

Physiologische Randbedingungen für die Auslegung von Flugzeugkabinen

J. Wenzel
DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin,
Linder Höhe, D-51147 Köln

1. Einführung

Die Atmosphäre der Erde bietet nur auf Meeresniveau und auch nicht in allen geografischen Lagen akzeptable Lebensbedingungen für den Menschen. Schon ab einer Höhe von 1000 – 1500 Meter über NN werden die ersten Einschränkungen der Leistungsfähigkeit erkennbar: Obwohl die Zusammensetzung der Atmosphäre gleich bleibt - sie enthält ca. 21% des für den Menschen lebenswichtigen Sauerstoffs – sinkt dessen Partialdruck mit abnehmendem atmosphärischen Druck ab, der Organismus wird nicht mehr ausreichend mit Sauerstoff versorgt. In den heute üblichen Reiseflughöhen von 40000 ft und mehr für den kommerziellen Passagiertransport wird der Druck so gering, dass ein Überleben des Menschen ohne besondere technische Hilfsmittel nicht möglich ist; bei Lösung des Problems mittels einer bedruckten Flugzeugkabine muss auch das durch die Insassen produzierte Kohlendioxid berücksichtigt werden. Neben dem äußeren Druck nimmt mit steigender Höhe auch die Temperatur kontinuierlich ab, sodass in Reiseflughöhe arktische Außentemperaturen herrschen, mit der Notwendigkeit, die Kabine entsprechend zu heizen; auch die Luftfeuchte muss in die zu regelnden Parameter einbezogen werden. Für Notfälle müssen Alternativsysteme vorgesehen werden.

2. Kabinenatmosphäre

Eine primäre Anforderung an die Flugzeugkabine besteht also in der Bereitstellung von geeigneten klimatischen Verhältnissen hinsichtlich Druck, Temperatur und Gaszusammensetzung; je größer die geforderte Ähnlichkeit zur (optimalen) natürlichen Umgebung des Menschen, desto höher der technische Aufwand. Bei der üblichen Auslegung der Kabine als offenes System steht zwar in unbegrenzter Menge Frischluft aus der umgebenden Atmosphäre zur Verfügung, aufgrund der äußeren Bedingungen kommt es aber zum Konflikt zwischen einzelnen klimatischen Parametern.

Unter heute gültigen Bestimmungen wird ein Kabinendruck entsprechend 8000 ft als ausreichend für eine zufriedenstellende Sauerstoffversorgung angesehen. Zwar werden einzelne Komponenten des mentalen Instrumentariums in diesem Bereich schon nachweisbar beeinträchtigt – dies ist natürlich besonders für die Cockpit-Crew von Bedeutung - , dennoch machen sich spürbare Beeinträchtigungen beim Gesunden nur unter stärkerer körperlicher Belastung bemerkbar. Einige Autoren weisen allerdings darauf hin, dass die heutige Passagier-Population einen nicht unerheblichen Anteil von älteren Menschen mit vorbestehenden Erkrankungen des Atem- und Kreislaufsystems aufweist, sodass hier schon innerhalb der Richtwerte mit Sauerstoffmangel-Problemen gerechnet werden muss.

Durch den Stoffwechsel des Menschen wird Sauerstoff aufgenommen und hauptsächlich Kohlendioxid als Abbauprodukt ausgeschieden, sodass in geschlossenen Systemen ohne Intervention allmählich der Sauerstoffgehalt sinken und der Kohlendioxidgehalt zunehmen würde. Noch bevor allerdings ein dadurch möglicher Sauerstoffmangel zum Tragen kommen könnte, würde der Anstieg des toxischen Kohlendioxids in der Atmosphäre zu schweren Ausfallerscheinungen führen.

Unter natürlichen Lebensbedingungen wird das Kohlendioxid von der photosynthetisch aktiven grünen Pflanzenwelt aufgenommen und wieder zu Sauerstoff umgewandelt. In Bauwerken wird durch genügend Frischluftzufuhr die Kohlendioxidkonzentration in erträglichen Grenzen gehalten.

Im Bereich der Arbeitsmedizin gilt ein Wert von 5000 ppm als unbedenklich, er darf pro Arbeitsschicht für dreimal eine Stunde auf 10000 ppm ansteigen. Da die Toxizität des Kohlendioxids durch den Partialdruck bestimmt wird, kann man diese Grenzwerte auch umgebungsdruckunabhängig als 5 bzw. 10 hPa ausdrücken. Über den engen arbeitsmedizinischen Kontext hinaus (5x8h pro Woche) haben sich 5 hPa als allgemein akzeptierter Grenzwert auch für den Dauer- und Langzeit-Aufenthalt des Menschen in geschlossenen Systemen etabliert (U-Boote, Tauchkammern, Raumfahrzeuge etc.). Über diese Nominalgrenzen hinaus werden im Raumfahrtbereich auch höhere Grenzwerte im Falle von Funktionseinschränkungen der Atemgasaufbereitung genannt (teilweise bis ca. 30 hPa), um Handlungs- und Überlebens-Perspektiven in Notfällen einschätzen zu können.

In geschlossenen (druckfesten) Systemen ist im Vergleich zur üblichen Gebäudetechnik auch die vollständige Durchlüftung des gesamten Innenraums problematisch; während in normalen Gebäuden durch die Vielzahl von Luftaustauschöffnungen eine praktisch laminare Gasführung gewährleistet ist, kommt es durch die technischen Beschränkungen für die Führung von Lüftungskanälen in begrenztem Raum bei vielfältigen Hindernissen häufig zu Inhomogenitäten in Form sogenannter "CO₂-Nester", denen man nur durch extrem hohe Spülleistungen beikommen kann.

In der Gebäudetechnik wird mit deutlich niedrigeren Grenzwerten als 5000 ppm operiert, bei der Möglichkeit der Spülung mit praktisch unbegrenzten Frischluftreserven wird häufig ein Grenzwert von 1000 ppm als sinnvoll angesehen. Hierbei ist die Kohlendioxid-Konzentration wohl eher als Indikator für eine genügende Umwälzleistung der Klimaanlage zu sehen, durch die nicht nur das Kohlendioxid in den Räumen verdünnt wird, sondern auch die Ausdünstungen der Insassen (und des Bauwerks?)

Bei Aufbereitung der Atmosphäre der Flugzeugkabine durch Spülung mit Frischluft ist zu berücksichtigen, dass der Wasseranteil der äußeren Atmosphäre wegen der extrem niedrigen Temperaturen in Reiseflughöhe praktisch gleich Null ist. Bei hinreichender Ausspülung des Kohlendioxids wird gleichzeitig der Wasseranteil der Kabinenatmosphäre so weit abgesenkt, dass gesundheitliche Beeinträchtigungen der Passagiere auftreten können; typische Messwerte liegen bei relativen Feuchten von 5 – 15 % auf Langstreckenflügen. Im allgemeinen wird in geheizten Räumen eine relative Luftfeuchtigkeit von 40 – 45 % als angenehm empfunden, bei sehr viel niedrigeren Wasserdampfkonzentrationen kommt es zu Irritationen des Atemsystems. Neben Einhaltung von Druck, Temperatur, Sauerstoff- und Kohlendioxidgrenzen ist also auch die relative Feuchte der Atmosphäre ein wichtiger Parameter zum Wohlbefinden des Menschen.

Ein weiterer Faktor zum Wohlbefinden der Passagiere ist ein ausreichendes Platzangebot sowohl in Form von genügend Beinfreiheit am gebuchten Sitzplatz, aber auch die Möglichkeit, sich innerhalb des Flugzeugs zu bewegen, um insbesondere auf Langstreckenflügen die Nachteile und Gefahren länger dauernder Immobilisation zu vermeiden. Die Diskussion der letzten Monate um das "Economy-Class-Syndrom" hat deutlich gemacht, dass hier ein gewisser Nachholbedarf bei der Unterbringung der Passagiere besteht.

3. Plötzlicher Druckverlust in großen Höhen

Alle bisher diskutierten Gesichtspunkte zur Bereitstellung einer klimatisch angenehmen Kabinenatmosphäre werden gegenstandslos, wenn es zum Integritätsverlust der Druckkabine kommt, sei es durch Strukturschwäche, innere oder äußere Gewalteinwirkung oder Versagen der Kontrollvorrichtungen. Durch den mehr oder weniger schnell erfolgenden Druckabfall kommt es primär zum Sauerstoffmangel der Insassen, zusätzlich muss bei sehr schnellem Druckabfall auch die Möglichkeit der Lungenverletzung beachtet werden, sowie die Problematik der Druckfallkrankheit, wenn eine schnellstmögliche Rückkehr zu annähernd normalen Druckverhältnissen nicht gegeben ist.

Am wichtigsten ist demnach die sofortige Versorgung der Flugzeuginsassen mit Notsauerstoff, im Falle der Cockpit-Crew mittels atmegesteuerter, druckbeaufschlagter Demand-Systeme aus einem Hochdruck-Vorrat, für Passagiere und Cabin-Crew mittels Constant-Flow-Einheiten, häufig ausgelegt in Form von autonomen chemischen Generatoren für einzelne Sitzgruppen. Daneben ist auch die Bevorratung des Sauerstoffs in tiefkalter flüssiger Form möglich, insbesondere bei sehr hohem Bedarf, oder die Anreicherung aus der Umgebungsluft durch On-Board-Oxygen-Generierung (OBOG) mittels Membran-Verfahren. Die beiden letzten Verfahren kommen insbesondere in militärischen Fluggeräten zum Einsatz, OBOG gilt als Stand der Technik, sobald in der Bedarfsanalyse der Platz- und Gewichtsbedarf der OBOG-Ausrüstung deutlich unterhalb des Aufwands für mitgeführte Sauerstoffreserven liegt.

Im kommerziellen Luftverkehr ist diese Konstellation normalerweise nicht gegeben, da in allen geografischen Lokationen (Hochgebirge!) in weniger als 30 min nach Druckverlust eine Rückkehr zu erträglichen Aussendrücken möglich ist. Allerdings ist in diesen Höhen der Treibstoffeinsatz sehr ineffektiv, sodass insbesondere für Grossflugzeuge bei Abwägung von erforderlichen Flugstrecken zur nächsten Ausweichlandebahn und dem Gewicht des erforderlichen Reservetreibstoffs auch der protrahierte Einsatz von Sauerstoff auf angehobener Flughöhe erwogen werden kann. Hierbei ist allerdings die Gefahr der Dekompressionskrankheit zu berücksichtigen, deren Symptome bei längerem Aufenthalt schon ab 13000 Fuß auftreten können.

Neben den diskutierten Gesichtspunkten für den Notbetrieb der Flugzeugkabine bei Verlust der Druckintegrität ist auch das Verhalten von Struktur und Rückhaltesystemen im Crash wichtig. Die Notfallvorkehrungen müssen neben der "Papier-Plausibilität" auch diversen Zulassungstests aus der Notfall-Praxis genügen.

4. Schlussfolgerungen

Alle bisher genannten "nur" funktionalen Aspekte der Flugzeugkabine – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – sind nicht ausreichend für den kommerziellen Erfolg eines Flugzeuges. Der Passagier stellt vor allem auf Langstreckenflügen immer höhere Ansprüche an den Komfort des Luftfahrzeugs – was in aller Regel einen Verlust an "Packungsdichte" und damit Transporteffizienz aus Sicht des Operators bedeutet. Für die Zukunft wird die Lösung dieser scheinbar unvereinbaren Widersprüche eine entscheidende Voraussetzung für den Erfolg einer Konstruktion bedeuten – nur möglich unter Einbeziehung aller denkbaren Ausgangsbedingungen und gegebenenfalls Verlassen von traditionellen Ansätzen.