2001 Lufthansa Flight Training: ATPL-Ausbildung
  - Seit Feb 2001 Verkehrsflugzeugführer bei Lufthansa CityLine
- Sonstiges:**
- Rhetorik/Gesprächsführung, Europäische Akademie, Otzenhausen 1993/96
  - Kursleiter für Rationelle Arbeitsmethoden, 1993-2000 Freier Mitarbeiter der Gesellschaft für Gedächtnis- und Kreativitätsförderung, Argenbühl
  - Norwegisch-Examen, Stufe 3, Universität Oslo 01/1995
- Sprachen:** Englisch fließend  
Norwegisch fließend  
Französisch Schulkenntnisse

Hamburg, 22. Februar 2008

### **13. Erklärung**

Eidesstattliche Versicherung:

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

F. Neuwirth