

12 Sauerstoffanlage

Oxygen, ATA 35

12.1 Definition

Die Einheiten und Komponenten, die Sauerstoff speichern, regulieren um damit die Passagier und die Crew zu versorgen. Beinhaltet Flaschen, Überdruckventile, Absperrventile, Abflussöffnung, Regler, Masken, tragbare Sauerstoffgeräte, etc. (ATA 100)

12.2 Der menschliche Sauerstoffbedarf

Die **menschliche Reaktion auf einen Mangel an Sauerstoff** hängt von der Flughöhe ab. Normalerweise wird den Menschen, die in Meereshöhe wohnen, der Mangel an Sauerstoff bei einer Höhe von 3048 m (10000 ft) bewusst. Über 10000 ft nimmt die Fähigkeit ab, ein Flugzeug adäquat zu führen. Bis in eine Höhe von 4267 m (14000 ft) ist der menschliche Körper allerdings noch (mehr oder weniger) in der Lage den verminderten Sauerstoffpartialdruck durch erhöhte Atemfrequenz zu kompensieren. Über 14000 ft jedoch ist diese Kompensation nicht mehr möglich und Symptome der *Höhenkrankheit* oder *Hypoxie* (hypoxia) wie z. B. Kopfschmerzen treten auf. Über 6096 m (20000 ft) sind Bewusstlosigkeit und der Tod nur eine Frage der Zeit. Wenn sich eine Person in einer Höhe von 9144 m (30000 ft) befindet, so kann Bewusstlosigkeit schon nach 1 Minute einsetzen. Bei 15240 m (50000 ft) kann Bewusstlosigkeit bereits nach 10 s einsetzen.

Um diese Effekte zu kompensieren kann der Sauerstoffpartialdruck¹ wieder erhöht werden durch **Atmung höherer Sauerstoffkonzentration**. Die Luft enthält 21 % Sauerstoff und der partielle Sauerstoffdruck in Meereshöhe beträgt

$$p_{O_2} = 0,21 p_{SL} = 0,21 \cdot 1013 \text{ hPa} = 212,7 \text{ hPa} = x(h) \cdot p(h) \quad .$$

Wenn der Partialdruck bei der Flughöhe h aufrechterhalten werden soll, so beträgt die geforderte Sauerstoffkonzentration x

$$x(h) = \frac{212,7 \text{ hPa}}{p(h)} \quad .$$

Wie aus Bild 12.1 abgelesen werden kann, wird 100 % (also reiner) Sauerstoff in einer Höhe von 37000 ft benötigt. Über 37000 ft müsste dem Piloten der Sauerstoff weiterhin mit einem

¹ Viele Fachausdrücke, die für das Sauerstoffsystem relevant sind, wurden im Abschnitt über die Klimaanlage definiert.

Druck von 212,7 hPa durch die Maske zugeführt werden. Die Lungen würden dann aber „aufgeblasen“ mit einem Druck, der höher ist als der Druck in der (nicht bedruckten) Kabine.

Ein plötzlicher **Druckabfall in einer Druckkabine** (decompression) in großer Flughöhe erfordert ein sofortiges Handeln der Crew. Passagiere und Crew müssen sofort mit Sauerstoff versorgt werden und ein Sturzflug oder Notabstieg (emergency decent) muss eingeleitet werden. Je tiefer das Flugzeug dabei kommt, desto länger ist die Überlebenszeit. Ein plötzlicher Druckabfall könnte seine Ursache z. B. in einem Loch in der Flugzeugstruktur haben. Die Umstände werden dadurch etwas erleichtert, dass sogar ein großes Loch in der Struktur *nicht* sofort dazu führt, dass in der Kabine der Außendruck herrscht. Es wird in der Regel etwas dauern, bis sich der Differenzdruck über die Leckstelle ausgeglichen hat.

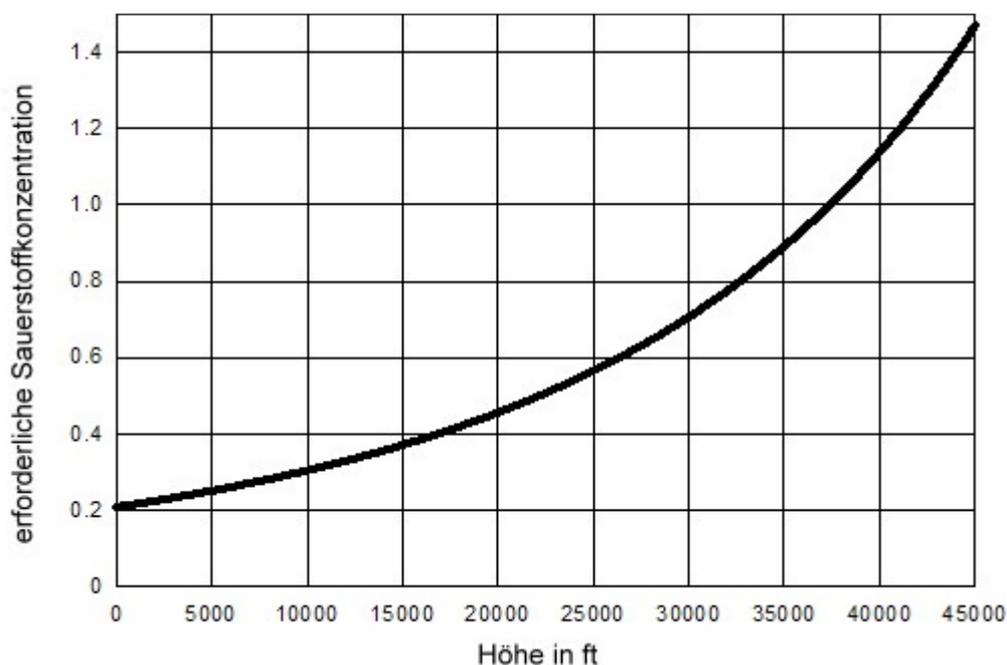


Bild 12.1 Erforderliche Sauerstoffkonzentration als Funktion der Flughöhe

Zulassungsvorschriften (CS 25.1447) verlangen für Transportflugzeuge (mit Druckkabinen) die Flughöhen über 30000 ft anstreben den Einbau einer Sauerstoffanlage, die sich selbständig aktiviert, wenn die Kabinenhöhe den Wert von 15000 ft übersteigt.

12.3 Gliederung

Eine Gliederung der Sauerstoffanlagen könnte nach verschiedenen Aspekten vorgenommen werden. Die folgende Gliederung hebt auf folgende Fakten ab:

- Gründe für die Sauerstoffversorgung,
- Art der Sauerstoffausrüstung (fest eingebaut oder tragbar),
- Art der Atemregler (vgl. 12.4),

- Art der Masken (vgl. 12.5),
- Art der Sauerstoffquelle (vgl. 12.6),
- Gruppe der Personen, die mit Sauerstoff versorgt werden:
 - Sauerstoffanlage für *Passagier*,
 - Sauerstoffanlage für die *Besatzung*.

Eine **Sauerstoffversorgung** kann **aus verschiedenen Gründen** notwendig sein. Bei Flügen in großen Höhen in Flugzeugen ohne Druckkabine wird eine normale Sauerstoffversorgung (*normal oxygen*) benötigt, die Teil des normalen Flugbetriebs ist. Falls es dabei zu einem Ausfall der normalen Sauerstoffversorgung kommen sollte, so muss auch eine Notfallsauerstoffversorgung (*emergency oxygen*) vorhanden sein. Auch in Druckkabinen, für die es im Normalfall nicht erforderlich wäre, eine Sauerstoffversorgung bereitzustellen, müssen alle Passagiere und Besatzungsmitglieder im Falle eines Druckabfalls in der Kabine (decompression) mit Sauerstoff (*emergency oxygen*) versorgt werden. Nach einem Notabstieg ist über diesen Sauerstoffbedarf hinaus noch weiterer Sauerstoff erforderlich, um das Leben für eine begrenzte Anzahl weiterer Passagiere aufrecht zu erhalten (*sustenance oxygen*). Vorkehrungen sind auch für die Nutzung von Sauerstoff bei Erste-Hilfe-Maßnahmen (*first aid oxygen*) zu treffen. Zusätzlich wird Sauerstoff benötigt (*supplemental oxygen*), um einzelne Fluggäste vor den Nebenwirkungen durch übermäßige Kabinenhöhe zu schützen und um allgemein akzeptable physiologische Zustände aufrecht zu erhalten. **(CS-1)**

Unterschieden wird **feste und tragbare Sauerstoffausrüstung**. *Feste Ausrüstung* ist in solchen Flugzeugen vorhanden, wo Sauerstoff häufig gebraucht wird und viele Passagiere den Sauerstoff benötigen. *Zusätzliche tragbare Ausrüstung* wird von der Besatzung verwendet, wenn sie sich damit im Flugzeug unter verschiedenen Bedingungen bewegen muss. Tragbare Sauerstoffausrüstung wird z. B. bei der Bekämpfung kleiner Kabinenfeuer genutzt. Tragbare Sauerstoffausrüstung wird auch bei Erster Hilfe verwendet. Kleine Flugzeuge, die weder eine Druckkabine noch eine fest installierte Sauerstoffanlage haben, können eine tragbare Sauerstoffausrüstung an Bord nehmen, wenn ein Flug in großer Höhe geplant ist.

Sauerstoff von einer Flasche zu nehmen, die einen konstanten Durchfluss über eine Schlauchverbindung direkt zum Mund liefert, ist technisch der einfachste Weg Sauerstoff zu atmen. Obwohl das historisch die erste angewandte Methode war, hat es offensichtlich verschiedene Nachteile:

- a) Sauerstoff würde beim Ausatmen verschwendet werden.
- b) Es gibt keine Notwendigkeit 100 % reinen Sauerstoff in geringen Höhen zu atmen.
- c) Es wäre nötig den Schlauch zu halten.
- d) Das Sprechen mit einem Schlauch im Mund wird behindert.
- e) In einer giftigen Umgebung (Rauch) fehlt der Gesichtsschutz.

Um die Nachteile a) und b) zu überwinden, wurden verschiedene **Atemreglern** (vgl. 12.4) entwickelt. Die Probleme c), d), und e) werden durch die unterschiedliche Ausführung der **Masken** gelöst (vgl. 12.5).

12.4 Atemregler

Ein **Continuous-flow System** liefert eine gleichmäßige Sauerstoffzufuhr zu den Masken. Um den zufließenden Sauerstoff während des Ausatmens nicht zu verschwenden, ist ein flexibles Reservoir (reservoir bag) aus Plastik oder Gummi zwischen Maske und Zugangsleitung eingebaut. Das Reservoir sammelt den kontinuierlich fließenden Sauerstoff, der Nutzer atmet dann aus diesem Vorrat. Das Reservoir kann je nach Bauweise zwischen 0,5 l und 1,0 l Sauerstoff aufnehmen. Drei Rückschlagventile (check valve) sind in ein Continuous-flow System eingebaut.

Der Vorgang beim **Ausatmen**: Ein Ventil (*exhalation valve*) in der Maske öffnet die Maske zur Umgebungsluft. Zur gleichen Zeit schließt ein weiteres Rückschlagventil (*reservoir valve*), so dass die verbrauchte Luft nicht in das Reservoir mit dem Sauerstoff gelangen kann.

Der Vorgang beim **Einatmen**: Während des ersten Teils des Einatmens öffnet sich das Rückschlagventil zum Reservoir. Dabei wird das Reservoir möglicherweise vollständig entleert. Wenn das Reservoir leer ist und weiter eingeatmet wird, dann öffnet sich das Mischventil (*dilution valve*) und mischt Umgebungsluft zu dem bereits eingeatmeten Sauerstoff aus dem Reservoir hinzu.

Ein **Nachteil** des Continuous-flow System ist die Unfähigkeit sich auf verschiedene Stufen der physikalischen Aktivität des Piloten oder der Flughöhe einzustellen. Die Stärke des Sauerstoffstroms (z. B. aus einer Sauerstoffflasche) könnte bereits einfach über ein Ventil manuell eingestellt werden. Ein *Constant-flow Regulator* kann die Sauerstoffzufuhr immerhin abhängig von der Flughöhe automatisch einstellen. Ob verschiedene Einstellungen überhaupt möglich sind, hängt natürlich auch davon ab, ob die Sauerstoffquelle verschiedene Zuflussraten erlaubt. Das ist nicht immer gegeben. Gerade die chemischen Sauerstofferzeuger, wie sie überwiegend in Passagierflugzeugen verwendet werden, erlauben keine Variation des Volumenstroms des Sauerstoffs.

Ein **Demand System** liefert den Sauerstoff nur bei Bedarf, das heißt beim Einatmen. Dadurch wird beim Ausatmen gar kein Sauerstoff von der Quelle entnommen. Das System erfordert einen Atemregler (*demand oxygen regulator*) für jeden Benutzer. Der Regler kann in einer Konsole im Cockpit oder am Sitz eingebaut sein oder auch am Mann getragen werden. Der Regler regelt ein Auslassventil, das auf Druckschwankungen reagiert. Beim Einatmen reicht

der geringste negative Differenzdruck in der Maske gegenüber dem Kabinendruck, um ein Ventil zu öffnen und damit die Sauerstoffzufuhr zur Maske zu starten. Am Ende der Phase des Einatmens wird der Differenzdruck positiv und das Ventil stoppt die Zufuhr von Sauerstoff. Die Masken müssen eng sitzen. Falls die Sauerstoffmaske zu viel Umgebungsluft durchlassen würde, könnte sich kein negativer Differenzdruck aufbauen und es würde dann auch kein Sauerstoff fließen.

Ein **Pressure-demand System** ist ein *Überdrucksystem*, das Sauerstoff auch bei positivem Differenzdruck zur Maske fördert. Dies wird in der Praxis wichtig bei Flughöhen über 10668 m (35000 ft). Wie oben bereits ausgeführt wurde, muss der Druck in der Maske dann höher sein als der Druck in der (nicht bedruckten) Kabine. Trotz des Einatmens kommt es dann nicht zu einem negativen Differenzdruck. Dieser Umstand wird von diesem speziellen Atemregler berücksichtigt. Weiterhin muss eine *Überdruckmaske* genutzt werden, die den positiven Differenzdruck halten kann.

Das **Diluter-demand System** ist ein System, welches das Luft-Sauerstoff-Verhältnis abhängig von der Flughöhe regelt. Der Zweck des Atemreglers ist, Sauerstoff zu sparen und den sicheren Partialdruck dabei noch aufrechtzuerhalten. Das System kann in der Praxis bis zu einer Flughöhe von 9754 m (32000 ft) verwendet werden. Ab dieser Höhe wird die Öffnung zur Umgebungsluft durch den Atemregler automatisch geschlossen, so dass 100% Sauerstoff geliefert werden.

Eine **konkrete Ausführung eines Atemreglers** ist in (Bild 12.2) gezeigt. Es handelt sich um ein *Diluter-demand System*. Neben einem Versorgungsschalter (supply lever, SUPPLY On/Off) gibt es einen Sauerstoffauswahlschalter (oxygen selection lever, OXYGEN 100 % / Normal) mit dem in jeder Höhe (also auch schon unter 35000 ft) 100 % Sauerstoff geatmet werden kann. Einige Modelle bieten auch einen Notfallschalter (emergency lever, EMERGENCY On/Off). Durch ihn wird ein geringer Überdruck von etwa 4 hPa in der Maske aufgebaut. Der Pilot ist dadurch vor giftigen Gasen geschützt, weil Sauerstoff tendenziell aus der Maske ausströmt, aber keine kontaminierte Kabinenluft in die Maske einströmen kann.

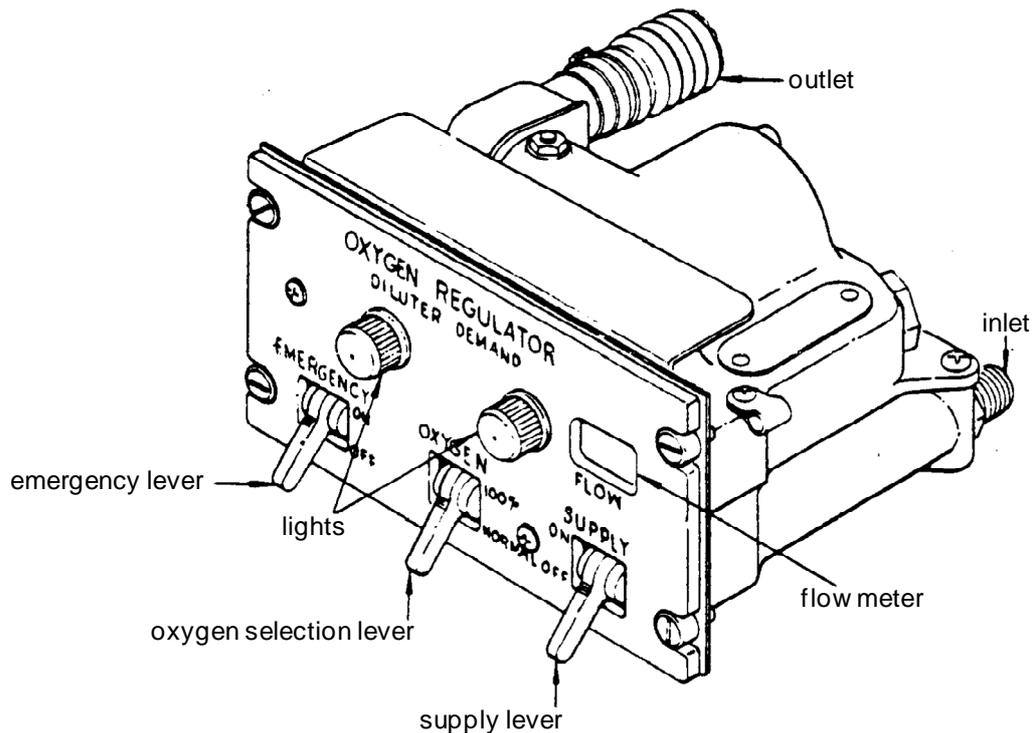


Bild 12.2 Atemregler zum Einbau in eine Konsole im Cockpit (Beispiel: VFW 614)

12.5 Masken

Es existieren verschiedene Sauerstoffmasken. Folgende Typen können unterschieden werden:

- Die **Nasenmaske** (nasal mask) passt eng anliegend um die Nase und wird für Flüge unter 4877 m (16000 ft) eingesetzt, wo die Luftaufnahme durch den Mund noch akzeptabel ist.
- Die **Halbmaske** (oronasal mask) sitzt komplett über dem Mund und der Nase. Vorkehrungen wurden für den Einbau von Mikrofonen zum Zweck der Kommunikation getroffen.
- Die **Vollmaske** (full-face mask) bedeckt den Mund, die Nase und die Augen. Die Vollmaske kann als Atemschutzmaske (protective breathing equipment) eingesetzt werden. Die Maske kann aber nicht mit Überdrucksystemen (für Flüge ohne Druckkabine über 35000 ft) verwendet werden, weil die Augen keinem höheren Überdruck ausgesetzt werden sollten. Ein geringer Überdruck zum Schutz vor giftigen Gasen ist aber möglich.
- Eine **Schutzbrille kombiniert mit einer Halbmaske** ermöglicht sowohl den Atemschutz wie bei einer Atemschutzmaske als auch die Kombination mit einem Überdrucksystem.

Wenn eine Zertifizierung von Transportflugzeugen für einen Flugbetrieb über 25000 ft angestrebt wird, so muss für jedes Besatzungsmitglied eine **schnell aufsetzbare Sauerstoffmaske** (quick-donning mask) (Bild 12.4) an Bord vorhanden sein. Die entsprechenden Halbmasken

sind so konstruiert, dass sie innerhalb von 5 s aufgesetzt werden können (CS 25.1447). Das schnelle Aufsetzen wird durch aufblasbare elastische Gurte an der Maske ermöglicht. Wenn der Pilot einen Knopf an der Maske drückt, werden die elastischen Gurte durch einströmenden Sauerstoff aufgeblasen und gestreckt. Die Maske kann in diesem Zustand schnell und einfach aufgesetzt werden. Wird der Knopf an der Maske wieder los gelassen, strömt der Sauerstoff wieder aus den Gurten heraus. Dies bewirkt, dass die Gurte sich wieder zusammen ziehen und die Maske jetzt eng am Kopf sitzt.

Eine **Rauchschutzhaube** (smoke hood) schützt den Kopf und Teile des Körpers. Sie wird benutzt um kleine Kabinenfeuer zu bekämpfen und beinhaltet auch eine Sauerstoffversorgung für den Träger. Üblich sind dafür chemische Sauerstoffgeneratoren.

12.6 Sauerstoff-Quellen

Sauerstoffversorgung kann über *gasförmiger Sauerstoff*, *flüssiger Sauerstoff*, *chemischer Sauerstoff* und aus einer *On-Board Oxygen Generation* (OBOG) erfolgen.

Gasförmiger Sauerstoff (gaseous oxygen) wird im Flugzeug in speziellen Sauerstoffflaschen gespeichert. US-Sauerstoffflaschen sind grün und dürfen nur mit Sauerstoff für die Anwendung in der Luftfahrt befüllt werden. Der Fülldruck beträgt 12,8 MPa (1850 psi). An der Sauerstoffflasche sind ein Volumenstromregler mit Druckminderer und ein Manometer installiert. Die Flaschen werden nach den Regeln des Department of Transportation (DOT) zugelassen. Sie müssen regelmäßig kontrolliert werden und haben eine maximale vorgegebene Lebensdauer. Beim Umgang mit den Sauerstoffflaschen müssen besondere Sicherheitsvorkehrungen eingehalten werden, weil eine generelle Gefahr von solchen Druckbehältern ausgeht und ein Risiko bei der Handhabung von Sauerstoff besteht. Die Cockpitbesatzung wird in der Regel mit Sauerstoff aus Flaschen versorgt. Die Versorgung ist zuverlässig und kann (abhängig von der Flaschengröße) eine lange Zeit andauern.

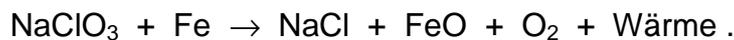
Flüssiger Sauerstoff (liquid oxygen, LOX) hat in Meereshöhe (1013 hPa) einen Siedepunkt von -183 °C . Der höchste Siedepunkt liegt bei -118 °C und 5,07 MPa. Folglich muss flüssiger Sauerstoff immer eine Temperatur unter -118 °C haben. Wenn der Flüssigsauerstoff Wärme aufnimmt bildet sich gasförmiger Sauerstoff. Dieser Vorgang wird Abdampfen (boil-off) genannt. Der Druck im Sauerstoffbehälter steigt. Ab einem bestimmten Druck muss Gas abgelassen werden (venting). Behältern müssen gut isoliert sein, um die Verluste durch das Abdampfen gering zu halten. Spezielle Ausrüstung ist an Bord gefordert, um den flüssigen Sauerstoff gezielt in gasförmigen Sauerstoff umzuwandeln. Flüssigsauerstoffanlagen im Flugzeug können Gewicht und Einbauraum sparen im Vergleich zu einer vergleichbaren Anlage mit gasförmigem Sauerstoff. Das Abdampfen verursacht jedoch einen Verlust von bis zu 5 % in 24 Stunden und so benötigt man einen regelmäßigen Wiederauffüllservice für die Flüssigsau-

erstoffbehälter. Aus diesem Grund werden Flüssigsauerstoffanlagen eher für Kampfflugzeuge verwendet und scheinen für Zivilflugzeuge unpraktisch zu sein.

Chemischer Sauerstoff wird im Flugzeug aus Natriumchlorat gewonnen. Wenn Natriumchlorat auf 478 °C erhitzt wird reagiert es zu Salz und Sauerstoff.



Wärme wird durch eine Art "Brennstoff" erzeugt. Allgemein verwendet man Eisen als Brennstoff.



Das Gesamtmassengleichgewicht von beiden Gleichungen kombiniert ergibt, dass aus 100 % Natriumchlorat 45% Sauerstoff entstehen. 38 % steht zur Atmung zur Verfügung und 7 % werden für die Oxidation des Eisens benötigt.

Ein *chemischer Sauerstoffgenerator* ist in Bild 12.3 gezeigt. Der Natriumchlorat Kern ist in der Mitte des Sauerstoffgenerators angeordnet und wird von einer Isolierung und einem Stahlgehäuse umschlossen. Trotzdem erreicht der Generator außen eine Temperatur von bis zu 260 °C, so dass angrenzende Flugzeugkomponenten vor der Generatorwärme geschützt werden müssen. Die chemische Reaktion ist selbst erhaltend und kann mechanisch (in den meisten Flugzeugen durch Ziehen einer Schnur) oder elektrisch (Lockheed L-1011) mit einem entsprechenden Gerät am Generator gestartet werden. Ein Auslassfilter im Generator hält Partikel und gasförmige Fremdstoffe zurück. Die chemische Reaktion kann nicht mehr gestoppt werden, wenn sie einmal im Gang gesetzt wurde. Im Fall, dass der Auslass verstopft sein sollte, verhindert ein Überdruckventil eine Explosion des Generators. Der Sauerstoff kühlt schnell ab und erreicht die Umgebungstemperatur bereits wenn der Sauerstoff in die Maske strömt.

Zur *Auslegung des chemischen Generators* muss dessen Durchmesser und Länge festgelegt werden. Der Durchmesser des Sauerstoffgenerators bestimmt den Volumenstrom, die Länge des Sauerstoffgenerators bestimmt die Versorgungsdauer. Die Sauerstoffgeneratoren sind für eine Versorgungsdauer von ca. 15 Minuten konzipiert. Diese Zeit ergibt sich aus der Zeit für einen Notabstieg zusammen mit den Zulassungsforderungen. Der zu erzielende Volumenstrom aus dem Generator ist definiert durch die Anzahl der Masken, die gleichzeitig versorgt werden sollen (1, 2, 3 oder 4). Der Volumenstrom sinkt während der Versorgungsdauer ab. Die meisten Passagierflugzeuge nutzen chemische Sauerstoffgeneratoren für die Versorgung der Passagiere, weil dies Gewichts- und Wartungsvorteile hat.

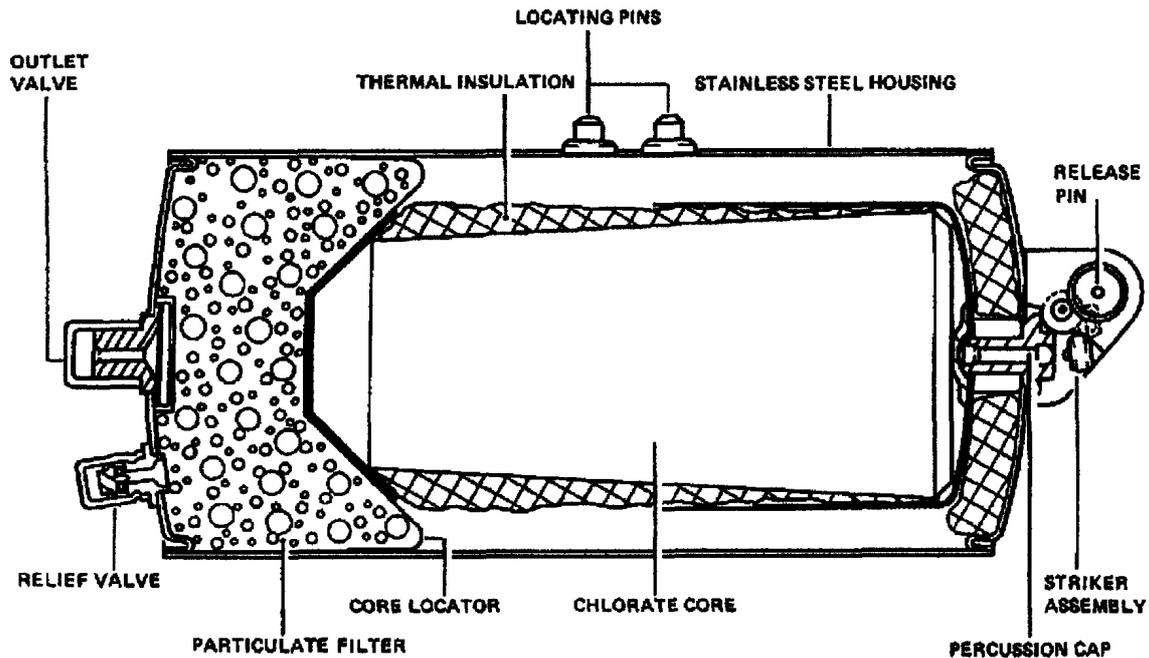


Bild 12.3 Chemischer Sauerstoffgenerator (Beispiel: Airbus A321)

On-Board Oxygen Generation Systems (OBOGS) ermöglichen die Erzeugung von Sauerstoff während des Fluges. Dazu wird Umgebungsluft und/oder Zapfluft (bleed air) und elektrische Leistung benötigt. Es gibt verschiedene Techniken für On-Board Oxygen Generation (OBOG). Molekularsiebe werden genutzt um die Sauerstoffkonzentration in der Luft zu erhöhen. OBOG ermöglicht praktisch unbegrenzte Versorgungszeiten. Dadurch kann eine Sauerstoffversorgung im Flug nicht nur für einen Notabstieg gewährleistet werden, sondern auch für andere Fehlerfälle und resultierende Flugbedingungen wie z. B. einen Flug mit Umgebungsdruck über 10000 ft. OBOGS werden nicht nur bei Militärflugzeugen eingesetzt, sondern zunehmend auch bei modernen Transport- und Passagierflugzeugen.

12.7 Beispiel: Airbus A321

Das Flugzeug hat drei verschiedene Sauerstoffsysteme:

- das Sauerstoffsystem für die Cockpitbesatzung,
- das Sauerstoffsystem für die Passagiere,
- das tragbare Sauerstoffsystem.

Das **Sauerstoffsystem für die Cockpitbesatzung** versorgt die Piloten mit Sauerstoff, wenn es zu einem plötzlichen Druckabfall in der Kabine kommt. Es liefert auch Sauerstoff, wenn es Rauch oder gefährliche Gase im Cockpit auftreten. In der Nähe von jedem Sitz im Cockpit ist eine schnell aufsetzbare Sauerstoffmaske (quick-donning mask) mit Atemregler unterge-

bracht. Der Sauerstoff wird von den Sauerstoffflaschen bis zur Maske über einen Druckminderer und Verteilungsleitungen geliefert.

Das **Sauerstoffsystem für die Passagiere** stellt Sauerstoff für Notfälle (*emergency oxygen*) für die Passagiere und die Flugbegleiter bereit. Behälter (*emergency passenger oxygen container*) mit jeweils einem Sauerstoffgenerator und den zugehörigen Sauerstoffmasken jede mit einem flexiblen Versorgungsschlauch sind installiert:

- über den Sitzen der Passagiere,
- in den Toiletten,
- bei den Flugbegleiterstationen,
- im Arbeitsbereich der Küchen.

Das **tragbare Sauerstoffsystem** (*portable oxygen equipment*) enthält Komponenten für die Piloten und die Flugbegleiter. Für die **Cockpitbesatzung** (*cockpit crew*) stehen Atemschutzmasken (*smoke mask*) mit Sauerstoffflasche bereit. Für die **Flugbegleiter** (*cabin attendants*) sind in der Kabine Sauerstoffflaschen und chemische Sauerstoffgeneratoren mit Maske sowie Rauchschutzhauben (*smoke hood*) mit chemischem Sauerstoffgenerator verstaut.

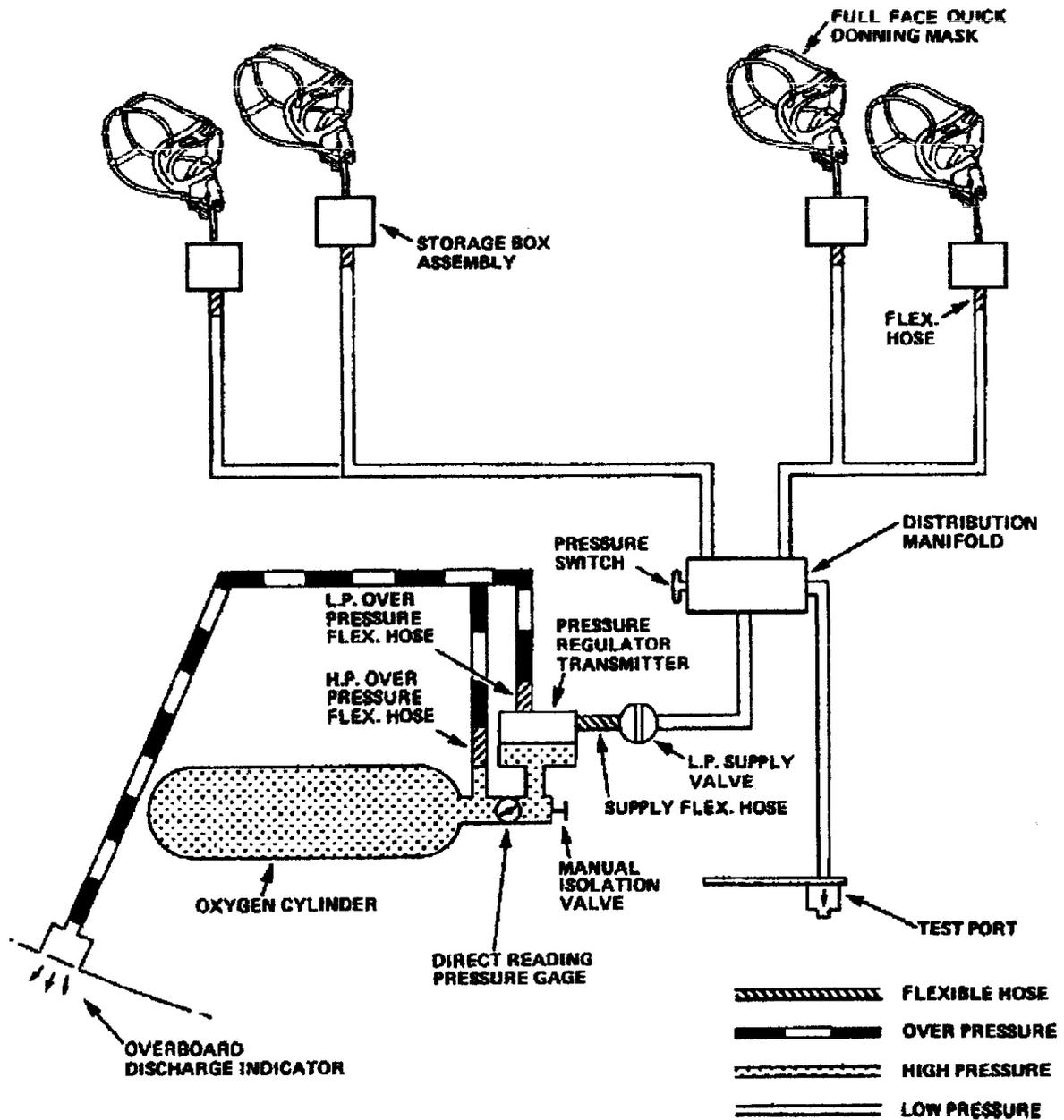
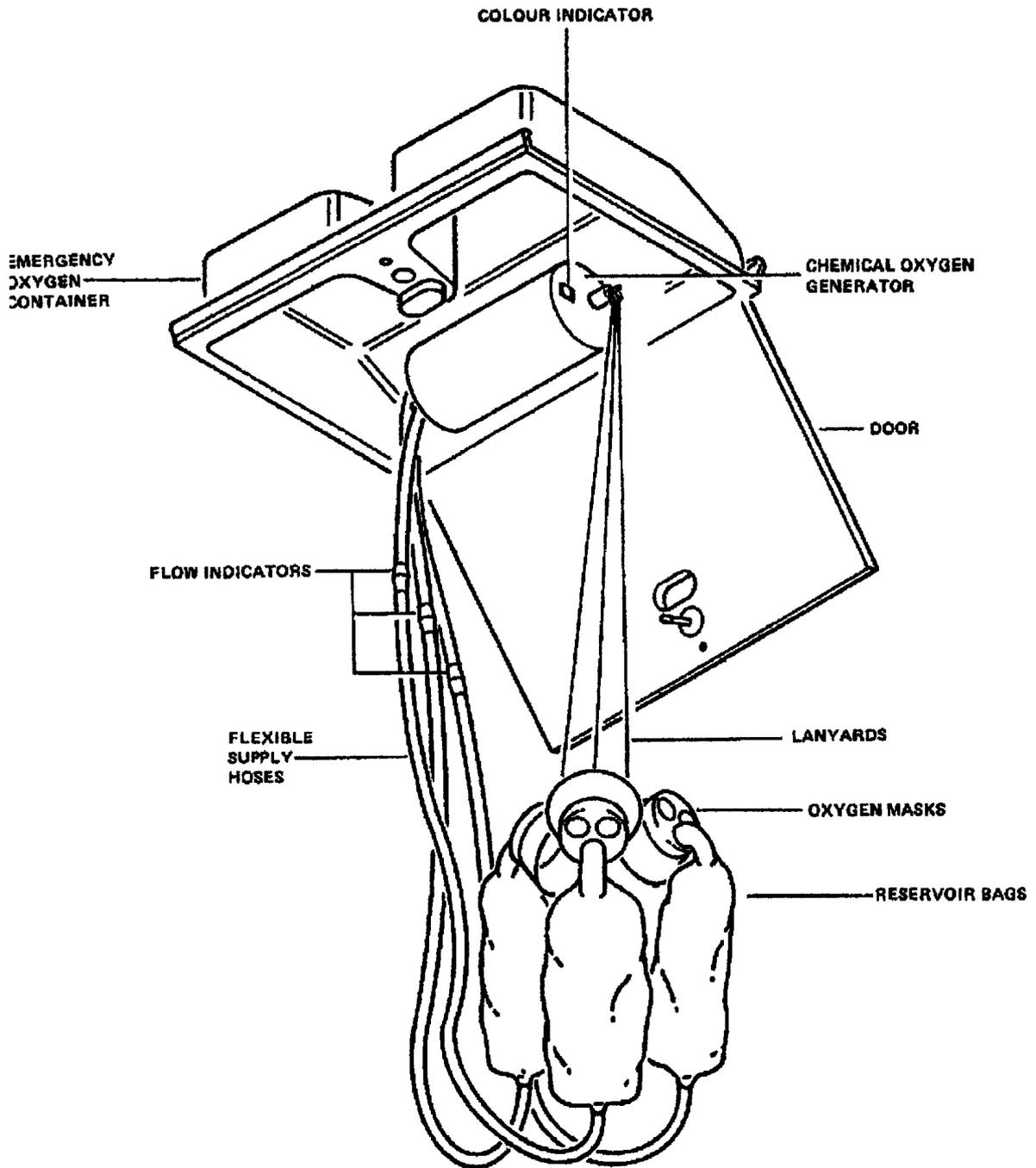


Bild 12.4 A321 Sauerstoffsystm für die Cockpitbesatzung



NOTE: 3 MASK CONTAINER SHOWN

Bild 12.5 A321 Sauerstoffsystm für die Passagiere