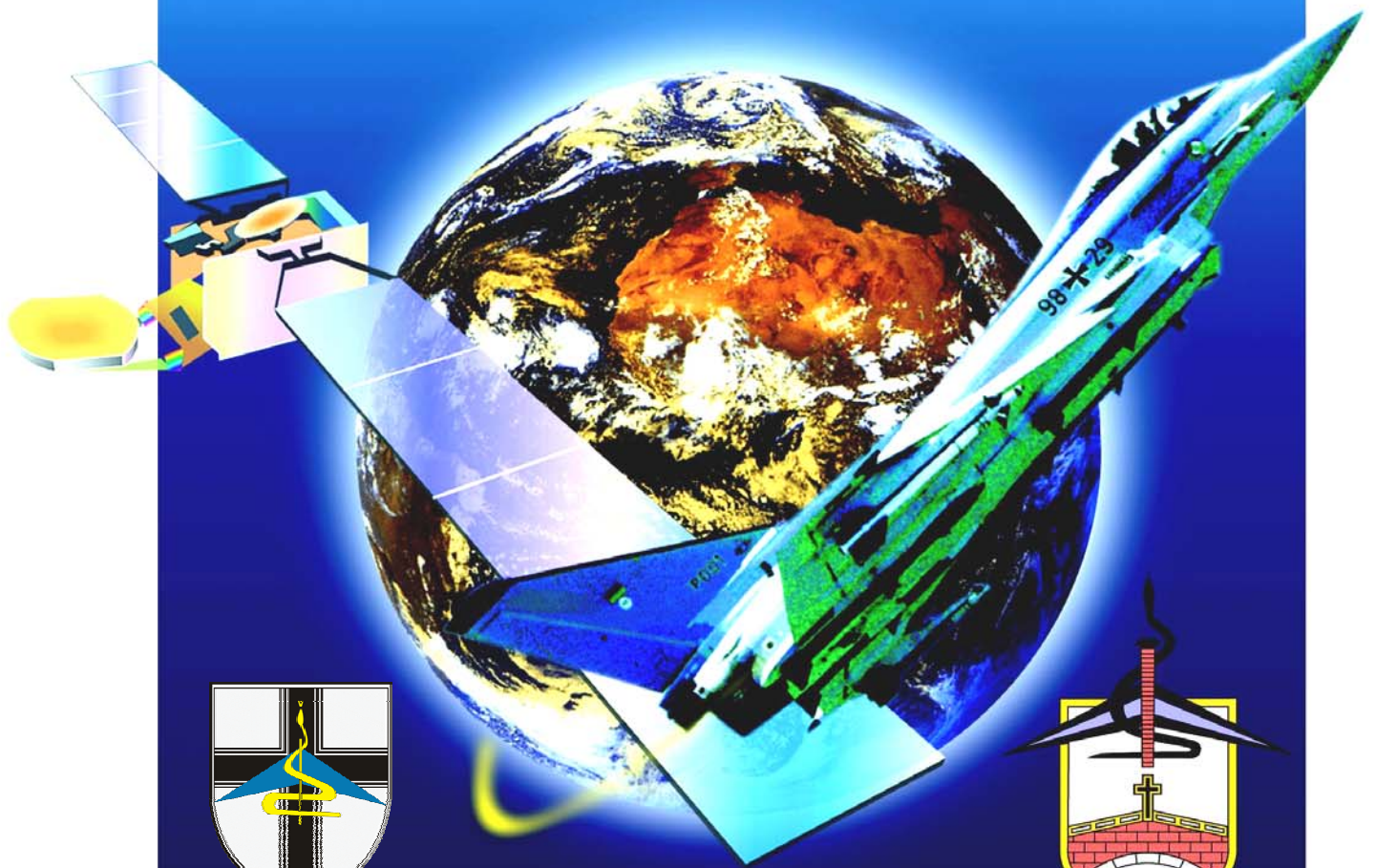


KOMPENDIUM DER FLUGMEDIZIN



Herausgeber: OTA Dr. Pongratz



**GENERALARZT DER LUFTWAFFE
FLUGMEDIZINISCHES INSTITUT DER LUFTWAFFE**

ISBN 3-00-016306-9

Vorwort

Generalarzt Dr. med. Erich Rödиг Generalarzt der Luftwaffe

Mit dem nunmehr vorliegenden

„Kompendium der Flugmedizin“



stellt sich eine deutsche Publikation unseres Fachgebietes vor, welches – wie kein anderes – durch interdisziplinäre An- und Herausforderungen und entsprechendes Denken und Handeln geprägt ist.

Die Flugmedizin verbindet zahlreiche präventive, diagnostische und therapeutische Teilgebiete zu einem Gebiet, der **Luft- und Raumfahrtmedizin**, die ihren Anspruch aus den psychophysischen Einwirkungen auf den menschlichen Körper im dreidimensionalen Raum ableitet. Begriffe, wie flugmedizinische Begutachtung, Flugphysiologie, Flugunfallmedizin, Lufttransport Verwundeter und Kranker, Human Factors, werden der heutigen Bedeutung der Luft- und Raumfahrtmedizin jedoch längst nicht mehr gerecht. Alle klinischen Fächer, einschließlich der Physiologie, haben ihren Anteil am Verständnis des komplexen Fachgebietes Luft- und Raumfahrtmedizin. Zeitkritisches Erkennen, Entscheiden und folgerichtiges Handeln prägen das Bild des Flugmediziners. Als „Generalist“ mit speziellen Fähigkeiten deckt er die flugmedizinischen Kernforderungen aller

Fachgebiete gleichmäßig ab. Darüber hinaus wachsen an ihn die unterschiedlichsten Anforderungen, die die Luft- und Raumfahrt an einen Flugmediziner stellt. Hierzu gehört auch Notfallmedizinische Kompetenz.

In diesem Sinne haben sich die Autoren bemüht, eine Publikation unter Berücksichtigung aller relevanten flugmedizinischen, flugphysiologischen und organisatorischen Gesichtspunkte zu erarbeiten, in dem der interdisziplinäre Charakter der Luft- und Raumfahrtmedizin klar zum Ausdruck kommt.

Darüber hinaus erhielt die Flugpsychologie den angemessenen Raum, um im Verbund „Human Factors“ – „Situational Awareness“ – „Stress Management“ die psychologische Ergonomie im „Mensch-Maschine-System“ darzustellen und zu bewerten.

Wir hoffen, den Ansprüchen auf praxisrelevante und wissenschaftlich orientierte Information gerecht zu werden und allen Kollegen in der Luft- und Raumfahrtmedizin motivierendes Engagement für ihre verantwortungsvolle Arbeit zu vermitteln.

Dr. Erich Rödиг
Generalarzt

Leiter des Flugmedizinischen Instituts der Luftwaffe



Das vorliegende Kompendium vermittelt in vorbildlicher Weise einen fundierten Einblick in das Gebiet der Flugmedizin.

Neben der in Jahrzehnten gewachsenen Erfahrung aus Untersuchung und wo nötig Behandlung von fliegendem Personal wird auf die immer spezialisierteren Erkenntnisse aus Psychologie, Ergonomie und Flugphysiologie eingegangen, wie sie in die Weiter- und Neuentwicklung immer komplexerer Luftfahrzeuge einfließen und gleichzeitig die Voraussetzung für eine effiziente Auswahl und Ausbildung der fliegenden Besatzungen darstellen.

Das aufgrund internationaler Verpflichtungen erweiterte Einsatzspektrum der militärischen Luftfahrt erfordert eine ständige Weiterentwicklung flugmedizinischer Erkenntnisse im Austausch mit militärischen und zivilen Institutionen und Organisationen im In- und Ausland.

Hier nicht nur wissenschaftlich an vorderster Front mitzuarbeiten, sondern dies im vorliegenden Werk anschaulich darzustellen, ist den Autoren in dankenswerter Weise gelungen.

Dr. Klaus Kimmich
Oberstarzt

Herausgeber



Das erste „Kompendium der Flugphysiologie“ wurde 1972 von dem damaligen Leiter der Abteilung II (Ausbildung) des Flugmedizinischen Instituts der Luftwaffe und späteren Institutsleiter Herrn Generalarzt Dr. Garbe geschrieben und von tausenden Lehrgangsteilnehmern als wertvolle Hilfe für das Erlernen der wichtigsten Grundlagen der Flugphysiologie benutzt. Oberstarzt Dr. Amendt überarbeitete die Lernhilfe und reihte zahlreiche neue Kapitel in seiner Ausgabe von 1988 ein. Es folgte eine zweite und dritte Auflage und 1997 konnte aufgrund von personellen Engpässen, die sich schwieriger als erwartet gestalteten, nur eine Schwarz - Weiß Ausgabe vom derzeitigen Herausgeber gedruckt werden. Die jetzige Ausgabe unter dem Titel

„Kompendium der Flugmedizin“ baut auf ihren Vorgängern auf und wurde von den aufgeführten Mitarbeitern des Flugmedizinischen Instituts der Luftwaffe analog zu den durchgeführten Unterrichten im Hörsaal Flugmedizin überarbeitet und z. T. neu gestaltet.

Nach wie vor steht das Motto des Flugmedizinischen Instituts der Luftwaffe „volanti subvenimus“ (dem Fliegenden dienen), im Vordergrund. Gedankt sei an dieser Stelle allen, die trotz ihrer täglichen Belastung an der Überarbeitung und Verbesserung der jetzt vorliegenden Ausgabe mitgewirkt haben.

Dr. Hans Pongratz
Oberstarzt, Ltr Abt. III

Juni 2002

Zur verbesserten und ergänzten Neuauflage danke ich allen Mitwirkenden.

Dr. Hans Pongratz

Oberstarzt, StvGenArzt und LtrFachAbt I, Luft- und Raumfahrtmedizin
Nachdruck

November 2004
April 2006

Definition der Flugmedizin

Die Flugmedizin verbindet zahlreiche präventive, diagnostische und therapeutische Teilgebiete zu einem Gebiet, der Luft- und Raumfahrtmedizin, die ihren Anspruch aus den psychologischen Einwirkungen auf den menschlichen Körper im dreidimensionalen Raum ableitet. Sie lässt sich in vier Hauptgebiete unterteilen:

- Festlegen von Tauglichkeitskriterien und deren flugmedizinische Handhabung für das fliegende Personal,
- Bewertung und Beurteilung der Flugreise-Tauglichkeit von Passagieren unter besonderer Berücksichtigung der Flugsicherheit,
- Qualifizierter Lufttransport Verwundeter und Kranker nach flugmedizinischen Grundsätzen,
- Wissenschaftliche Forschung auf dem Gebiet der Luft- und Raumfahrtmedizin (Human Factor, Ergonomie, Schnittstelle im Mensch-Maschine-System, Beschleunigungsphysiologie usw.)

E. Rödiger

Aus: Notfallmedizin, Herausgeber: G. Hempelmann, C. Krier, J. Schulte am Esch
Thieme-Verlag 1999

Die Flugmedizin ist eine angewandte Wissenschaft, die die experimentelle Physiologie, die Biodynamik, die Psychologie, die Neurowissenschaften und das wissenschaftliche Studium der speziellen Sinne umfasst.

Aus: J. Ernsting et al. Aviation Medicine

Die Flugmedizin ist das Spezialgebiet der Medizin, das sich mit der Erfassung und Erhaltung der Gesundheit, Sicherheit und Leistungsfähigkeit derer befasst, die sowohl in der Luft als auch im Weltraum fliegen.

Aus: DeHart Fundamentals of Aerospace Medicine

Institutsleiter und Abteilungsleiter des Flugmedizinischen Instituts der Luftwaffe

Institutsleiter:

1959 – 1963	Generalarzt Dr. Greiling
1963 – 1970	Generalarzt Prof. Dr. Lauschner
1970 – 1972	Generalarzt Dr. Kohler
1972 – 1977	Generaloberstabsarzt Dr. Grunhofer
1977 – 1981	Generalarzt Dr. Garbe
1981 – 1989	Generalarzt Prof. Dr. Burchard
1989 – 1997	Generalarzt Dr. Daumann
1997 – 2001	Generalarzt Dr. Andexer
2001 – 2002	Generalarzt Dr. Rödiger
2002 –	Oberstarzt Dr. Kimmich

Leiter Abteilung I:

1959 – 1963	Oberfeldarzt Dr. Diegmann
1963 – 1969	Generalarzt Dr. Ebeling
1969 – 1972	Generaloberstabsarzt Dr. Grunhofer
1972 – 1976	Oberstarzt Dr. Schirrmann
1976 – 1980	Generalarzt Dr. Nissen
1980 – 1981	Generalarzt Prof. Dr. Burchard
1981 – 1985	Oberstarzt Dr. Fischer
1985 – 1997	Generalarzt Dr. Andexer
1997 – 2003	Oberstarzt Dr. Glaser
2003 –	Oberstarzt Dr. Marwinski

Leiter Abteilung II:

1959 – 1961	Dr. Kornhaas
1961 – 1963	Generalarzt Dr. Ebeling
1963 – 1968	Oberstarzt Dr. Kohler
1968 – 1969	Oberstarzt Dr. Potten
1969 – 1977	Oberstarzt Dr. Garbe
1977 – 1981	Oberstarzt Dr. Mitaschk
1981 – 1991	Oberstarzt Dr. Amendt
1991	Oberfeldarzt Dr. Frank, (M.d.W.d.G.b.)
1991 – 1994	Oberstarzt Dr. Amendt

Außenstelle für Flugmedizin der 5. Luftwaffendivision in Königsbrück von 1990 bis 1994. Seit 1994 Abteilung II des Flugmedizinischen Instituts der Luftwaffe.

Von 1990 bis 1993 Leiter: Oberstarzt Dr. Ullrich

Leiter der Unterstützungsgruppe

01.10.1990 bis Februar 1991: Oberstarzt Dr. Pongratz

Februar 1991 – September 1991: Oberfeldarzt Knüppel

Oktober 1991 – 1993: Oberstarzt Dr. Philipp

Oktober 1993 bis 1994 Leiter der Außenstelle Flugmedizin: Oberstarzt Dr. Welsch

Seit 1994 Ltr. Abt. II in Königsbrück: Oberstarzt Dr. Welsch

Leiter Abteilung III:

1959 – 1972	Oberstarzt Prof. Dr. Kirchhoff
1972 – 1978	Oberstarzt Prof. Dr. Ulbrecht
1978 – 1979	Generalarzt Prof. Dr. Burchard
1979 – 1984	Oberstarzt Dr. Gerlach
1984 – 1986	Oberstarzt Dr. Philipp
1986 – 1992	Oberstarzt PD Dr. Langhoff
1992 – 1993	Generalarzt Dr. Andexer (M.d.W.d.G.b.)
1993 – 1994	Oberstarzt Dr. Brandl (M.d.W.d.G.b.)
1994 – 2002	Oberstarzt Dr. Pongratz
2002 –	Oberstarzt Dr. Glaser

Leiter Abteilung IV:

1964 – 1968	Oberstarzt Dr. Potten
1968 – 1969	Oberstarzt Dr. Schirrmann
1969 – 1978	Oberstarzt Dr. Potten
1978 – 1982	Oberstarzt Dr. Becker
1982 – 1986	Oberstarzt PD Dr. Langhoff
1986 – 1994	Oberstarzt Dr. Pongratz
1994 – 2003	Oberstarzt Dr. Knöfel
2003 –	Oberstarzt Hanschke

Leiter Abteilung V:

1964 – 1976	Oberstarzt Prof. Dr. Krefft
1976 – 1989	Oberstarzt Dr. Beckmann
1989 – 1990	Oberfeldarzt Dr. Steinbach (komm. Abt.Ltr.)
1990 –	LMD Dr. Krämer

Leiter Abteilung VI:

1980 – 1987	LRD Dr. Gerbert
1987 – 1996	LRD Falckenberg
1997 – 2001	LRD Dr. Hansen
2001 –	LRD Weber

Seit 01.10.03 wurden die Abteilungen in der neuen STAN wie folgt gegliedert:

- Abt. Forschung/Wissenschaft und Lehre Luft- und Raumfahrtmedizin	StvLtrFIMedInstLw und AbtLtr Oberstarzt Dr. Glaser
- Abt. Klinische Flugmedizin	AbtLtr Oberstarzt Dr. Marwinski
- Abt. Rechtsmedizin und Flugunfallmedizin	LMDir Dr. Krämer
- Abt. Flugpsychologie	LRDir Weber
- Abt. Ergonomie	AbtLtr Oberstarzt Hanschke
- Abt. Flugphysiologie	AbtLtr Oberstarzt Dr. Welsch

Autoren des Kompendiums der Flugmedizin

Kapitel / Titel	Autor der Urversion	Endfassung durch
1. PHYSIK DER ATMOSPHERE	Hptm a.D. H. Köhler	RD a.D. Dr. H. Vitz, sowie Beiträge von LRD a.D. Ungewitter SWehrGeoPhys
2. ATMUNG UND BLUTKREISLAUF	OTA a.D. Dr. R. Amendt	OFA G. Dörfler
3. SAUERSTOFFMANGEL (HYPOXIE)	OSA J. Kacirek	OFA Dörfler, OSA Dr. Ring, RD Dr. Vitz
4. SAUERSTOFFSYSTEME UND DRUCKKABINEN	OTL a.D. R. Althoff	OTA Dr. H. Pongratz, Hptm Meyer, MatALw
5. AUSWIRKUNGEN VON LUFTDRUCK-VERÄNDERUNGEN	Hptm a.D. H. Köhler	OFA Dörfler, OFA Dr. Brix, OFA Hannig, RD Dr. Vitz, OTA Dr. Pongratz
6. BESCHLEUNIGUNGEN UND IHRE WIRKUNGEN	OFA d.R. Dr. W. Wurster	OFA Dörfler, RD Dr. Vitz, Lt Thymian, OTA Dr. Welsch
7. RETTUNGSSYSTEME	OTL K.-J. Innecken	OTL K.-J. Innecken
8. OPHTHALMOLOGIE	OTA a.D. Dr. R. Amendt	OSA Dr. Knebel und SA (w) Dr. W. Wolff
9. RÄUMLICHE ORIENTIERUNG / DESORIENTIERUNG	OTL R. Althoff und Hptm R. Heinrich	OFA Dr. B. Brix
10. LUFTKRANKHEIT	OFA Dr. P. Frank	OFA Dr. B. Brix
11. VIBRATION	OFA Dr. P. Frank und OTA Dr. W. Neye	BOR G. Kroh und Ang. H. Vaic
12. HNO – LÄRM	OFA Dr. P. Frank und OTA Dr. W. Neye	OTA Hanschke und OSA Dr. C. Drost
13. WÄRMEHAUSHALT UND DIE AUSWIRKUNGEN EXTREMER TEMPERATUREN	OSA Dr. H. Osterberg	OTA Dr. H. Pongratz, OSA PD Dr. C. Ledderhos
14. BIOLOGISCHE RHYTHMEN, ZEITVERSCHIEBUNG UND ERMÜDUNG	ORR Dr. A. Rieck und OTA Dr. H. Pongratz	OTA Dr. Pongratz und OSA PD Dr. C. Ledderhos
15. GESUNDHEITLICHE RISIKOFAKTOREN UND DEREN VERMEIDUNG	OFA M. Hannig	OFA M. Hannig und OFA Dr. Hartmann
16. BELASTUNG, BEANSPRUCHUNG, STRESS, STRESSOREN	ORR Dipl.-Psych. H.-P. Görres	LRD Dr. D. Hansen und ORR Willkomm
17. KURZER ABRISS DER FLUGPSYCHOLOGIE	LRD a.D. Dr. K. Gerbert	LRD a.D. Dr. K. Gerbert; LRD Dr. D. Hansen und LRD Weber

Kapitel / Titel	Autor	Endfassung durch
18. NEUROLOGISCHE UND PSYCHIATRISCHE ASPEKTE DER FLUGMEDIZIN		OFA Dr. F. Weber und SA Dr. J. Metrikat
19. DIE WICHTIGSTEN FLUGZEUGMUSTER DER BUNDESWEHR	OTL K.-J. Innecken	OSA Dr. John, OTL N. Feck, MatALw, OF Bodenstein
20. WISSENSWERTES AUS DER (MILITÄR) – FLIEGEREI	Hptm R. Heinrich	OFA Dr. B. Brix
21. AEROMEDICAL EVACUATION		GA Dr. E. Rödiger und OFA M. Hannig
22. TROPENMEDIZIN		OFA Dr. M. Albrecht
23. ORTHOPÄDIE		OFA Dipl.-Med. T. Pippig

Dank allen Mitarbeitern der Abteilung III, die mit der Überarbeitung befasst waren. Lt Bolten und OF Bodenstein gilt besonderer Dank für das Zusammenfügen, die Gestaltung und das Layout. Für die ständige Mithilfe auch Dank dem Leiter und der gesamten Belegschaft der LMW.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort Generalarzt der Luftwaffe	I-1
Vorwort Leiter FIMedInstLw	I-2
Vorwort Herausgeber	I-2
Definition Flugmedizin	I-3
Institutsleiter und Abteilungsleiter des FIMedInstLw	II-5
Autoren des Kompendiums der Flugmedizin	III-7
Gliederung des Kompendiums der Flugmedizin	IV-9
1	PHYSIK DER ATMOSPHÄRE..... 1-21
1.1	Die Atmosphäre..... 1-21
1.1.1	Die Zusammensetzung der Atmosphäre..... 1-21
1.1.2	Die Struktur der Atmosphäre..... 1-21
1.1.2.1	Die Troposphäre..... 1-23
1.1.2.2	Die Stratosphäre..... 1-24
1.1.2.3	Die Mesosphäre..... 1-24
1.1.2.4	Die Thermosphäre..... 1-24
1.1.2.5	Die Exosphäre..... 1-24
1.1.2.6	Die Magnetosphäre..... 1-25
1.2	Der Luftdruck (Barometrischer Druck)..... 1-26
1.3	Das Gasgesetz..... 1-29
1.3.1	Gesetz von BOYLE-MARIOTTE..... 1-29
1.3.2	Gesetz von CHARLES..... 1-30
1.3.3	Gesetz von DALTON..... 1-31
1.3.4	Gesetz von HENRY..... 1-31
1.4	Höhenmessung..... 1-32
1.4.1	Die Druckhöhe (Pressure Altitude)..... 1-32
1.4.2	Die Höhe über Grund (AGL)..... 1-32
1.4.3	Die wahre (tatsächliche) Höhe (True Altitude) (MSL)..... 1-32
1.5	Die solare Einstrahlung..... 1-34
1.5.1	Sonnenstrahlung..... 1-34
1.5.2	Ultraviolette (UV)-Strahlung..... 1-35
1.6	Medizinische Aspekte im erdnahen und erdfernen Raum..... 1-35

1.7	Verwendete und weiterführende Literatur.....	1-36
2	ATMUNG UND BLUTKREISLAUF.....	2-37
2.1	Einführung.....	2-37
2.2	Atmungsorgane und Atemwege.....	2-37
2.2.1	Atemmechanik.....	2-38
2.2.2	Regelung der Atmung.....	2-39
2.2.3	Gaswechselgrößen.....	2-40
2.2.4	Die Zusammensetzung der Atemluft.....	2-41
2.2.5	Funktionskette Atmung und Kreislauf, Gasaustausch und Difusionsgefälle	2-42
2.2.6	Hyperventilation.....	2-44
2.3	Der Blutkreislauf.....	2-46
2.3.1	Aufgaben des Blutkreislaufs.....	2-46
2.3.2	Das Blut.....	2-46
2.3.3	Das Hämoglobin.....	2-46
2.3.4	Herz und Gefäßsystem.....	2-48
2.4	Verwendete und weiterführende Literatur.....	2-50
3	SAUERSTOFFMANGEL (HYPOXIE).....	3-51
3.1	Hypoxische Hypoxie.....	3-51
3.1.1	Die Stadien der hypoxischen Hypoxie.....	3-51
3.1.2	O ₂ -Partialdrucke.....	3-53
3.1.3	Diffusionsgefälle und Höhe.....	3-54
3.2	Hypämische Hypoxie.....	3-55
3.3	Stagnierende Hypoxie.....	3-56
3.4	Histotoxische Hypoxie.....	3-56
3.5	Sauerstoffmangel – tabellarische Zusammenfassung.....	3-57
3.6	Symptomatik der O₂-Mangelkrankheit.....	3-57
3.7	Selbstrettungszeit.....	3-59
3.8	Sauerstoffatmung.....	3-60
3.9	O₂-Toxizität.....	3-62
3.10	Verwendete und weiterführende Literatur.....	3-62

4	SAUERSTOFFSYSTEME UND DRUCKKABINEN.....	4-63
4.1	Sauerstoffversorgungssysteme.....	4-63
4.1.1	Allgemeines.....	4-63
4.1.2	Typischer Aufbau eines Sauerstoffsystems.....	4-63
4.1.3	Arbeitsweise der O ₂ -Anlage.....	4-64
4.1.4	Die Atemmaske MBU-5/P.....	4-66
4.2	Kabinendrucksysteme.....	4-67
4.2.1	Druckkabinen.....	4-67
4.2.2	Besonderheiten von Druckkabinen.....	4-68
4.2.3	Rapide Dekompression.....	4-70
4.3	Verwendete und weiterführende Literatur.....	4-72
5	AUSWIRKUNGEN VON LUFTDRUCKÄNDERUNGEN.....	5-73
5.1	Auswirkungen nach dem Gasgesetz von.....	5-74
	BOYLE-MARIOTTE	
5.1.1	Mittelohr.....	5-74
5.1.2	Nasennebenhöhlen.....	5-75
5.1.3	Zähne.....	5-76
5.1.4	Magen-Darm-Trakt.....	5-76
5.1.5	Lunge.....	5-77
5.2	Auswirkungen nach dem Gasgesetz von HENRY.....	5-78
5.2.1	Die Druckfallkrankheit.....	5-78
5.2.1.1	Symptome der Druckfallkrankheit.....	5-80
5.3	Druckkammern mit gesicherter 24-Stunden-Bereit- schaft	5-84
5.4	Verwendete und weiterführende Literatur.....	5-86
6	BESCHLEUNIGUNGEN UND IHRE WIRKUNGEN.....	6-87
6.1	Definition der Beschleunigung.....	6-87
6.2	Arten der Beschleunigung.....	6-88
6.2.1	Die lineare (geradlinige) Beschleunigung.....	6-88
6.2.2	Die radiale Beschleunigung.....	6-89
6.2.3	Die rotatorische Beschleunigung.....	6-89
6.2.4	Die anguläre Beschleunigung.....	6-90
6.3	Wirkrichtungen und Wirkachsen.....	6-90
6.3.1	Senkrechte Beschleunigungen.....	6-91
6.3.2	Sagittale oder Transverse Beschleunigungen.....	6-91
6.3.3	Laterale Beschleunigungen.....	6-91

6.4	Weitere Wirkfaktoren.....	6-92
6.4.1	Die Dauer der Einwirkung (Wirkzeit).....	6-92
6.4.2	Beschleunigungszuwachsrate.....	6-92
6.4.3	Die Dauer des Maximums oder der Maxima der Flieh- kraft-Einwirkung.....	6-93
6.4.4	Die exponierte Fläche des beschleunigten Körpers.....	6-94
6.5	Wirkungen von Beschleunigungen auf den mensch- lichen Organismus.....	6-94
6.5.1	Wirkungen positiver Beschleunigungen (+G _z).....	6-94
6.5.2	Wirkungen negativer Beschleunigungen (+G _z).....	6-99
6.5.3	Wirkungen transverser Beschleunigungen (+G _x / G _x).....	6-100
6.6	Maßnahmen zur Erhöhung der positiven G_z-Toleranz.....	6-101
6.6.1	Technische Maßnahmen zur Erhöhungen der positiven G _z -Toleranz.....	6-102
6.6.2	Persönliche Maßnahmen zur Erhöhung der positiven G _z -Toleranz.....	6-103
6.7	Grundlagen der Bewegungslehre.....	6-105
6.7.1	Bewegung.....	6-105
6.7.2	Kräfte und Momente.....	6-107
6.8	Verwendete und weiterführende Literatur.....	6-108
7	RETTUNGSSYSTEME.....	7-109
7.1	Geschichtlicher Überblick.....	7-109
7.2	Grundsätzliche Aufgaben eines Schleudersitz- Rettungssystems.....	7-110
7.3	Das Schleudersitz-System.....	7-111
7.3.1	Systemkomponenten.....	7-111
7.3.2	Funktionsprinzip.....	7-114
7.3.3	Leistungsgrenzen.....	7-116
7.3.4	Rettungsausrüstung des Piloten.....	7-117
7.4	Verwendete und weiterführende Literatur.....	7-118
8	OPHTHALMOLOGIE.....	8-119
8.1	Einführung.....	8-119
8.2	Anatomie.....	8-120

8.3	Flugmedizinische Besonderheiten.....	8-122
8.3.1	Tagestechnik – Scanning-Technik.....	8-122
8.3.2	Nachtstechnik – Exzentrische Fixation.....	8-123
8.3.3	Die Hell-Dunkel-Anpassung.....	8-123
8.3.4	Blendung.....	8-123
8.3.5	Sauerstoffmangel.....	8-124
8.3.6	Räumliches Sehen.....	8-124
8.3.7	Optische Täuschungen.....	8-126
8.3.8	Schätzfehler beim Landeanflug.....	8-127
8.3.9	Latenzzeiten beim Sehvorgang.....	8-128
8.3.10	Fliegen mit Bildverstärker-(BiV)-Brille.....	8-129
8.4	Optische Abbildung und Fehlsichtigkeiten.....	8-130
8.4.1	Korrekturmöglichkeiten.....	8-131
8.4.2	Sehleistung, Sehschärfe, Grenzwerte.....	8-134
8.5	Farbsehen, Farbsinnstörungen.....	8-134
8.5.1	Erbliche Farbsinnstörungen.....	8-135
8.5.2	Erworbene Farbsinnstörungen.....	8-136
8.6	Begutachtungswesen.....	8-136
8.7	Sondergenehmigungen.....	8-137
8.8	Ausblick.....	8-138
8.9	Verwendete und weiterführende Literatur.....	8-138
9	RÄUMLICHE ORIENTIERUNG / DESORIENTIERUNG.....	9-139
9.1	Einführung.....	9-139
9.2	Anatomie und Physiologie des Gleichgewichtsorgans.....	9-140
9.2.1	Die Bogengänge und ihre Funktion.....	9-140
9.2.2	Der Otolithenapparat und seine Funktion.....	9-142
9.3	Der Muskel-, Druck- und Tastsinn.....	9-143
9.4	Räumliche Desorientierung.....	9-144
9.4.1	Vestibulare Täuschungen.....	9-144
9.4.2	Weitere Erscheinungsformen der räumlichen Desorientierung.....	9-148
9.5	Beitragende Faktoren.....	9-149
9.6	Hilfen zum Umgang mit räumlicher Desorientierung.....	9-153
9.7	Verwendete und weiterführende Literatur.....	9-154

10	LUFTKRANKHEIT.....	10-155
10.1	Einführung.....	10-155
10.2	Definition.....	10-155
10.3	Symptome.....	10-155
10.4	Physiologische und physikalische Grundlagen.....	10-155
10.5	Entstehungstheorie/Pathogenese.....	10-156
10.6	Vorbeugung und Therapie.....	10-161
10.7	Verwendete und weiterführende Literatur.....	10-162
11	VIBRATION.....	11-163
11.1	Physikalische Grundlagen.....	11-163
11.1.1	Schwingungsmechanik.....	11-163
11.2	Schwingungsübertragung.....	11-166
11.3	Einfluss der Vibrationen auf den menschlichen Körper.....	11-166
11.4	Schwingstärke K	11-167
11.5	Auswirkungen der Schwingungen auf den menschlichen Körper	11-170
11.6	Bewertung	11-171
11.7	Verwendete und weiterführende Literatur	11-172
12	HNO – LÄRM	12-173
12.1	Klinische Untersuchung des äußeren Ohres, des Ganges und des Trommelfells, Hörprüfungsmethoden, auditive Wahrnehmung	12-173
12.1.1	Prüfung der luftvermittelten Schallübertragung – Schalltransfer – Physiologie	12-174
12.2	Physikalische Messung und physiologische Beurteilung der auralen und extraauralen Wirkung von Schallwellen auf den menschlichen Körper	12-177
12.2.1	Definition	12-177
12.2.2	Schallwahrnehmung	12-181
12.2.3	Schallwirkung auf den Menschen	12-181

12.2.4	Lärmbelastung im Flugbetrieb	12-184
12.2.5	Hörschutz	12-187
12.3	Verwendete und weiterführende Literatur	12-190
13	WÄRMEHAUSHALT UND DIE AUSWIRKUNGEN	13-191
	EXTREMER TEMPERATUREN	
13.1	Physikalische Grundlagen	13-191
13.2	Physiologische Grundlagen	13-191
13.3	Die Einwirkung von Kälte	13-196
13.3.1	Reaktion auf Kälte, Kälteadaptation	13-196
13.3.2	Pathophysiologie und Symptomatik von Kälteschäden.....	13-197
13.3.3	Die Behandlung von Kälteschäden	13-198
13.3.4	Erste-Hilfe-Maßnahmen bei allgemeiner Unterkühlung	13-198
13.3.5	Vorbeugende Maßnahmen zur Verhütung von Kälteschäden	13-199
13.4	Die Einwirkung von Hitze	13-200
13.4.1	Hitzeadaptation	13-200
13.4.2	Pathophysiologie und Symptomatik von Hitzeschäden	13-201
13.4.3	Die Behandlung von Hitzeschäden	13-202
13.4.4	Vorbeugende Maßnahmen zur Verhütung von Hitzeschäden	13-203
13.5	Verwendete und weiterführende Literatur	13-203
14	BIOLOGISCHE RHYTHMEN, ZEITVERSCHIEBUNG UND.....	14-205
	ERMÜDUNG	
14.1	Definitionen	14-205
14.2	Die „Innere Uhr“, eine biorhythmische Beobachtung	14-206
14.2.1	Periodische Grundphänomene	14-206
14.2.2	Beeinflussbarkeit der Rhythmen	14-207
14.2.3	Ermüdung – eine besondere biorhythmische Größe	14-210
14.2.4	Nacht- und Schichtarbeit	14-213
14.3	Zeitverschiebung und Desynchronisation	14-214
14.3.1	Transmeridiane Flüge – Jet Lag	14-214
14.3.2	Transmeridiane Flüge und Dauermedikation	14-215
14.3.3	Leistungsflüge und Raumflüge	14-216
14.4	Verwendete und weiterführende Literatur	14-217

15	GESUNDHEITLICHE RISIKOFAKTOREN UND DEREN.....	15-219
	VERMEIDUNG	
15.1	Gesundheit und Fliegen	15-219
15.2	Die Bedeutung richtiger Ernährung	15-220
15.3	Die Rolle eines ausreichenden körperlichen Trainings	15-221
15.4	Medikamente und Fliegen	15-221
15.5	Andere Noxen	15-222
15.6	Möglichkeiten des autogenen Trainings	15-223
15.7	Verwendete und weiterführende Literatur	15-223
16	BELASTUNG, BEANSPRUCHUNG, STRESS, SENSOREN.....	16-225
16.1	Belastung und Beanspruchung	16-225
16.2	Stress, Stressreaktion	16-225
16.3	Allgemeines Anpassungssyndrom	16-226
16.4	Stressoren	16-226
16.5	Individuelle Unterschiede bei der Reaktion auf Stress	16-227
16.6	Stressbewältigung: das „Coping-Konzept“	16-227
16.7	Critical Incident Stress Management (CISM nach Mitchell).....	16-228
16.7.1	Maßnahmen zur Krisenintervention	16-230
16.8	Verwendete und weiterführende Literatur	16-232
17	KURZER ABRISS DER FLUGPSYCHOLOGIE	17-233
17.1	Die Gegenstandsgebiete der Flugpsychologie, abgeleitet	17-233
	aus den Anforderungen der fliegerischen Tätigkeit	
17.2	Die psychologische Auswahl des fliegenden Personals	17-236
17.3	Klinische Flugpsychologie	17-240
17.4	Flugpsychologie und Flugsicherheit	17-242
17.5	Verwendete und weiterführende Literatur	17-246

18	NEUROLOGISCHE UND PSYCHIATRISCHE ASPEKTE.....	18-247
	DER FLUGMEDIZIN	
18.1	Allgemeines	18-247
18.1.1	Was muss im Einzelfall beurteilt werden?	18-248
18.1.2	Folgen der Gesundheitsstörung	18-248
18.1.3	Allgemeines Vorgehen bei Sondergenehmigungen	18-249
18.2	Neurologie	18-249
18.2.1	Untersuchungsverfahren	18-249
18.2.2	Krankheitsbilder	18-254
18.3	Psychiatrie	18-260
18.3.1	Allgemeine Beurteilungsrichtlinien in der psychiatrischen Flugmedizin.....	18-260
18.3.2	Krankheitsbilder	18-261
18.4	Verwendete und weiterführende Literatur	18-266
19	DIE WICHTIGSTEN FLUGZEUGMUSTER DER BUNDESWEHR..	19-267
19.1	Panavia 200 „Tornado“	19-268
19.2	McDonnell-Douglas F-4F „Phantom II“	19-269
19.3	Dassault-Breguet BR 1150 „Atlantic“	19-270
19.4	Aérospatiale/DASA: C – 160 D „Transall“	19-271
19.5	Eurocopter (Bölkow) Bo-105M (VBH) Bo-105P (PAH-1)	19-272
19.6	Bell UH-1D „Iroquois“	19-273
19.7	Sikorsky CH-53G „Stallion“	19-274
19.8	GKN-WHL Sea King Mk. 41	19-275
19.9	Westland Sea Lynx Mk. 88	19-276
19.10	Boeing E – 3A (Sentry) (AWACS – Airborne Warning and Control System).....	19-277
19.11	Airbus Industrie A 310-304	19-278
19.12	Bombardier (Canadair) CI-601 „Challenger“	19-279
19.13	LET L-410-S-UVP „Turbolet“	19-280
19.14	Dornier Do 228.....	19-281

19.15	Eurofighter EF-2000 „Typhoon“	19-282
19.16	Eurocopter PAH 2 UH „Tiger“	19-283
19.17	NATO-Hubschrauber: NH-90.....	19-284
19.18	Weiterführende Literatur.....	19-285
20	WISSENSWERTES AUS DER (MILITÄR) – FLIEGEREI.....	20-287
20.1	Einführung.....	20-287
20.2	Der Flugplatz.....	20-287
20.2.1	Ein Flugplatz und seine Einrichtungen.....	20-287
20.2.2	Der Flugplatz-Kontrollturm (aerodrome control tower – TWR).....	20-288
20.2.3	Die (Flugplatz-) Anflugkontrolle (GCA – Ground Controlled Approach)....	20-289
20.2.4	Der Gefechtsstand.....	20-289
20.2.5	Die Flugabfertigung (Base Operations).....	20-290
20.2.6	Die Geophysikalische Beratungsstelle (Wetterberatung).....	20-290
20.2.7	Die Einsatzsteuerung.....	20-290
20.2.8	Das Cross-Servicing.....	20-291
20.2.9	Das „R+S“Lager.....	20-291
20.2.10	Die Flugplatzfeuerwehr.....	20-291
20.2.11	Der Fliegerarzt.....	20-291
20.3	Der Ablauf eines Fluges (IFR).....	20-292
20.3.1	Der Flugauftrag.....	20-292
20.3.2	Die Flugvorbereitung.....	20-292
20.3.3	Die Inbetriebnahme des Lfz.....	20-293
20.3.4	Start und Abflugverfahren.....	20-293
20.3.5	Streckenflug.....	20-294
20.3.6	Das Anflugverfahren.....	20-296
30.3.7	Die Beendigung des Flugauftrages.....	20-296
20.4	Flugregeln.....	20-297
20.4.1	Die Luftverkehrsordnung.....	20-297
20.4.2	Die allgemeinen Flugregeln.....	20-297
20.4.3	Sichtflugregeln.....	20-297
20.4.4	Instrumentenflugregeln.....	20-298
20.5	Der Hubschrauber.....	20-298
20.5.1	Konstruktions- und Antriebsmerkmale.....	20-298
20.5.2	Die Bauteile eines Hubschraubers.....	20-299
20.5.3	Die Aerodynamik des Hubschraubers.....	20-299
20.5.4	Die Steuerung eines Hubschraubers.....	20-299
20.5.5	Die Autorotation.....	20-300
20.6	Kleine Instrumentenkunde.....	20-300
20.6.1	Flug(überwachungs-)instrumente.....	20-301

20.6.2	Navigationsinstrumente.....	20-302
20.6.3	Triebwerküberwachungsinstrumente.....	20-303
20.6.4	Sonstige Instrumente.....	20-304
20.6.5	Anordnungen der Instrumente und Ausblick auf künftige Cockpitlayouts..	20-304
20.7	Der militärische Such- und Rettungsdienst(SAR – Search And Rescue)	20-305
20.7.1	Rechtliche Grundlagen.....	20-305
20.7.2	Die Aufgaben.....	20-305
20.7.3	Die Ausrüstung.....	20-306
20.7.4	Die Bereitschaftszeiten.....	20-306
20.7.5	Die Alarmstufen.....	20-306
20.7.6	Der fliegerische Einsatz.....	20-307
20.7.7	Würdigung der fliegerischen Leistung.....	20-308
20.8	Begriffe und Abkürzungen in der Fliegersprache.....	20-308
21	AEROMEDICAL EVACUATION.....	21-311
21.1	Geschichte.....	21-311
21.2	Operationelle Anforderungen.....	21-311
21.3	Allgemeine / flugmedizinische Aspekte.....	21-312
21.3.1	Abnahme der Luftdruckes.....	21-313
21.3.2	Abnahme des O ₂ -Partialdruckes.....	21-313
21.3.3	Temperaturänderungen.....	21-314
21.3.4	Luftfeuchtigkeit.....	21-314
21.3.5	Lärm.....	21-314
21.3.6	Vibrationen.....	21-314
21.3.7	Beschleunigungen.....	21-314
21.4	Aeromedical Evacuation in der Bundeswehr.....	21-314
21.5	Zusammenfassung.....	21-317
21.6	Verwendete und weiterführende Literatur.....	21-317
22	TROPENMEDIZIN.....	22-319
22.1	Definition und historische Entwicklung.....	22-319
22.2	Ausgewählte Beispiele einsatzrelevanter Tropenerkrankungen	22-320
22.2.1	<u>Malaria</u> : (mala aria = schlechte Luft)	22-320
22.2.2	Durchfallerkrankungen.....	22-321
22.3	Präventionsmaßnahmen.....	22-321

22.4	Schlussfolgerungen.....	22-322
22.5	Verwendete und weiterführende Literatur.....	22-323
22.6	Vorschriften der Bundeswehr.....	22-323
22.7	Einige wichtige Internet-Adressen.....	22-324
22.8	Einige wichtige Adressen.....	22-324
23	ORTHOPÄDIE.....	23-325
23.1	Einleitung.....	23-325
23.2	Orthopädisches Screening vor Aufnahme des fliegerischen Dienstes (WFV I)	23-326
23.3	Orthopädische Nachuntersuchung auf WFV am FIMedInstLw	23-327
23.4	Strahlflugzeug mit Schleudersitzen (Jet).....	23-328
23.4.1	Rettungsausschuss mit dem Schleudersitz.....	23-328
23.4.2	G-Belastungen im Flugdienst.....	23-331
23.4.3	Helmgewicht und G-Belastung.....	23-332
23.4.4	Sitzhaltung im JET.....	23-333
23.5	Wirbelsäulenbelastungen in Hubschraubern.....	23-333
23.5.1	Ganzkörpervibrationsbelastungen im Sitzen.....	23-334
23.5.2	Sitzhaltung im Hubschrauber.....	23-335
23.5.3	Helmgewicht und Kopfhaltung im Flugdienst.....	23-336
23.6	Belastungen beim Fliegen eines Transportflugzeuges der Bundeswehr.....	23-336
23.7	Zusammenfassung.....	23-336
23.8	Verwendete Literatur.....	23-337
24	Stichwortverzeichnis.....	24-339

1 PHYSIK DER ATMOSPHERE

1.1 Die Atmosphäre

Ein wesentlicher Teilbereich der Erde ist ihre Atmosphäre. Sie besteht aus einem Gasgemisch mit nahezu konstanter chemischer Zusammensetzung. Sie ist Voraussetzung für das irdische aerobe Leben, so auch für den Menschen. Seit dem 18. Jh. nutzt der Mensch auch dieses Medium zur Fortbewegung, zunächst im Ballon und heute sogar im Überschallflugzeug. Zahlreiche Negativerfahrungen für Leib und Leben beim Aufenthalt in größeren Höhen lassen die Notwendigkeit erkennen, sich genau mit der Physik der Atmosphäre auseinander zu setzen.

1.1.1 Die Zusammensetzung der Atmosphäre

Die Atmosphäre besteht aus einem Gemisch verschiedener Gase (Abb.1.1), hauptsächlich Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2). Die prozentuale Zusammensetzung des Gasgemisches ist bis ca. 90 km (274 320 ft) Höhe nahezu konstant. Dabei nehmen die Partialdrücke mit Zunahme der Entfernung von der Erdoberfläche e-funktionsartig ab. Das mittlere Molekulargewicht der Luft beträgt 28,96 g/mol.

Elemente/ Verbindungen	Volumen %	Teildruck hPa
Stickstoff (N_2)	78,08	791,15
Sauerstoff (O_2)	20,95	212,28
Argon (Ar)	0,93	9,42
Kohlendioxid (CO_2)	0,03	0,30
Krypton (Kr) Xenon (Xe) Neon (Ne) Helium (He) Wasserstoff (H_2) Ammoniak (NH_3) Jod (J) Wasserstoffperoxid (H_2O_2) Ozon (O_3) Schwefelwasserstoff (H_2S) artifizielle Gase	0,01	0,10

Die Zusammensetzung der Luft nahe der Erdoberfläche weicht von den in Abb.1.1 dargestellten Werten durch natürliche Einflüsse wie durch Verdampfung von Wasser z.B. über den Ozeanen sowie durch Gase und Staub vulkanischen Ursprungs ab. Weitere Veränderungen finden sich artifiziell durch die Zivilisation (CO_2 , CO, NO, FCKW usw.).

Nur der untere Teil der Atmosphäre bis ca. 11 km (36 089 ft) Höhe (Abb.1.2) enthält Wasserdampf, der für das Wettergeschehen verantwortlich ist. Die Konzentration des Wasserdampfes in der Luft ist von der Temperatur abhängig. Je höher die Temperatur der Luftmasse, umso höher ist die maximal mögliche Sättigung.

**Abb. 1.1: Zusammensetzung der Atmosphäre;
Gasteildrücke bezogen auf 1.013,25 hPa**

Flugphysiologisch betrachtet man trockene Luft als ein Gemisch von 21% Sauerstoff (O_2) und 78 % Stickstoff (N_2). Das restliche Prozent wird im Wesentlichen von Argon und Kohlendioxid gestellt.

Im Folgenden werden deshalb diese Werte der Gaszusammensetzung für alle Berechnungen der Drücke und Teildrücke verwendet.

1.1.2 Die Struktur der Atmosphäre

Die einzelnen Schichten der Atmosphäre von der Erdoberfläche nach außen werden als Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre und Exosphäre bezeichnet. Die Abb. 1.2 zeigt neben den Höhenangaben und den oben aufgeführten Sphären Naturphänomene, den mittleren Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Höhe und die wesentlichen vom Menschen

genützten Höhenbereiche. Die Umrechnung der Höhen von km in ft geschieht durch Division durch 0,3048 und anschließende Multiplikation mit 1000.

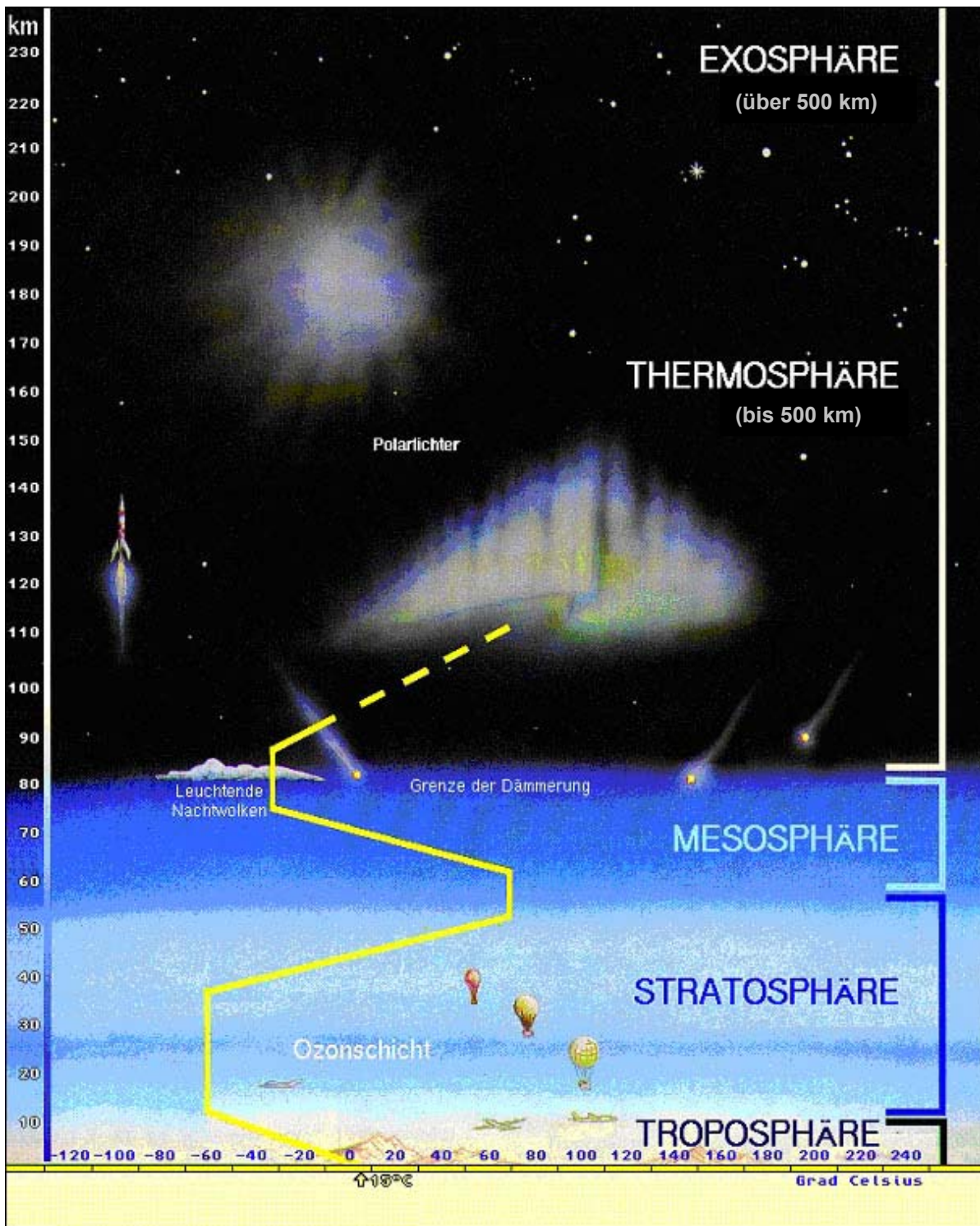


Abb. 1.2: Struktur der Atmosphäre

Die Troposphäre ist in Form eines Rotationsellipsoids um die Erde angeordnet. An den Polen beträgt die Ausdehnung ca. 30.000 ft, am Äquator ca. 60.000 ft (Abb. 1.3). Die unterschiedliche Ausdehnung in der Höhe ist mit der unterschiedlichen Erwärmung der Troposphäre und des Bodens zu erklären, der die aufgenommene Wärme emittiert.

In Äquatornähe wird mehr Wärme in den Raum emittiert als über den Polen. Dadurch kann die Luft höher aufsteigen, bis sie die gleiche Temperatur wie an den Polen erreicht. Am 48. Breitengrad (etwa München) befinden wir uns zwischen den Extremwerten und finden die Begrenzung der Troposphäre im Mittel bei 36.000 ft. In der Abbildung 1.4 sind weitere Aufteilungen der Atmosphäre nach anderen Kriterien aufgeführt. So wird nach der Temperaturverteilung, der Zusammensetzung, der Ionisierung, der Fluchtbewegung und dem Einfluss des Magnetfeldes in Abhängigkeit der Entfernung von der Erdoberfläche klassifiziert.

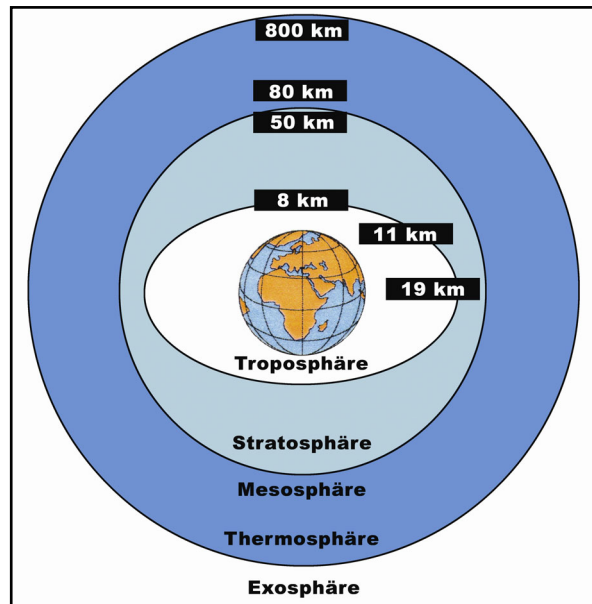


Abb. 1.3: Schematische Darstellung der Schichtung der Erdatmosphäre (nicht maßstäblich)

km ↑ 100000 10000 100 10	Interplanetarer Raum				
	Thermosphäre	Heterosphäre	Protonosphäre	Exosphäre	Magnetosphäre
	Mesosphäre		Ionosphäre		
	Stratosphäre	Homosphäre	Neutrosphäre		
	Troposphäre				
Höhe	Temperatur	Zusammensetzung	Ionisierung	Fluchtbewegung (Gaskinetik)	Erdmagnetfeldeinflüsse

Abb. 1.4: Einteilung der Erdatmosphäre nach unterschiedlichen Kriterien

1.1.2.1 Die Troposphäre

Abgesehen von der bereits geschilderten Ausdehnung finden in der Troposphäre alle Wervorgänge statt (Nebel, Regen, Schnee, Gewitter, Turbulenzen). In ihr befinden sich die Wolken. Die bodennahen Luftschichten erfahren die größten Luftbewegungen. Mit zunehmender Entfernung von der Erdoberfläche reduziert sich die Lufttemperatur (ca. 2 °C pro

1.000 ft). Der Luftdruck nimmt e-funktional ab. Der Normaldruck in Meereshöhe ist mit 1.013,25 hPa festgelegt. Beim Übergang in die Stratosphäre (ca. 11 km), der Grenzbereich wird als **Tropopause** bezeichnet, beträgt die mittlere Lufttemperatur am Pol -50 °C , am Äquator -80 °C , der Luftdruck beträgt 236,32 hPa. Der für die Atmung entscheidende O_2 -Partialdruck reduziert sich von 212,78 hPa in Meereshöhe auf 47,53 hPa.

1.1.2.2 Die Stratosphäre

Die Stratosphäre grenzt an die Tropopause und erstreckt sich bis ca. 50 km (152.400 ft) Höhe. Ihre Obergrenze wird als Stratopause bezeichnet. Die Stratosphäre enthält die Ozonschicht. Die Ozonkonzentration hat ihre maximale Dichte bei 25 km Höhe. Ozon entsteht aus atmosphärischem Sauerstoff auf Grund der Einwirkung ultravioletter Sonnenstrahlung. Dieser Vorgang beeinflusst ganz wesentlich die Zusammensetzung des die Erdoberfläche erreichenden Lichtspektrums. Die Ozonschicht filtert den größten Teil der mutagenen Anteile des UV-Spektrums heraus.

Unterhalb der Ozonschicht liegt die Umgebungstemperatur zwischen -50 °C bis -80 °C , darüber steigt sie bis auf 50 °C in 50 km Höhe an. Der Temperaturanstieg ist durch die Absorption der ultravioletten Sonnenstrahlen begründet.

Der untere Bereich der Stratosphäre ist die Zone der Strahlstromwinde (Jet-Stream), Winde mit Geschwindigkeiten bis zu 370 km/h mit Richtung von West nach Ost.

Anmerkung:

Auf Grund der Aggressivität des Ozons insbesondere auf die Atmungsorgane wurden bei zivilen Luftfahrzeugen Katalysatoren in den Ansaugbereich der Nutzluft eingebaut, um schädliche Ozonkonzentrationsanstiege der Kabinenluft zu verhindern. Der MAK-Wert des Ozons liegt bei 0,1 ppm.

1.1.2.3 Die Mesosphäre

Die Mesosphäre erstreckt sich bis ca. 80 - 100 km Höhe. Hier findet ein Temperaturabfall auf -70 °C bis -90 °C . Die Obergrenze nennt man Mesopause. In der Mesosphäre verglühen die meisten Meteoriten.

1.1.2.4 Die Thermosphäre

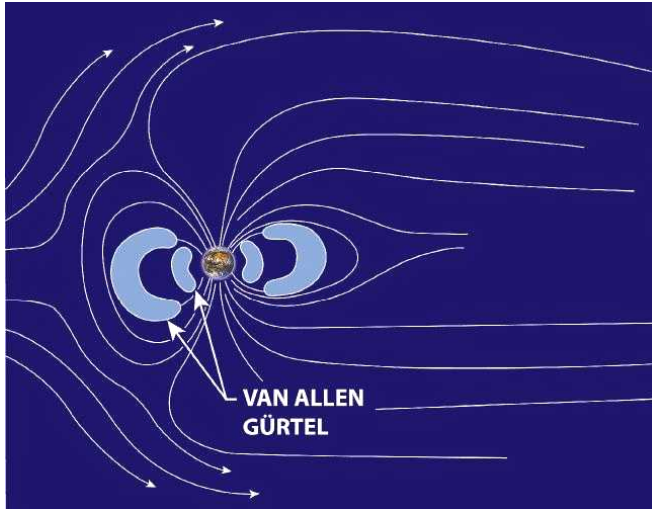
Die Thermosphäre schließt sich der Mesopause an und reicht bis zu einer Höhe von ca. 500 km. Sie hat keine spezifische Obergrenze. Mit zunehmender Höhe steigt die (gaskinetische) Temperatur auf Grund der dort befindlichen dünnen Luftreste stark an und erreicht ihr Maximum mit ca. 1500 °C . Der Temperaturwert ist von der Sonnenaktivität und vom Sonnenstand abhängig.

In der Thermosphäre führt die Absorption der kurzwelligen Sonnenstrahlung zu einer Ionisation der Gasteilchen. Es existieren verschiedene Schichten der Ionenkonzentration, so bei 80 km die D-Schicht, bei 110 km die E-Schicht und von 180 bis 300 km Höhe die F-Schicht. Die Schichten in ihrer Gesamtheit werden als Ionosphäre bezeichnet. Die Ionosphäre hat auf Grund ihrer Reflexionseigenschaften einen bedeutenden Einfluss auf den irdischen Funkverkehr, d.h. auf Grund der Reflexionseigenschaften der genannten Schichten ist überhaupt nur ein weltweiter Funkverkehr möglich. Da wie bereits geschildert, die Sonnenstrahlung die Eigenschaften der Ionosphäre bestimmen, lassen Störungen im Funkverkehr auf besondere Vorgänge auf der Sonne rückschließen.

1.1.2.5 Die Exosphäre

Sie bildet die letzte Grenzschicht der Erdatmosphäre zum Weltraum. Der Übergang in den Weltraum wird mit 2.000 bis 3.000 km angegeben. Sie stellt ein Gebiet dar, aus dem Gasteilchen wegen der hohen gaskinetischen Temperatur, der großen freien Weglängen und der verringerten Erdanziehung in den Weltraum entweichen können (lat: ex = hinaus, daher Exosphäre).

1.1.2.6 Die Magnetosphäre



Die Magnetosphäre (Abb. 1.4) ist definiert als der erdnahe Weltraum, in dem die physikalischen Vorgänge durch die Kräfte des geomagnetischen Feldes bestimmt werden. Sie erstreckt sich von 150 km über der Erdoberfläche bis zu 100.000 km (ca. 15 Erdradien) in den Weltraum hinaus. In ihr findet man Gebiete mit erhöhter Dichte von Ladungsteilchen, bevorzugt Protonen und Elektronen. Die Befunde wurden mit den Messsatelliten Sputnik und Explorer erhoben und von James van Allen umfassend interpretiert (1958).

Abb. 1.5: Strahlungsgürtel (van Allen Gürtel)

Die Strahlungsgürtel werden daher oft auch als van Allen-Gürtel bezeichnet (Abb. 1.5). Die durch das Erdmagnetfeld aus dem Weltraum eingefangenen Ladungsteilchen bewegen sich in spiralförmigen Bahnen um die magnetischen Feldlinien mit Geschwindigkeiten bis zu 170.000 km/s. Die Protonen bewegen sich bevorzugt in Höhen von 300 bis 30.000 km, die Elektronen zwischen 700 und 45.000 km. Ausschlaggebend für die Teilchendichte ist der Sonnenwind (Abb. 1.6), der auf Grund seines energiereichen Teilchenstroms außerdem noch die Form des Erdmagnetfelds wesentlich beeinflusst.

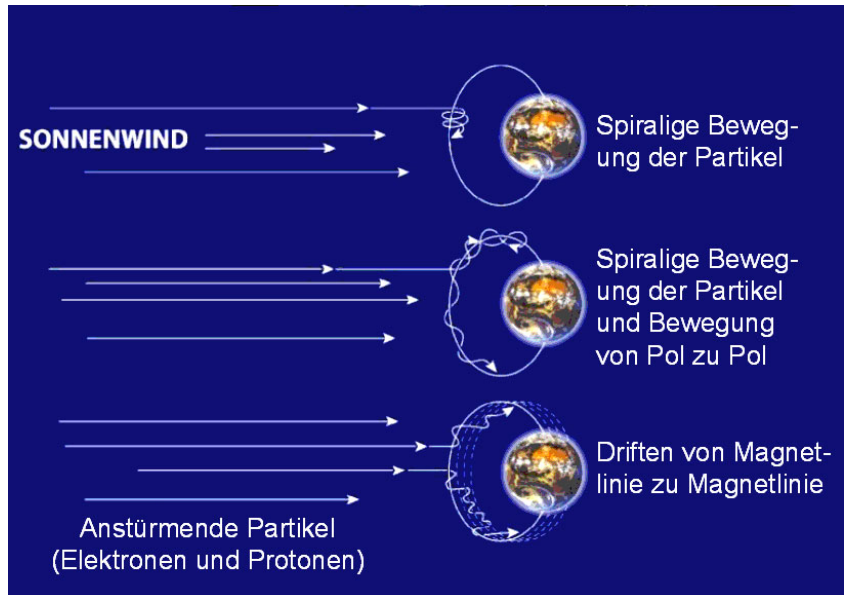


Abb. 1.6: Einfluss des Sonnenwinds auf die Form des Erdmagnetfelds und die Teilchendichte

1.2 Der Luftdruck (Barometrischer Druck)

In der Physik wird Druck als Quotient von Kraft und Fläche gemäß **Druck** = $\frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$ definiert,

die Maßeinheit ist Pascal (1 Pa = 1N/m²). Unter dem barometrischen Druck versteht man den Quotienten aus Gewichtskraft einer definierten Luftsäule auf die ihr entsprechende Fläche. Der Luftdruck ist mit 1.013,25 hPa (Hektopascal) als Normaldruck auf Meereshöhe bei einer Umgebungstemperatur von 15 °C festgelegt worden. Auf Grund von meteorologischen Einflüssen schwankt der Luftdruck auf Meeresniveau zwischen 920 und 1085 hPa, also um bis zu ± 10%. Mit steigender Höhe nehmen Luftdruck und Temperatur ab. Die barometrische Höhenformel beschreibt den Zusammenhang zwischen Luftdruck (p), Höhe (h) und Temperatur (T), wobei p₀ der Druck auf einer bekannten Höhe h₀ ist:

$$h - h_0 = \tilde{R} \cdot T \cdot \ln \frac{p_0}{p},$$

dabei ist T die mittlere Temperatur in Kelvin [K] und $\tilde{R} = 29,27 \text{ [mK}^{-1}\text{]}$ ist die durch die molare Masse M = 28,964 $[\frac{\text{g}}{\text{mol}}]$ der Luft und die Erdbeschleunigung g = 9,81 $[\text{m s}^{-2}]$ dividierte Gas-

konstante.

Bei Vernachlässigung der höhenabhängigen Temperaturveränderungen vereinfacht sich die barometrische Höhenformel:

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{1,2928 \cdot 9,81 \cdot h}{p_0 \cdot 10^2}}$$

Die Luftdichte auf Meereshöhe ist 1,2928 kg·m⁻³, p₀ = 1.013,25 hPa, h die Höhe, in der der Druck bestimmt werden soll, und p der zu bestimmende Luftdruck. Für die Berechnung z.B. in Microsoft Excel für die Höhe 8.000 m ist Folgendes einzugeben:

$$=1.013,25 \cdot \exp(-1,2928 \cdot 9,81 \cdot 8.000 / (1.013,25 \cdot 10^2))$$

In Schritten von 1.000 ft können die höhenabhängigen Drücke und Temperaturen in der Abb. 1.7 abgelesen werden.

Beim Literaturstudium stößt man öfter auf andere Druckmaßeinheiten. In der Abb.1.8 sind die rechnerischen Zusammenhänge zwischen den Einheiten Pa, bar, Torr, mmWs und psi dargestellt. Druckmessgeräte heißen Manometer, Luftdrücke werden mit Barometern bestimmt.

	Pa	bar	Torr	mmWs	inchHg	psi
Pascal (Pa)	1	0,00001	0,0075	0,102	0,0002952	0,000145
Bar	100.000	1	750	10197	29,52	14,5
Torricelli = mmHg (Torr)	133	0,00133	1	13,6	0,03937	0,01934
Millimeter Wassersäule (mmWs)	9,81	0,0000981	0,0736	1	0,002897	0,001423
InchHg	3386	0,03386	25,4	345,45	1	0,4912
pound per square inch (psi)	6898	0,0680	51,71	702,74	2,0358	1

Abb. 1.8: Maßeinheiten

Höhe		Druck	Temperatur	O ₂ - Teildruck [hPa]	
[feet]	[Meter]	[hPa]	°C	Luft	Trachea
0	0	1.013	15,0	213	200
1.000	305	977	13,0	205	192
2.000	610	942	11,0	198	185
3.000	914	908	9,1	191	178
4.000	1.219	875	7,1	184	171
5.000	1.524	843	5,1	177	164
6.000	1.829	812	3,1	171	157
7.000	2.134	782	1,1	164	151
8.000	2.438	753	-0,8	158	145
9.000	2.743	724	-2,8	152	139
10.000	3.048	697	-4,8	146	133
11.000	3.353	670	-6,8	141	128
12.000	3.658	645	-8,8	135	122
13.000	3.962	620	-10,7	130	117
14.000	4.267	596	-12,7	125	112
15.000	4.572	572	-14,7	120	107
16.000	4.879	549	-16,7	115	102
17.000	5.182	528	-18,7	111	98
18.000	5.486	506	-20,6	106	93
19.000	5.791	486	-22,6	102	89
20.000	6.096	466	-24,6	98	85
21.000	6.401	447	-26,6	94	81
22.000	6.706	428	-28,5	90	77
23.000	7.010	411	-30,5	86	73
24.000	7.315	393	-32,5	83	69
25.000	7.620	377	-34,5	79	66
26.000	7.925	360	-36,5	76	63
27.000	8.230	344	-38,4	72	59
28.000	8.534	330	-40,4	69	56
29.000	8.839	315	-42,4	66	53
30.000	9.144	302	-44,4	63	50
32.000	9.754	275	-48,3	58	45
34.000	10.363	251	-52,3	53	40
36.000	10.973	228	-56,2	48	35
38.000	11.582	207	-56,5	44	30
40.000	12.192	188	-56,5	40	26
42.000	12.802	171	-56,5	36	23
44.000	13.411	155	-56,5	33	20
46.000	14.021	141	-56,5	30	17
48.000	14.630	128	-56,5	27	14
50.000	15.240	117	-56,5	25	11
55.000	16.764	92	-56,5	19	6
60.000	18.288	72	-56,5	15	2
65.000	19.812	57	-56,5	12	
70.000	21.336	45	-55,2	9	
75.000	22.860	35	-53,7	7	
80.000	24.384	28	-52,2	6	
85.000	25.908	22	-50,7	5	
90.000	27.432	18	-49,2	4	
95.000	28.956	14	-47,7	3	
100.000	30.480	11	-46,2	2	

Abb. 1.7: Internationale Standardatmosphäre (ISA nach ICAO (1993), DOC 4788/3), Sauerstoffteildrücke (DeHart, R. L. 1996

Die genaueste Luftdruckmessung bedient sich des Quecksilberbarometers nach Torricelli (1608 - 1647). Die Maßeinheit ist mmHg oder Torr. Im Allgemeinen benutzt man zur Luftdruckmessung ein Anaeroid- oder Dosenbarometer, ein evakuierter Metallzylinder mit einem elastischen durch eine Feder unterstützten Boden. Der Außendruck verschiebt den Boden, eine Hebelkonstruktion überträgt die Bodenbewegung auf einen Zeiger. Im Flugbetrieb wird der Luftdruck in hPa oder in inches Hg (zur Einstellung des Höhenmessers) angegeben. In der Abb.1.9 ist die Druckzunahme grafisch dargestellt. In geringeren Höhen über dem Meeresspiegel gibt es relativ große Druckänderungen und in großen Höhen bei gleicher Höhendifferenz relativ kleine Druckänderungen.

Für den Normaldruck gilt:

1.013,25 hPa	entspricht
1.013,25 mb	entspricht
760,00 mmHg	entspricht
10.332,96 mmWs	entspricht
29,92 inchHg	entspricht
14,69 psi	

(entsprechend der Meereshöhe 0 m = 0 ft an einem Standardtag)

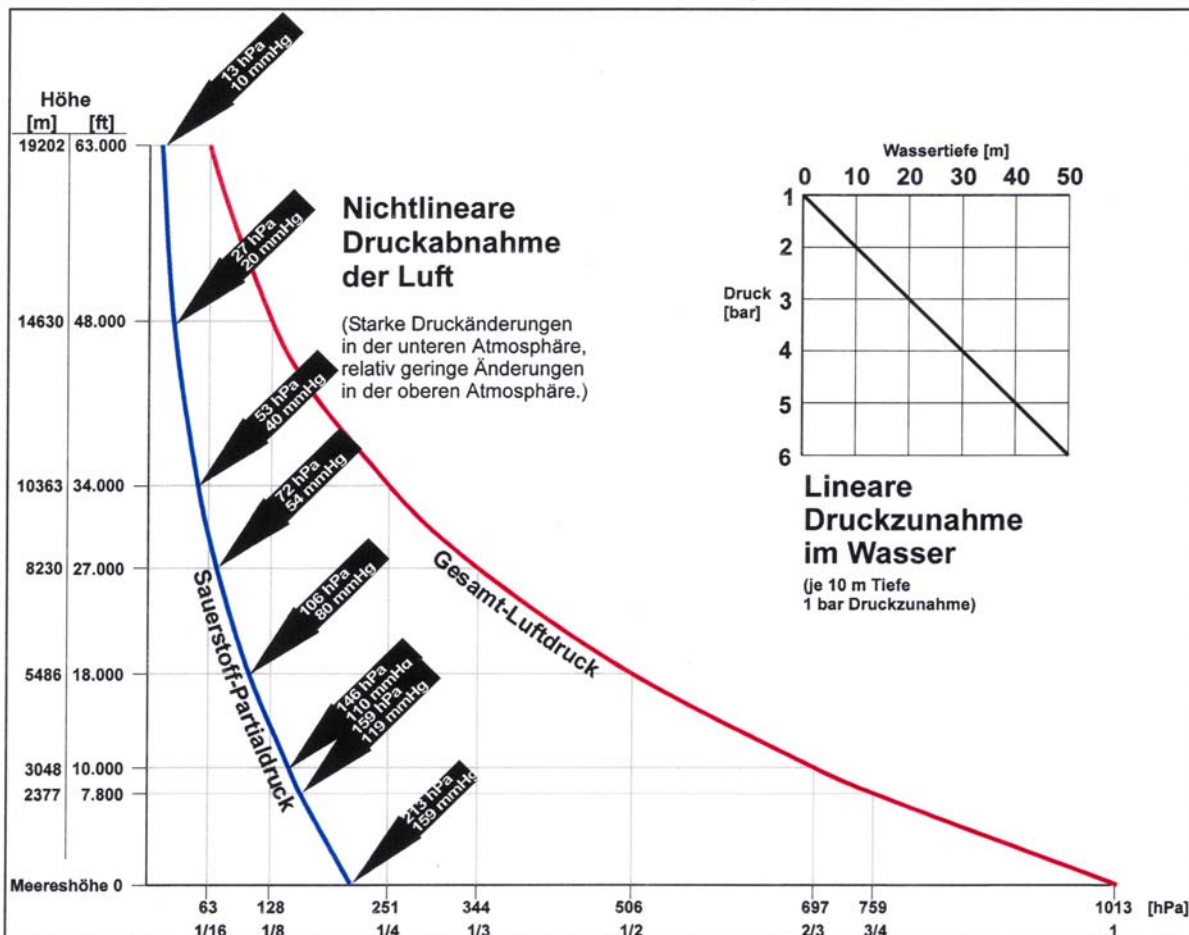


Abb. 1.9: Druckänderung im Medium Wasser (linear) sowie im Medium Luft (nicht linear)

Anmerkung: Im Medium Wasser ist die höhenabhängige Druckveränderung auf Grund der geringen Kompressibilität nahezu linear.

1.3 Das Gasgesetz

Neben den bereits beschriebenen Gasen in der Atmosphäre sind bei Aufenthalt des Menschen in größeren Höhen die Gase im menschlichen Körper, die teils frei in Körperhöhlen oder im gelösten Zustand in Körperflüssigkeiten vorkommen, von besonderer Wichtigkeit. Das Verhalten von Gasen in ihrer Abhängigkeit von Druck, Volumen und Temperatur ist hinreichend genau mit Hilfe des Gasgesetzes beschreibbar:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

(p: Gasdruck [hPa], V: Gasvolumen, n: Stoffmenge (gemessen in mol), R (universelle Gas-konstante): $8314,5 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$, T: thermodynamische Temperatur gemessen in Kelvin [K])

Aus dem Gasgesetz sind weitere Gesetze für das Verhalten von Gasen in unterschiedlichen Situationen abgeleitet worden:

- Gasausdehnung bei Druckänderung: **Gesetz von Boyle-Mariotte**
Boyle (1627-1691)
Mariotte (1620-1684)
- Gasausdehnung bei Temperaturänderung: **Gesetz von Charles (1746-1823)**
- Verhalten einzelner Gase eines Gemisches: **Gesetz von Dalton (1746-1844)**
- Gase in Flüssigkeiten bei Druckänderungen: **Gesetz von Henry (1797-1878)**

1.3.1 Gesetz von BOYLE-MARIOTTE

Bei konstanter Temperatur verhält sich das Volumen (V) eines Gases umgekehrt proportional zum Druck (P). Sinkt also der Druck beim Höhengaufstieg auf die Hälfte, so wird sich unter der Voraussetzung gleich bleibender Temperatur eine bestimmte Gasmenge auf das Doppelte ausdehnen. $P \cdot V$ ist konstant.

Auch gilt die Beziehung:

$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$ $\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$ <p>P_1 = Druck (pressure) in Ausgangshöhe V_1 = Volumen in Ausgangshöhe P_2 = Druck in veränderter Höhe V_2 = Volumen in veränderter Höhe</p>

Beispiel:

Abb. 1.10: Gasgesetz von Boyle-Mariotte

Um den Ausdehnungsfaktor (Quotient V_2/V_1) eines Gasvolumens von $V_1 = 1 \text{ m}^3$ im Vergleich Meereshöhe (Luftdruck = 1.013,25 hPa) zu einer neuen Höhe z.B. von 18.000 ft (entsprechend 506 hPa) zu errechnen ($V_2 = X \text{ m}^3$), setzen wir ein:

$$\frac{X}{1} = \frac{1013,25}{506} \approx 2$$

(Der Quotient ist eine dimensionslose Zahl, da sich m^3 und hPa herauskürzen)

Das Gasvolumen ist in 18.000 ft also doppelt so groß wie in Meereshöhe.

Entsprechend könnte man die Gasausdehnung für alle Flughöhen durchrechnen, wobei in 42.000 ft die fast 6-fache Gasausdehnung erreicht wird (Abb. 1.11 und 1.12). Diese Werte gelten für ideale Gase.

Beispiel:

Bei wasserdampfgesättigten Gasen ist der Wasserdampfdruck zu berücksichtigen. Bei einer Höhenänderung von 0 ft (Meereshöhe) bei einem Druck P₁ von 1.013,25 hPa und einem Volumen V₁ = 1 m³ auf 18.000 ft bei einem Druck P₂ von 506 hPa berechnet sich das Volumen V₂ (V₂ = X m³) unter Berücksichtigung des Wasserdampfdruckes von 62,5 hPa (Temperatur 37 °C) wie folgt:

$$\frac{X}{1} = \frac{1013,25 - 62,5}{506 - 62,5} = 2,14$$

V₂ bei 42.000 ft :

$$\frac{X}{1} = \frac{1013,25 - 62,5}{171 - 62,5} = 8,76$$

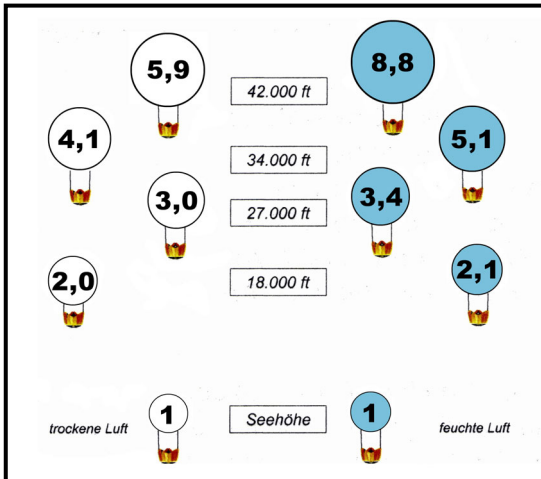


Abb. 1.11: Zum Gasgesetz von Boyle-Mariotte (Volumenangabe in Liter)

Barometrischer Druck [hPa]	Höhe [feet]	Volumen trockener Gase [l]	Volumen feuchter Gase [l]
1.013	0	1,0	1,0
697	10.000	1,45	1,50
466	20.000	2,17	2,36
302	30.000	3,35	3,97
188	40.000	5,39	7,57
117	50.000	8,66	17,44

Abb. 1.12: Volumenzunahme in verschiedenen Höhen

Da die Körperhöhlen des Menschen wasserdampf gesättigte Gase unter der Körpertemperatur von 37 °C enthalten, dehnen sich diese in einer Höhe von 18.000 ft um das 2,14-fache, in einer Höhe von 42.000 ft um das 8,76-fache aus.

Die Abbildungen 1.11 und 1.12 sollen die geschilderten Volumenänderungen noch weiter vertiefen.

Aus dem Boyle-Mariotte'schen Gesetz erklären sich Beschwerden in den Ohren und im Nasennebenhöhlenbereich (Barotraumen) einerseits und die durch Ausdehnung der in Körperhöhlen (Bauchraum) eingeschlossenen Gase verursachten Schmerzzustände andererseits, auf die später genauer eingegangen wird.

1.3.2 Gesetz von CHARLES

Während bei den obigen Beispielen Volumenänderungen auf Grund von Druckänderungen bei gleichbleibender Temperatur berechnet wurden, lassen sich Volumenänderungen auch bei Temperaturänderungen bei gleichbleibendem Druck bestimmen.

Bei konstantem Druck ist nach dem Gesetz von Charles das Volumen eines Gases proportional zur Temperatur des Gases.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Abb. 1.13: Gesetz von Charles

1.3.3 Gesetz von DALTON

In einem Gasgemisch (z.B. Luft) ist der Gesamtdruck (P_0) gleich der Summe der Teil- drücke (Partialdrücke) (P_i) der beteiligten Gase.

Es gilt also:

$$P_0 = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

P_0 = Gesamtdruck des Gasgemisches
 P_i = Gasteildruck

Abb. 1.14: Gesetz von Dalton

Der Volumenanteil des Gases am Mischgas ist gleich dem Quotienten aus Teildruck und Gesamtdruck des Mischgases. Auf Meeresniveau ist, wie mehrfach geschildert, der Gesamtdruck des atmosphärischen Gasgemisches 1.013 hPa. 21% ist der Anteil des Sauerstoffs. Somit ist sein Partialdruck 21% von 1.013 hPa:

$$P_{O_2} = 213 \text{ hPa}$$

Für Stickstoff gilt entsprechend 78% von 1.013,25 hPa:

$$P_{N_2} = 790 \text{ hPa}$$

In größerer Höhe z.B. in 18.000 ft entnehmen wir der Abb. 1.7 einen Gesamtdruck von 506 hPa. Somit ist der P_{O_2} hier 106,26. Für die Atmung heißt das, dass mit jedem Atemzug nur noch die Hälfte der Sauerstoffmenge eingeatmet wird, gleiches Atemzugsvolumen vorausgesetzt.

1.3.4 Gesetz von HENRY

Je höher der Druck eines auf eine Flüssigkeit drückenden Gases ist, desto mehr Gas wird in der Flüssigkeit gelöst. Umgekehrt wird im Falle einer Druckminderung des auf der Flüssigkeit lastenden Gases ein Ausfall (Entlösung) des gelösten Gases aus der Flüssigkeit erfolgen. Bei Druckänderung gilt dann folgende Beziehung für in Lösung befindliche Gasmengen Q (Q in mol):



Abb. 1.15 Druck und Löslichkeit von Gasen

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{Q_1}{Q_2}$$

Q_1 = Gelöste Gasmenge bei Druck P_1
 Q_2 = Gelöste Gasmenge bei Druck P_2

bzw. für die Gasmenge Q_2
 (nach erfolgter Druckänderung)

$$Q_2 = \frac{P_2 \cdot Q_1}{P_1}$$

Abb. 1.16: Gasgesetz von Henry

Beispiel:

Öffnen einer Sekt- oder Mineralwasserflasche.

Bei einer Höhenänderung von 0 ft (Meereshöhe) bei einem Druck $P_1 = 1.013 \text{ hPa}$ auf 18.000 ft bei einem Druck $P_2 = 506 \text{ hPa}$ berechnet sich die gelöste Gasmenge unter der Annahme, dass auf Meereshöhe 1 mol ($6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen, Avogadrokonstante) gelöst ist, wie folgt:

$$Q_2 = \frac{P_2 \cdot Q_1}{P_1} = \frac{506 \text{ hPa} \cdot \text{mol}}{1013,25 \text{ hPa}} \approx 0,5 \text{ mol}$$

In 18.000 ft ist die gelöste Gasmenge nur halb so groß wie auf Meereshöhe.

Das HENRY'sche Gesetz erklärt demnach auch die Lösung und das Freiwerden von Gasen im Organismus. Bei rapidem Druckfall (= rapide Dekompression) kann es zur Dekompressionskrankheit (DCS) kommen.

1.4 Höhenmessung

Im Flugbetrieb wird im Wesentlichen die barometrische Höhenmessung benutzt. Eine barometrische Dose misst den jeweils aktuellen Luftdruck, der am Höhenmesser in Meter oder Fuß angezeigt wird.

Drei Höhenangaben werden verwendet:

- die Druckhöhe (Pressure Altitude) bei Standardhöhenmessereinstellung (1.013,25 hPa)
- die Höhe über Grund (Absolute Altitude, Altitude Above Ground Level, AGL)
- die wahre Höhe (True Altitude), d.h. die Höhe über dem Meeresspiegel, Mean Sea Level, MSL)

1.4.1 Die Druckhöhe (Pressure Altitude)

Als Bezug bei dieser Art der Höhenmessung dient der Luftdruck der Standardatmosphäre in NN (1.013,25 hPa). Der Höhenmesser zeigt hier jeweils die Höhe in der ISA über dieser Bezugsebene (= NN) (Standard Datum Plane) an. Mit der Standardhöhenmessereinstellung wird in größeren Höhen geflogen, da hier die Schwankungen des (wetterbedingten) tatsächlichen Luftdrucks keine Rolle spielen. Entscheidend ist, dass z.B. bei Flugfläche 250 (FL 250) alle Flugzeuge, die dort fliegen, etwa 25.000 ft über der „Standardbezugsfläche“ (Flight Level System) mit einem vorgegebenen Kompasskurs fliegen. Eine Kollisionsgefahr wird bei entsprechender Vertikalstaffelung somit vermieden. Als Flugfläche (Flight Level) wird die Druckhöhe in der Standardatmosphäre bezeichnet.

1.4.2 Die Höhe über Grund (Absolute Altitude oder Altitude Above Ground Level) (AGL)

Die Höhe-über-Grund bedeutet die Höhe des Luftfahrzeuges lotrecht über dem Boden. Sie ist somit von Bodenerhebungen abhängig. Diese Höhe würde auch angezeigt, wenn Funkmessverfahren oder Radar- Höhenmesser verwendet werden.

1.4.3 Die wahre (tatsächliche) Höhe (True Altitude) (MSL)

Sie stellt die Höhe eines Objektes (z.B. eines Berges oder auch Flugzeuges) über dem Meeresspiegel dar. Ihr entsprechen die kartografischen Höhenangaben Abb. 1.17.

- A) zeigt die Druckhöhe: Bei Standardbedingungen in Meereshöhe beträgt die Druckhöhe des Luftfahrzeuges 5.000 ft.
- B) hingegen zeigt die absolute Höhe des Luftfahrzeuges über Grund. Sie beträgt 3.000 ft (GND).
- C) zeigt die wahre Höhe über dem Meeresspiegel (MSL).

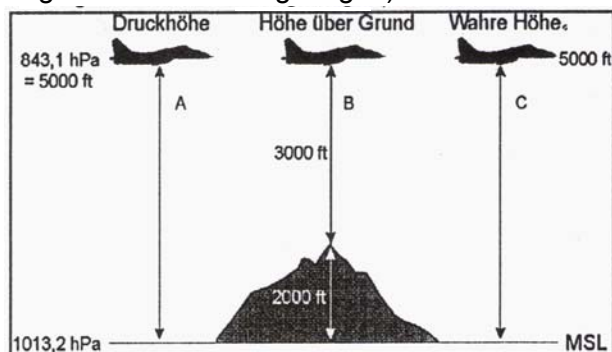


Abb. 1.17: Die gebräuchlichsten Höhenmessungen

Während es sich bei der Angabe „wahre Höhe“ um eine stets nachvollziehbare Höhe, wie beispielsweise der Höhe eines Kirchturms, handelt, ist die „Druckhöhe“ eine variable, von den Luftdruckverhältnissen abhängige Größe. In Abb. 1.17 fliegen die beiden Flugzeuge (rechts und links außen) in 5.000 ft gleich hoch.

Höhe in ft	Höhe in m	Druck A hPa	Druck B hPa	Δp
0	0	913	1.013	100
328	100	900	1000	100
656	200	888	988	100
984	300	876	976	100
1312	400	864	964	100
1640	500	852	952	100
1877	572	843	943	100
1969	600	840	940	100
2297	700	829	928	100
2625	800	817	917	99
2953	900	806	905	99
3281	1.000	795	894	99
3609	1100	784	883	99
3937	1200	773	872	99
4265	1300	762	861	99
4593	1400	752	850	98
4823	1.470	745	843	98
4921	1.500	742	840	98
6562	2.000	692	789	97
8202	2.500	646	741	96
9843	3.000	602	696	94
11483	3.500	562	654	92
13123	4.000	524	615	90
14764	4.500	489	577	88
16404	5.000	457	542	86
18045	5.500	426	510	84
19685	6.000	397	479	81
21325	6.500	371	450	79
22966	7.000	346	423	76
24606	7.500	323	397	74
26247	8.000	301	373	72
27887	8.500	281	350	69
29528	9.000	262	329	67
31168	9.500	245	309	64
32808	10.000	228	290	62
49213	15.000	114	156	41
65617	20.000	57	83	26
82021	25.000	29	45	16
98425	30.000	14	24	10
114829	35.000	7	13	6
131234	40.000	4	7	3
147638	45.000	2	4	2

Abb. 1.18:
Einfluss von Luftdruckänderungen auf Meereshöhe für zwei Luftdrücke, 913 hPa und Normaldruck 1.013 hPa auf die Drücke in unterschiedlichen Höhen, bestimmt mit der barometrischen Höhenformel für trockenes Gas und gleich bleibende Temperatur

Der Druck beträgt in 4.823 ft 843 hPa, $p = 1.013$ hPa (Druck B) bei NN vorausgesetzt. Bei einer Luftdruckänderung in Meereshöhe (NN) um 100 hPa ($p_0 = 913$ hPa), flöge das Flugzeug bei demselben Umgebungsdruck von 843 hPa, dann allerdings nur in 1.877 ft. Die Höhendifferenz zwischen 4.823 ft und 1.877 ft von 2.946 ft (898 m) lässt die Wichtigkeit erkennen, dass die Luftdruckveränderungen während des Fluges, speziell bei Flügen in niedrigen Höhen, ständig einkalkuliert werden müssen. (Merksatz der Piloten: „Von Hoch ins Tief, geht schief!“). Die nach der barometrischen Höhenformel berechneten Werte für die Drücke 913 hPa, 1.013 hPa bei NN und die Druckdifferenzen zur jeweiligen Höhe sind der Abb. 1.18 zu entnehmen. (Ideales Gas und Temperaturkonstanz wurden vorausgesetzt). In Deutschland wird normalerweise ab FL 50 (als unterste Flugfläche, die abhängig vom Luftdruck in NN ist) geflogen. Im Flugzeug wird daher über 5.000 ft MSL bzw. mindestens 2.000 ft GND der Standarddruck im Höhenmesser eingestellt, also 1.013,25 hPa oder 29,92 inchHg. Seit der Einführung von barometrischen Höhenmessern erkannte man die Notwendigkeit der Standardisierung bezüglich der Beziehung des Verhältnisses von barometrischem Druck zur Höhe. Dieser Standard dient als Basis für die Kalibrierung von Höhenmessern, so dass vergleichbare Messungen möglich werden.

Die Vorläufer der Internationalen Standard Atmosphäre (ISA) waren:
 1924 die erste international anerkannte Standard Atmosphäre und
 1962 die US Standard Atmosphäre.

Die ISA repräsentiert annähernd die Druck- und Temperaturdurchschnittscharakteristik am 45. nördlichen Breitengrad. Das Verhältnis zwischen Druck und Höhe, das durch diesen Standard definiert wird, basiert auf der (idealisierten) Annahme, dass:

1. die Luft ein trockenes, schwebstofffreies Gas ist und eine bestimmte Zusammensetzung hat (Abb.1.1),
2. die Erdbeschleunigung (Schwerkraft) konstant $9,80665 \text{ m/s}^2$ ist,
3. der Druck in Meereshöhe 1.013,25 mbar oder 1.013,25 hPa (entsprechend 14,696 psi) beträgt,
4. die Dichte der Atmosphäre in Meereshöhe $1,225 \text{ kg/m}^3$ beträgt und
5. das Temperatur-Höhen-Profil wie folgt aussieht:
 - Temperatur in Meereshöhe 288,15 K (+15 °C)
 - Temperaturabfall: 6,5 K/km bis zur Tropopause (ca. 2 °C/1.000 ft)
 - Höhe der Tropopause bei 36.000 ft
 - Tropopause gleich bleibende Temperatur von -56,5 °C

Ein Auszug aus der ISA mit gerundeten Werten ist zusammen mit den berechneten Sauerstoffteildrücken in der Abb. 1.7 tabellarisch zusammengestellt.

1.5 Die solare Einstrahlung

1.5.1 Sonnenstrahlung

Die Energie, die über die direkte Verbindungslinie von der Sonne zur Erde übermittelt wird, ist mit $SC = 1368 \text{ W/m}^2$ angegeben. SC steht für Solarkonstante (Roedel, 1992). Da die Bahn der Erde um die Sonne elliptisch ist, schwankt dieser Wert um $\pm 3,4\%$ mit einem Maximum im Januar (Sonnennähe) und einem Minimum im Juli (Sonnenferne). Das Strahlenbündel bedeckt $\frac{1}{4}$ der Erdoberfläche, so dass die durchschnittliche Einstrahlung auf die Erdoberfläche mit 342 W/m^2 anzusetzen ist. Der Faktor $\frac{1}{4}$ berechnet sich folgendermaßen: Das Strahlenbündel, welches die Erde trifft hat eine Querschnittsfläche von $R^2 \cdot \pi$ ($R =$ Radius der

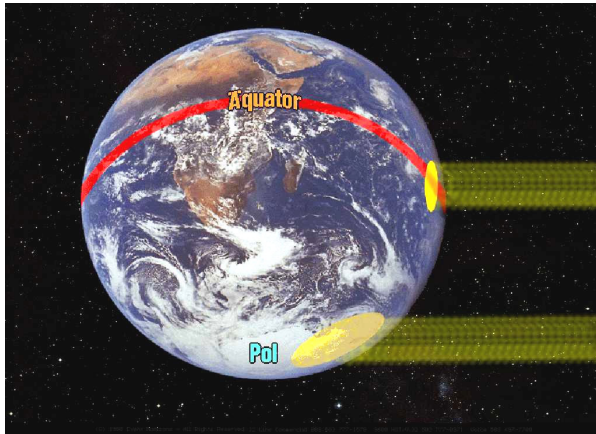


Abb 1.19: Sonneneinstrahlung am Äquator und am Pol

Erde), die bestrahlte Erdoberfläche ist $4R^2 \cdot \pi$ der Quotient aus beiden ist $\frac{1}{4}$. Die Einstrahlung am Äquator zeigt während des Jahres einen ausgeglichenen Verlauf. Die höchste Einstrahlung während eines 24-Studentages während der Sonnenwende weist allerdings die Polregion auf, obwohl die Sonne dann höchstens um 23° über dem Horizont zu sehen ist, allerdings 24 Stunden lang. Die Strahlungsintensität ist am Äquator wesentlich größer als in den Polregionen auf Grund der geringeren Einstrahlwinkel. (Abb. 1.19)

1.5.2 Ultraviolette (UV-)Strahlung

Wie bereits geschildert, findet man ab 10 bis 50 km Höhe die Ozonschicht. In dieser Region ist die Strahlungsenergie des einfallenden UV-Lichts (harte UV-Strahlung) so hoch, dass O_2 gespalten werden kann und O_3 gebildet wird. Die UV-Strahlung wird durch diesen Vorgang absorbiert, die gaskinetische Temperatur steigt in diesem Bereich an. Die UV-Strahlung gilt für den Menschen als Hautkrebs erzeugend. Ozon selbst ist chemisch gesehen einer der aggressivsten und giftigsten Stoffe neben Fluor und ist daher schon in geringsten Konzentrationen gesundheitsgefährdend.

Anmerkung: In den letzten Jahren ist nicht nur das Ozonloch auf der Südhalbkugel der Erde, messbar auch durch eine Zunahme der UV-Intensität am Erdboden, sondern auch die Höhe der Ozonkonzentration der Luft am Boden bei hohen Lufttemperaturen bei Sonnenschein im Sommer im Gespräch. Die Genese des erhöhten Bodenzozons begründet man insbesondere mit den angestiegenen Konzentrationen von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen neben den organischen Fotooxidantien.

1.6 Medizinische Aspekte für den Aufenthalt des Menschen im erdnahen und erdfernen Raum

Es wurde eingangs beschrieben, dass mancherlei Erfahrung und vor allem solche negativer Natur dazu geführt haben, sich intensiv mit der Physik der Atmosphäre zu beschäftigen. Im Folgenden soll zusammenfassend dargestellt werden, welche Bedingungen in der Höhe vorliegen und welche Anstrengungen unternommen werden müssen, den Menschen in verschiedenen Bereichen der Atmosphäre so zu schützen, dass seine Gesundheit nicht bedroht wird. Es soll nicht nur der Bereich abgehandelt werden, in dem Flugbetrieb stattfindet, sondern auch der Raum darüber, der für die Raumfahrt von Bedeutung ist. Flugmedizin und Raumfahrtmedizin sind in der heutigen Zeit als untrennbar anzusehen. Während sich der ungeschützte, gesunde Mensch bis ca. 3.000 m (10.000 ft) Höhe ohne Probleme dank eigener Regulationsmechanismen bewegen kann, sind bei darüberliegenden längeren Expositionen bis 15 km (50.000 ft) höhenabhängig Zugabe von reinem Sauerstoff (bis 34.000 ft) bzw. ein Atemsauerstoffangebot mit erhöhtem Druck (Druckatmung) (bis 40.000 ft) oder aber eine Druckkabine in Kombination zu den verschiedenen gestaltbaren Sauerstoffgaben je nach Druck in der Druckkabine für die Erhaltung der vollen Funktionsfähigkeit des Menschen erforderlich. Die Druckbedingung in 15 km Höhe ohne weitere Schutzmaßnahmen lassen keine Sauerstoffaufnahme zu, die mit dem Leben vereinbar wäre. In 50.000 ft Höhe ist der Umgebungsdruck von 117 hPa gleich dem der Summe des Partialdrucks von CO_2 und Wasser-

dampf in der Expirationsluft, d.h. Umgebungsluft kann nicht mehr in die Lunge. Bei 20 km fällt der Luftdruck auf 62,6 hPa. Die Körperflüssigkeiten mit einer Temperatur von 37 °C beginnen zu siedeln (Ebullismus!). Bei mehr als 40 km ist der Bereich der Strahlenabsorption verlassen, primäre kosmische Strahlen bedrohen den Menschen. Bei 45 km ist man dem vollen UV-Spektrum ausgesetzt. Zwischen 60 und 80 km endet jegliche Aerodynamik. Zwischen 80 und 100 km geht der Raum auf Grund geringer Teilchendichte in totale Dunkelheit über. Gleichfalls gibt es hier auch keine Schallwellenausdehnung mehr (Dunkelheit und Stille des Raumes). Bei 120 km ist man oberhalb der Höhe, in der Meteoriten verglühen. Bei 200 km kann man nahezu von reinen Weltraumbedingungen sprechen. Es gibt keine Reibungswärme und keine Luftwiderstände mehr. Hier beginnt der Einfluss der Himmelsmechanik (Kepler'sche Gesetze).

1.7 Verwendete und weiterführende Literatur

- Allen, O. Die Atmosphäre. – Time Life Bücher: Planet Erde. 6. Aufl., Amsterdam, 1988
- Bach, H. W., Feil, H. A. Umweltbedingungen, Umweltprüfungen. Berlin, 1979
- Breuer, H. dtv-Atlas zur Physik. Bd. 1, (dtv: 3226), 6. Aufl., München, 2000
- DeHart, R. L. The atmosphere. In: Fundamentals of aerospace medicine / ed. by R. L. DeHart., 2. ed., Baltimore, S. 59 – 67, 1996
- Donn, W. L. Meteorology. 4. ed., New York, 1975
- dtv-Lexikon der Physik. Bd. 9, (dtv: 3048), München, 1971
- Fabian, P. Atmosphäre und Umwelt. 3. Aufl., Berlin, 1989
- Flight surgeon's guide. – AFM-161-18 – Department of the Air Force, Washington, 1968
- Harding, R. M. The earth's atmosphere. In: Aviation medicine / ed. by J. Ernsting, 3. ed., Oxford, S. 3 – 12, 1999
- Herrmann, J. dtv-Atlas zur Astronomie. (dtv: 3006), 14. Aufl., München, 2000
- ISA nach ICAO – 1993
- Kühr, W. Flugnavigation. (Der Privatflugzeugführer; 4a), Bergisch Gladbach, 1995
- Kühr, W. Grundlagen der Flugwetterkunde. (Der Privatflugzeugführer; 2), Bergisch Gladbach, 1995
- Mielke, H. dtv-Lexikon der Raumfahrt und Raketentechnik. (dtv: 3098), München, 1972
- Nicogossian, A. E., Gaiser, K. K. Beyond the biosphere. In: Fundamentals of Aerospace Medicine / ed. by R. L. DeHart, 2. ed., Baltimore, – S. 423 – 441, 1996
- Roedel, W. Physik unserer Umwelt. 3. Aufl., Berlin, 2000
- Wetter und Klima. – (Wie funktioniert das?). Mannheim, 1989

2 ATMUNG UND BLUTKREISLAUF

2.1 Einführung

Die Lungenatmung dient dem Gasaustausch zwischen der Umgebungsluft und den Zellen des Körpers. Blut und Blutkreislaufsystem erfüllen dabei unter anderem die Aufgaben eines Transportsystems. Sauerstoff (O_2) wird in der Lunge der Luft entnommen und via Kreislauf zu den Geweben transportiert. Nährstoffe werden in der Zelle durch Zugabe von O_2 „verbrannt“ (oxidativ abgebaut). Dadurch gewinnt der Körper die Energie zur Aufrechterhaltung seiner Lebensfunktion. Das dabei freiwerdende Kohlendioxid (CO_2) wird an das Blut abgegeben, zur Lunge transportiert und dort an die Umgebungsluft überführt. Für die Flugphysiologie und -medizin ist die Atmung von besonderer Bedeutung, da der für die Erhaltung des Lebens notwendige Gastransport wesentlich von den Gas(teil-)drücken abhängt, die sich z.B. mit abnehmendem Luftdruck (in zunehmender Höhe) ändern.

2.2 Atmungsorgane und Atemwege

Die äußere Atmung geschieht über das paarig angelegte Organ Lunge und über die zuführenden Luftwege, den Respirationstrakt. Von außen nach innen besteht dieser aus der Mund- und Nasenhöhle (mit den Nasennebenhöhlen), dem Rachenraum (Pharynx), dem Kehlkopf (Larynx), der Luftröhre (Trachea), die sich in beide Lungenflügel verzweigt und verästelt (Bronchialbaum) bis hin zur kleinsten Funktionseinheit, dem Lungenbläschen (Alveole). Vgl. hierzu Abb. 2.1.

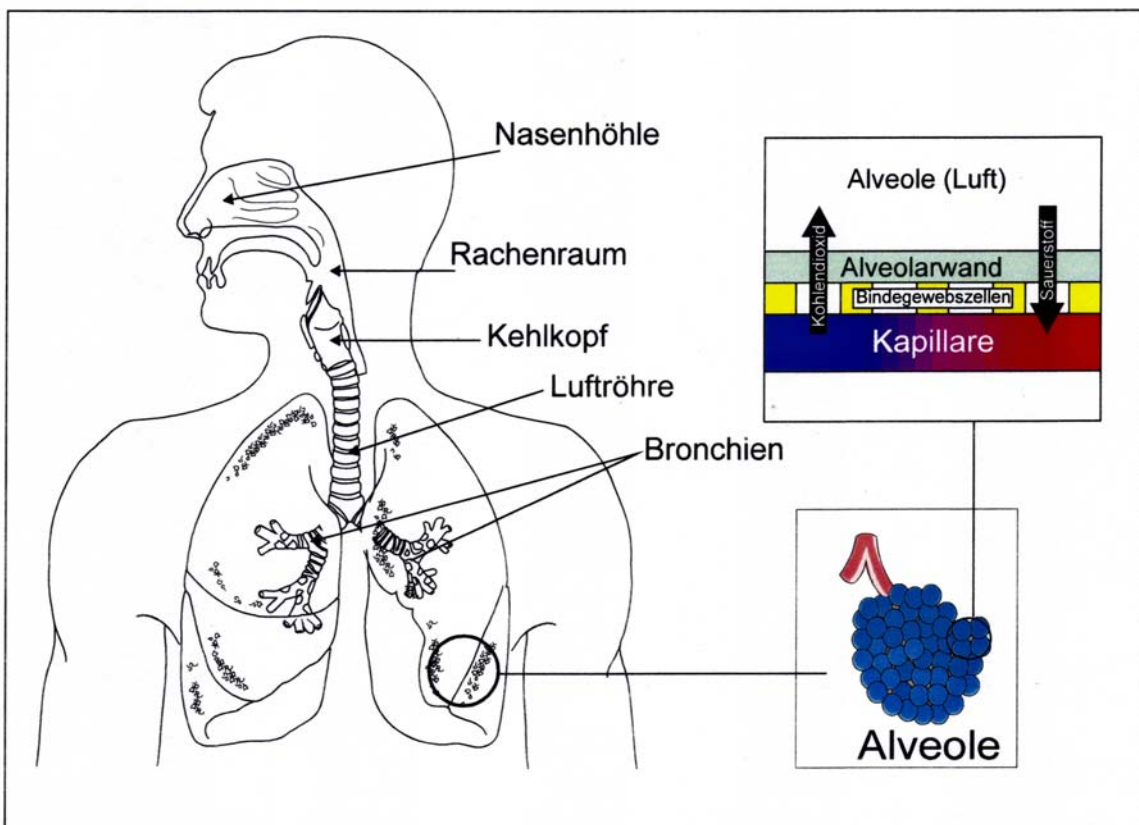


Abb. 2.1: Atmungssystem mit Gasaustausch

Die Atemluft wird auf dem Weg in die Alveolen erwärmt und befeuchtet (mit Wasserdampf bei $37\text{ }^\circ\text{C}$) sowie im Nasenbereich als auch im Bronchialbaum von Staub- und Schmutzpartikeln gereinigt. Diese bleiben im Bronchialschleim hängen und werden vom Flimmerepithel in

Richtung Luftröhre zurücktransportiert und abgehustet. Feinste Partikel werden von der zellulären Immunabwehr (weiße Blutzellen) des Körpers eliminiert. Nach dem Einatmen findet der eigentliche Gasaustausch in den Alveolen nach dem Diffusionsprinzip statt. Die Oberfläche dieser Grenzschicht hat eine sehr große Ausdehnung (ca. 80 bis 100 m²). Dies wird durch die starke Kammerung des Lungengewebes in den Alveolen erreicht.

2.2.1 Atemmechanik

Die für den Gasaustausch erforderliche Belüftung der Alveolen (Ventilation) wird durch einen rhythmischen Wechsel von Einatmung (Inspiration) und Ausatmung (Expiration) erreicht. Beide Lungen liegen in der Brusthöhle (Thorax), die durch den korbformigen Aufbau der Rippen (Brustwand) einerseits und das Zwerchfell als Begrenzung zum Bauchraum andererseits gebildet wird. Das Lungengewebe enthält reichlich elastische Fasern, die eine Zugspannung von der Lungenoberfläche zum Hilus aufbauen. Ein Kollabieren der Lungen wird durch den permanenten Unterdruck im Thorax zwischen dem Lungenfell (pleura visceralis) und dem Brustfell (pleura parietalis) verhindert.

2.2.1.1 Die Inspiration (aktive Atemphase)

Bei Anspannung der Zwerchfellmuskulatur bewegt sich das Zwerchfell nach unten. Die Lunge folgt und wird entgegen ihrer eigenen Zugspannung ausgedehnt, d.h. Luft strömt durch den Bronchialbaum von außen ein (Zwerchfellatmung). Gleiches geschieht, wenn sich durch Anspannung der Zwischenrippenmuskulatur (Mm. intercostales externi) der Brustkorb hebt (Brustatmung) und damit das Lungenvolumen vergrößert.

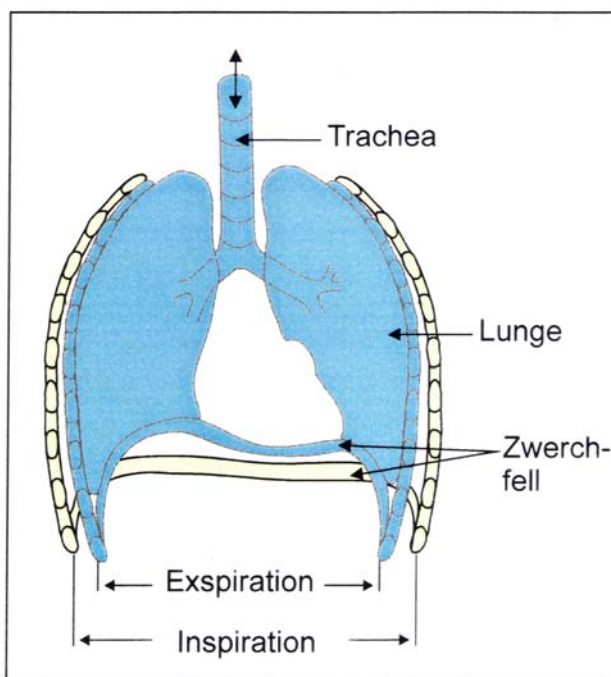


Abb. 2.2: Atemmechanik

die Ausatmung nur aktiv unter Muskelanspannung bewerkstelligt werden kann. Diese Art zu atmen ist anstrengend und rasch ermüdend, weil die hierzu benötigte Muskulatur relativ schwach ausgebildet ist. Gegen einen Überdruck von 33 - 40 hPa (25 - 30 mmHg) kann ohne technische Hilfsmittel nicht mehr ausgeatmet werden. Fällt in einem Kampfflugzeug der Kabinendruck ab (z.B. bei einer rapiden Dekompression), wird vom Atemluftregler in Höhen über 38.000 ft aus Sicherheitsgründen reiner Sauerstoff automatisch unter konstantem Überdruck über die Maske abgegeben, um das Eintreten einer Sauerstoffmangelkrankheit zu vermeiden.

Passive Druckbeatmung (PPB = Positive Pressure Breathing) wird auch als Schutz gegen die Wirkung hoher Beschleunigungskräfte (Anti-G-Schutz) eingesetzt. In der Regel wird ab ca. 2 bis 4 G eine lineare Atemgasdruck-

2.2.1.2 Die Expiration (passive Atemphase)

Bei der Ausatmung wird die Luft durch die Senkung des Brustkorbes, durch Erschlaffen des Zwerchfells sowie durch die Eigenelastizität der Lunge herausbefördert. Allerdings kann die Ausatmung durch Kontraktion der weniger kräftigen inneren Zwischenrippenmuskeln (Mm. Intercostales interni) und mit Hilfe der Bauchmuskeln, der Antagonisten des Zwerchfells, forciert werden. Das wird vor allem notwendig, wenn gegen erhöhte Widerstände ausgeatmet werden muss („Bauchpresse“).

In der Fliegerei wird die Druckatmung in bestimmten Notsituationen erforderlich: Bei der **Druckatmung** wird die Atemmechanik umgekehrt: Die Lunge wird von außen z.B. mittels Maske durch einen Überdruck passiv aufgeblasen, während

steigerung bis maximal 80 hPa bei 8 - 9 G_z vorgenommen. Um gegen einen solchen Überdruck ausatmen zu können, wurden Druckwesten entwickelt, die einen künstlichen thorakalen Gegendruck von 80 - 93 hPa (60 - 70 mmHg) aufbauen. Weitaus gefährlicher aber ist für den Piloten die durch die Umkehr der Atemmechanik auftretende unerwünschte Steigerung der Atemtiefe und Atemfrequenz bei sog. Hyperventilation (vgl. 2.2).

2.2.2 Regelung der Atmung

Unter der Atmungsregulation versteht man ganz allgemein die optimale Einstellung (Regelung) der Atmung auf die jeweilige Stoffwechselsituation. Atemzugvolumen (Atemtiefe) und Atemfrequenz, zusammen als Atemzeitvolumen (AZV) bezeichnet, sind dabei die variablen Stellgrößen für den Gasaustausch zwischen Körper und Umwelt und werden vom ZNS im Stammhirnbereich geregelt. Sinn dieser Regelung ist es vor allem, die drei wesentlichen Regelgrößen Kohlendioxid, Sauerstoff und pH-Wert im Blut möglichst konstant zu halten. Spezielle Sensoren messen dabei ständig diese Regelgrößen, die zur Aufrechterhaltung der Vitalfunktionen möglichst konstant bleiben sollen. Der „Regler“ ZNS vergleicht die einlaufenden „Meldungen“ (Ist-Werte) mit den jeweiligen Bedarfs- (oder Soll-) Werten und stellt bei auftretenden Abweichungen durch Änderung des Atemzeitvolumens korrigierend nach.

Voraussetzung für eine wirksame Regelung der Atemtätigkeit ist also die ständige Messung und (afferente) Weitermeldung der zwei Atemgaskonzentrationen des arteriellen CO₂- und O₂-Spiegels sowie des pH-Wertes (zur Aufrechterhaltung des Säure-Basen-Gleichgewichts) im Blut. Verändern sich diese Werte, weil z.B.

- bei vermehrter körperlicher Arbeit und damit einhergehend einer höheren Stoffwechselleistung mehr CO₂ anfällt oder
- bei einem Aufstieg in größere Höhen der O₂-Teildruck der Luft und damit auch der im Blut abnimmt oder
- durch andere Ursachen (neben der respiratorischen Komponente) z.B. bei Durchfall, Hunger, schwerster Muskelarbeit, Schockzuständen, Nierenversagen, Diabetes, sich das Säure-Basen-Gleichgewicht (pH-Wert) verschiebt,

wird dies durch Chemorezeptoren erfasst und weitergemeldet. Die Rezeptoren sitzen entweder direkt im Stammhirn (chemosensible Areale in der Medulla oblongata) oder aber in der Peripherie (z.B. Ganglien am Aortenbogen oder in der Carotis-Verzweigung). Von dort erfolgt auf verschiedenen Wegen (nerval, hormonell) die Regelung der Lungenventilation.

Dabei gelten folgende Beziehungen:

- Ein **Ansteigen des CO₂-Teildrucks** (Pco₂) im Blut (Hyperkapnie) bewirkt eine Erhöhung der Ventilation;
- ein **Abfall der CO₂-Spannung** (Pco₂) im Blut (Hypokapnie) bewirkt eine Verminderung des Gasaustausches (Verflachung, Verlangsamung der Atmung bis zum Atemstillstand);
- ein **Abfall des O₂-Teildrucks** (Po₂) bewirkt, wenn auch weniger stark ausgeprägt, eine Ventilations- und Herzfrequenzerhöhung. Bei der Atmung von 100 % O₂ ist keine Ventilationsverminderung bekannt;
- ein **Absinken des pH-Wertes** im Blut (unter den Normwert von 7,4 [Azidose]) bewirkt eine starke Steigerung des Atemzeitvolumens;
- ein **pH-Anstieg** (Alkalose) führt dagegen zu einer (weniger ausgeprägten) Abnahme des Atemzeitvolumens.

Alle Regelstrecken beeinflussen sich darüber hinaus direkt oder indirekt auch gegenseitig.

Ferner erhält das Atemzentrum Informationen über eine Reihe von unspezifischen Reizen. Hierzu gehören beispielsweise die Körpertemperatur (Fieber, aber auch Hypothermie), Schmerz und bestimmte Hormone (z.B. Adrenalin). Das Atemzentrum ist ferner den höheren

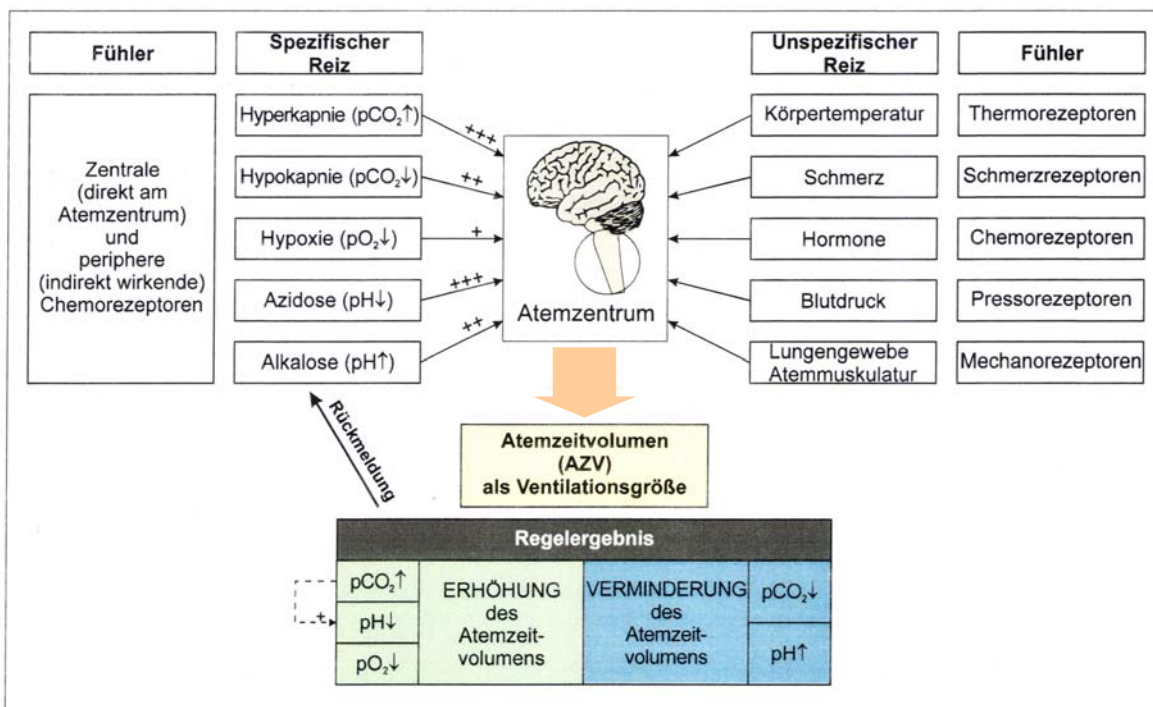


Abb. 2.3: Regulation der Atemtätigkeit

(cortikalen) Zentren zugeordnet: auch ein bewusster, willentlicher Eingriff in die Atemtätigkeit kann erfolgen. Abb. 2.3 gibt eine Übersicht über diese wichtigen Zusammenhänge der Regulation der Atemtätigkeit.

2.2.3 Gaswechselgrößen

Der Umfang der Ventilation richtet sich nach der psychophysischen Beanspruchung bzw. Leistung. Während in Ruhe etwa 16 Atemzüge/min von je etwa 500 ml ausgeführt werden, was einem Atemminutenvolumen (Summe der Atemzugsvolumina über 1 Minute) von 8 l/min entspricht, kann bei körperlicher Anstrengung ein Vielfaches davon erforderlich werden, um den Sauerstoffbedarf zu decken und zugleich das vermehrt anfallende Kohlendioxid abzuatmen. Der Atemgrenzwert, d.h. die maximale Leistung der Lunge, liegt bei etwa 150 l/min. Der Peak Flow wird mit 3,3 l/s angegeben.

Das Atemvolumen pro Zeiteinheit wird somit durch die Atemtiefe und die Atemfrequenz bestimmt und als **Atemzeitvolumen (AZV)** bezeichnet.

Unter **Vitalkapazität (VK)** der Lungen versteht man die nach einer maximalen Expiration größtmöglich inspiratorisch aufzunehmende Luftmenge. Sie liegt beim gesunden, leistungsfähigen Erwachsenen (in Abhängigkeit von Körpergröße, Alter, Gewicht und Trainingszustand) zwischen 5 und 7 Liter.

Unter **Totalkapazität (TK)** versteht man das Gesamtfassungsvermögen der Lunge, das um etwa 1,5 l höher liegt als die VK: Selbst nach tiefster Ausatmung verbleibt entsprechend dem Rauminhalt des Brustkorbes noch das sog. Residualvolumen in der Lunge. Abb. 2.4 stellt diese Volumina als Übersicht zusammen.

Totalkapazität: ca. 7,5 Liter	Inspiratorisches Reservevolumen	ca. 3,0 Liter	Vitalkapazität: ca. 6 Liter
	Bereich der normalen (Ruhe)-Atmung	ca. 0,5 Liter	
	Expiratorisches Reservevolumen	ca. 2,5 Liter	
	Residualvolumen	ca. 1,5 Liter	

Abb. 2.4: Gaswechselgrößen (in Litern) (Beispielrechnung für TK=7,5 l und VK=6 l)

2.2.4 Die Zusammensetzung der Atemluft

Während die atmosphärische Luft 21 % Sauerstoff (entsprechend einem Teildruck von $P_{O_2} = 160 \text{ mmHg} = 213 \text{ hPa}$) und 78 % Stickstoff (entsprechend einem Teildruck von $P_{N_2} = 593 \text{ mmHg} = 790 \text{ hPa}$) enthält (Abb. 1.1 und 2.5 Spalte A), erfährt ihre Zusammensetzung während der Lungenpassage eine Veränderung.

Bei der Einatmung wird sie in den oberen Luftwegen zunächst befeuchtet, d.h. mit Wasserdampf gesättigt. Der Wasserdampfdruck P_{H_2O} beträgt 62,5 hPa (47 mmHg) bei einer Körpertemperatur von 37 °C. In der Lunge selbst, nämlich in den Lungenbläschen (Alveolen), tritt eine weitere Verschiebung auf (P_{CO_2} ist mit 53,3 hPa anzusetzen):

Durch die Diffusion des O_2 in das Blut (vgl. Abb. 2.7) verringert sich der O_2 -Gehalt der Atemluft fortlaufend, während das CO_2 , das aus dem Blut herausdiffundiert, in seinem Anteil von 0 % auf 5 % ansteigt (vgl. Abb. 2.5 Spalte C).

Abb. 2.5 und 2.7 zeigen die beträchtliche Änderung der Zusammensetzung der Atemgase in den verschiedenen Abschnitten der Transportstrecke.

Dadurch beträgt in der Alveole der Volumenanteil des

- Sauerstoffs nur noch 13,5 % und des
- Kohlendioxids nunmehr 5 %.

Für die Berechnung des Sauerstoff-, bzw. Kohlendioxidpartialdrucks in der Alveole siehe Kapitel 3.1.2

	A Atmosphärische Luft		B Trachealluft		C Alveolarluft	
	Vol %	Teildruck hPa	Vol %	Teildruck hPa	Vol %	Teildruck hPa
Sauerstoff	21	213	20	200	13,5	137
Stickstoff	78	790	73	741	74	750
Wasserdampf	-	-	6	62,5	6	62,5
Kohlendioxid	-	-	-	-	5	53
Edelgase	1	10	1	10	1	10

Abb. 2.5: Näherungswerte der Luft in der Atmosphäre und in der Lunge (Seehöhe)

Für einen Höhengestieg gilt diese Berechnung der alveolären Partialdrücke nicht mehr, weil sich durch die kompensatorischen Maßnahmen von Atmung und Kreislauf ständige Veränderungen des Verhältnisses von CO_2 -Abgabe und O_2 -Aufnahme ergeben (vgl. Abb. 2.8). Mit 74 % Volumenanteil ist der Stickstoff-Teildruck in der Alveole besonders hoch. Deshalb ist (nach HENRY) auch eine große Menge N_2 in den Körperflüssigkeiten gelöst. Da der Stickstoff als Inertgas an den Verbrennungsvorgängen (oxidativer Stoffwechsel) der Körperzellen aber nicht beteiligt ist, besteht ein Lösungsgleichgewicht, solange nur der Druck der Atemluft sich nicht ändert.

2.2.5 Funktionskette Atmung und Kreislauf, Gasaustausch und Diffusionsgefälle

Die Umgebungsluft erreicht die Körperzelle nicht direkt. Vielmehr erfolgt die Übertragung der Atemgase O_2 in den Körper und CO_2 aus dem Körper in mehreren Schritten. Für den Gastransport sind die Atemorgane und der Blutkreislauf eng zu einer Funktionseinheit verbunden. Die einzelnen Transportschritte sollen am Beispiel des Sauerstoff- und Kohlendioxidtransports aufgezeigt werden (Abb. 2.6):

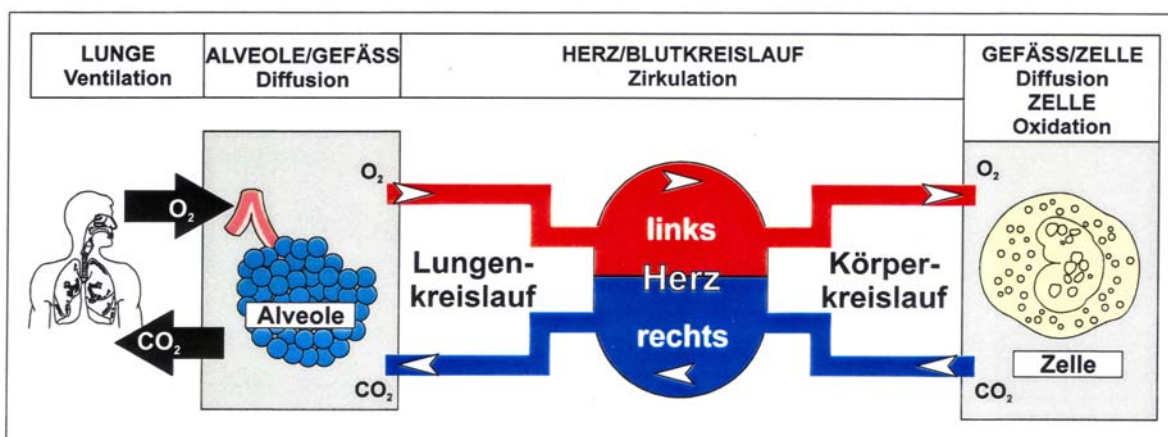


Abb. 2.6: Gastransport

Ventilation:

Gasförmiger Transport von O_2 bzw. CO_2 über die Luftwege der Lunge (kleinste Lungenbläschen, Alveolen) durch Ein- und Ausatmung.

Diffusion:

Von der alveolaren Grenzmembran gelangt der Sauerstoff passiv, d.h. einem Konzentrationsgradienten folgend, in das vorbeifließende Kapillarblut und geht dort zunächst physikalisch in Lösung. Diesen Vorgang nennt man Diffusion. Der weitaus größte Teil O_2 diffundiert anschließend durch die Erythrozytenmembran, um schließlich sein Transportsystem, das Hämoglobin (Hb), zu erreichen. Der mittlere gesamte Diffusionsweg beträgt beim Gesunden 1 bis 2/1000 mm; die mittlere Diffusionszeit liegt bei etwa 0,75 s.

Chemische Bindung:

Mit dem roten Blutfarbstoff Hämoglobin (Hb) geht O_2 innerhalb der Erythrozyten eine chemische (schwache) Verbindung zum Oxyhämoglobin (HbO_2) ein. Vgl. O_2 -Sättigungskurve (Abb. 2.11).

Zirkulation:

Über den Weg des Blutkreislaufs gelangt O_2 schließlich zu den Körperzellen der einzelnen Organe. An der Körperzelle angelangt, folgt die in Abhängigkeit des O_2 -Partialdruckunterschiedes verlaufende Abtrennung des O_2 -Moleküls vom HbO_2 mit anschließender Diffusion in die Zelle. Der Rücktransport des freiwerdenden Kohlendioxids aus der Körperzelle in die Außenluft erfolgt entsprechend. Der überwiegende Teil CO_2 wird innerhalb des Blutkreislaufs chemisch als Bikarbonat im Plasma bzw. am Erythrozyten gebunden, dann zur Diffusion über die Alveolarwand wieder als CO_2 an die Luftwege der Lunge zur Abatmung abgegeben. Jeder Schritt dieser Gastransportstrecke kann Störungen unterliegen. In der Flugphysiologie ist das erwähnte Partialdruckgefälle für den Transport der Atemgase von großer Bedeutung, da die Teildrücke sich mit dem in der Höhe abnehmenden Luftdruck ändern. Die Diffusion von Atemgasen an durchlässigen Grenzmembranen stellt einen rein physikalischen Vorgang dar, der abhängig vom Druckgradienten ist.

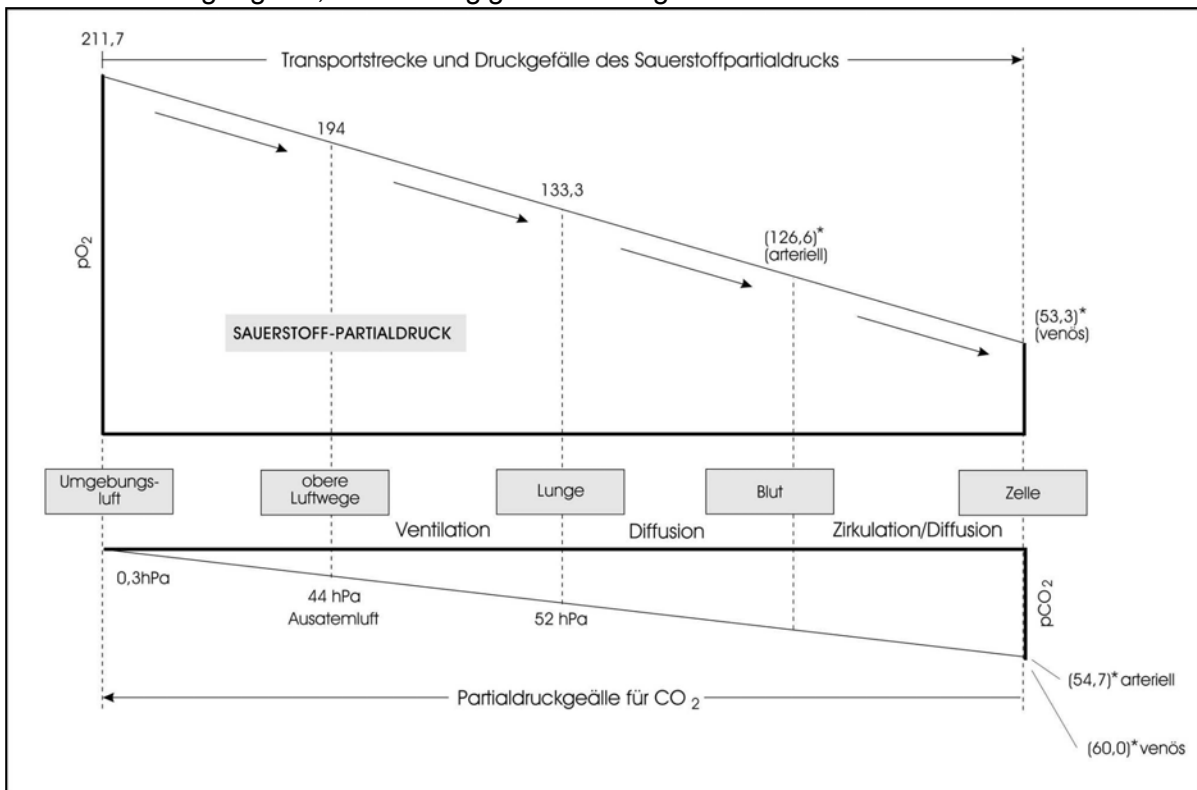


Abb. 2.7: Partialdruckveränderungen für O_2 und CO_2

Die Atemgasmoleküle bewegen sich dabei vom Ort des höheren Drucks zum Ort des niedrigeren Drucks. In Meereshöhe stellen sich diese Drucke für Sauerstoff (P_{O_2}) und Kohlendioxid (P_{CO_2}) wie in Abb. 2.7 dar. Sinkt mit zunehmender Höhe der Luftdruck und damit der Sauerstoff-Teildruck der Umgebungsluft, wird das Druckgefälle in Richtung Zelle vermindert, die Diffusion erschwert. Die Folge ist ab einer bestimmten Höhe die Sauerstoffmangelkrankheit. Z.B. beträgt in 10.000 ft Höhe der P_{O_2} der Luft nur noch 146 hPa (110 mmHg), der P_{O_2} der Alveolarluft nur etwa 81 hPa (61 mmHg). In 34.000 ft Höhe fällt der P_{O_2} der Luft gar auf einen Wert von nur 53 hPa (40 mmHg) ab, entspricht also etwa der O_2 -Spannung, welche die Zelle unter Normalbedingungen in (Meeresspiegelhöhe) aufweist.

Abb. 2.8 stellt dieses verminderte bzw. aufgehobene Druckgefälle bei Höhen von 10.000 ft und 34.000 ft im Vergleich zu Meereshöhe für den O_2 -Teildruckverlauf vereinfacht schematisch dar.

Deshalb muss oberhalb einer Höhe von 10.000 ft der Sauerstoffteildruck P_{O_2} der Atemluft durch zusätzliche O_2 -Beimischung angehoben werden. Ab 34.000 ft kann der erforderliche P_{O_2} nur noch durch Atmung von 100 % Sauerstoff erreicht werden. Oberhalb 40.000 ft muss der dann auch nicht mehr ausreichende P_{O_2} durch 100 % Sauerstoff mit Überdruck angehoben werden (vgl. hierzu auch Abb. 2.12 und Kapitel 4).

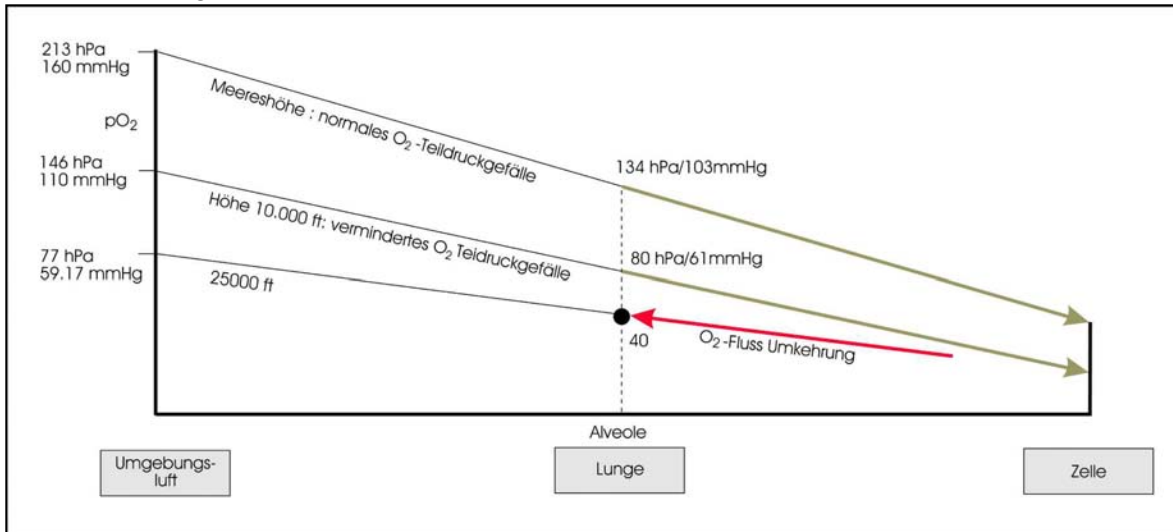


Abb. 2.8: Verminderung des Teildruckgefälles O_2 bei abnehmendem Teildruck (schematisch)

2.2.6 Hyperventilation

Unter Hyperventilation versteht man eine Steigerung der Atemtätigkeit, die über die jeweiligen Stoffwechselbedürfnisse hinausgeht.

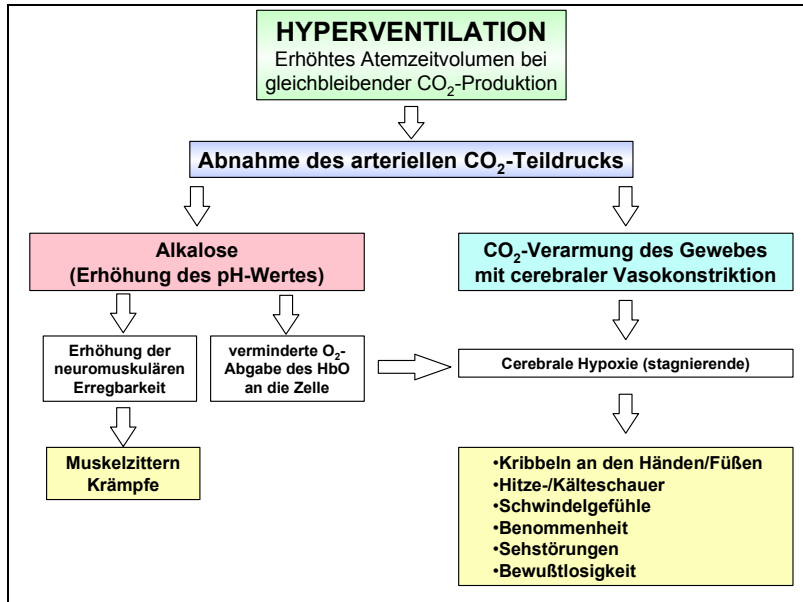


Abb. 2.9 : Verlauf der Hyperventilation

Wie im Abschnitt „Regelung der Atmung“ (2.4) bereits beschrieben, ist die Hyperventilation solange eine physiologische Antwort des Atemzentrums, wie sie dem Abbau eines CO_2 -Überschusses (z.B. bei körperlicher Anstrengung) oder der Beseitigung eines O_2 -Mangels bei z.B. hypoxischer Hypoxie dient.

Wenn also der O_2 - wie auch der CO_2 -Spiegel des Blutes im Normbereich liegt, aber dennoch bewusst oder unbewusst hyperventiliert wird, kann das zu einer ernsthaften Gefahr werden.

Folgende Ursachen können vorliegen:

- **willentlich**, bewusst, z.B. der Versuch, Tauchzeiten zu verlängern oder der falschen Vorstellung folgend, man könne durch vermehrte Atmung Sauerstoff „speichern“ und so eine bessere Ausdauer erreichen;
- **unbewusst** bei starker psychischer Erregung: bei Wut, Angst, Schreckreaktionen, also bei allen Gefahrensituationen;
- **unbewusst** bei anderen äußeren Einflüssen: wie z.B. plötzlich einsetzende Druckatmung nach rapidem Kabinendruckverlust oder ungewohnter Maskenatmung.

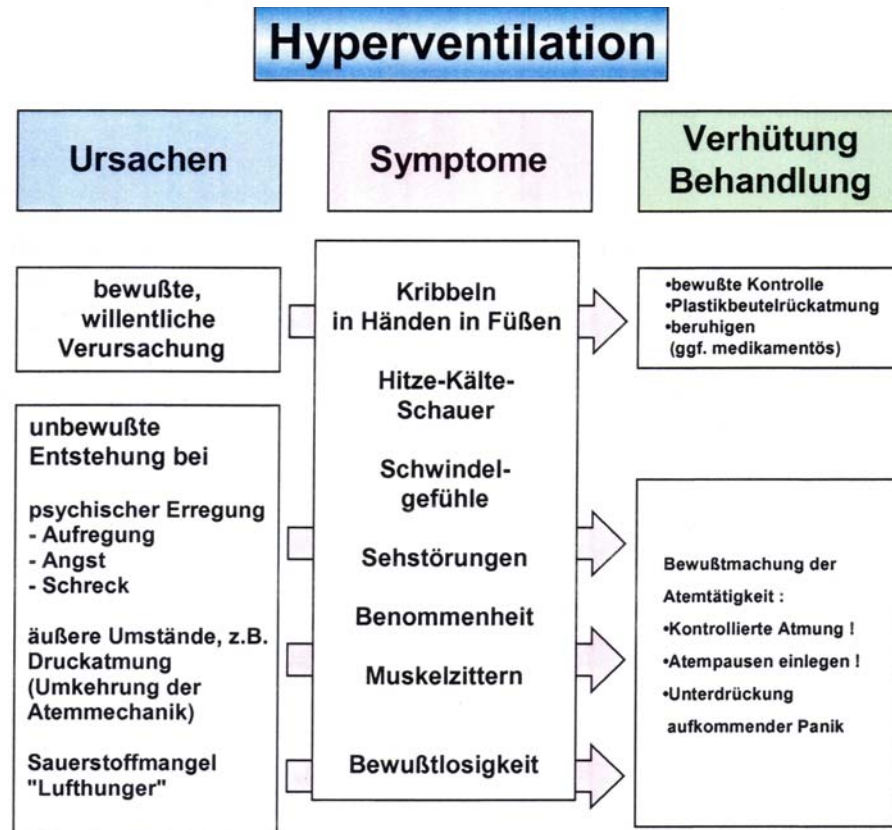


Abb. 2.10: Ursachen, Symptome u. Behandlung der Hyperventilation

Die **Gefahr** bei Hyperventilation liegt in der unerwünschten Senkung des CO₂-Teildrucks im Blut. Die Senkung des CO₂-Teildrucks führt zu einer Verschiebung des pH-Wertes zur alkalischen Seite (respiratorische Alkalose). Neben einer Engstellung der hirnersorgenden Gefäße verändert sich das O₂-Bindungsverhalten des Hämoglobins (vgl. Abb. 2.11). Dieses hält den Sauerstoff im alkalischen Bereich länger fest, so dass die Zelle trotz unverändert hohem O₂-Angebot minderversorgt wird. Deshalb ist hier auch keine Cyanose erkennbar! Erhöhte neuromuskuläre Erregbarkeit (Zittern, Muskelkrämpfe) bis zur Hyperventilationstetanie sind ebenso die Folge wie eine durch die gleichzeitige Engstellung der Hirngefäße im Extremfall einsetzende Bewusstlosigkeit. Abb. 2.9 gibt eine Übersicht über Ablauf und Wirkung der Hyperventilation. Derart schwere Folgen einer Hyperventilation müssen beim Fliegen unbedingt verhindert werden. Leider wird eine einsetzende Hyperventilation vom Betroffenen oft nicht oder zu spät bemerkt. Deshalb ist es besonders wichtig, dass die Symptome jedem Flugzeugführer bekannt sind. Ursachen, Symptome und Behandlung sind daher in Abb. 2.10 nochmals zusammengestellt. Die Ähnlichkeit dieser Symptome mit denen des O₂-Mangels ergibt sich aus der eben beschriebenen cerebralen O₂-Mangelsituation, obwohl (bei der Hyperventilation) über die Atemluft ausreichend Sauerstoff angeboten wird.

Wer im Flugzeug diese Symptome (oder einzelne davon) an sich erlebt, sollte zunächst einen echten O₂-Mangel ausschließen. Hier hilft ein Blick auf den Höhenmesser: Höhen unterhalb von 10.000 ft machen diesen unwahrscheinlich. Handelt es sich also nicht um O₂-Mangel, so sind folgende Gegenmaßnahmen umgehend zu ergreifen:

- Panik- und Angstgefühle bekämpfen!
- Atmung bewusst machen: Kontrolliert atmen, d.h. Pause zwischen Ein- und Ausatmung einlegen!
- Laut und anhaltend sprechen. Wer spricht, kann nicht einatmen, d.h. die Atemleistung wird reduziert.

2.3 Der Blutkreislauf

2.3.1 Aufgaben des Blutkreislaufs

Wie unter 2.1.6. bereits ausgeführt, erfüllen Blut und Blutkreislauf viele Transport- und Versorgungsfunktionen. Dazu gehören die Versorgung aller Organe/Körperzellen mit Sauerstoff und Nährstoffen sowie der Abtransport bei den Verbrennungsvorgängen anfallender Stoffwechselprodukte zur Ausscheidung aus dem Körper (über Lunge, Niere etc.).

Der Blutkreislauf erfüllt darüber hinaus viele weitere Aufgaben oder ist an diesen beteiligt, wie z.B. der Infektabwehr, Wärmeregulation, Signalübermittlung (durch Hormone) u.v.a.m. Hier interessieren jedoch besonders die Funktionen, die mit der Atmung und dem Transport der Atemgase in Zusammenhang stehen.

2.3.2 Das Blut

Das Blut stellt die Transportflüssigkeit dar, die im Blutgefäßsystem zirkuliert. Seine Gesamtmenge beläuft sich beim Erwachsenen etwa auf 5 Liter (6 - 8 % des Körpergewichts). Der größte Anteil (etwa 80 %) befindet sich im Kreislauf, vor allem in dessen venösem Niederdrucksystem mit Reservoirfunktion. Das Blut setzt sich zusammen aus

- dem Plasma (flüssige, gelöste Bestandteile),
- den Blutkörperchen (zelluläre Bestandteile), i.e.:
 - ⇒ rote Blutkörperchen (Erythrozyten), 5 Millionen/mm³
(O₂- u- CO₂-Transport),
 - ⇒ weiße Blutkörperchen (Leukozyten), 6.000/mm³
(Infektabwehr),
 - ⇒ Blutplättchen (Thrombozyten), 200.000/mm³
(Blutgerinnung).

Erythrozyten sind in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung. Sie haben Scheibenform bei einem mittleren Durchmesser von 7 µm. In Bezug zu ihrem Volumen haben sie eine große Oberfläche. Die gesamte Oberfläche aller roten Blutkörperchen eines Menschen würde ausgebreitet die enorme Fläche etwa eines halben Fußballfeldes ergeben. Diese Tatsache ist für die hohe Gasaustauschkapazität, d.h. für alle Diffusionsvorgänge von Bedeutung, vergleichbar zu der großen Gesamtoberfläche aller Alveolen.

2.3.3 Das Hämoglobin

Der für die Atmung besonders wichtige Bestandteil der Erythrozyten ist der rote Blutfarbstoff Hämoglobin (Hb). Es handelt sich um ein Protein, in dessen Molekül ein zweiwertiges Eisenatom (Fe) eingelagert ist. Letzteres kann O₂ in einer reversiblen Bindung lose anlagern. CO₂ kann sich an eine freie Aminogruppe (NH) des Hb-Moleküls anlagern (Carbamino-Verbindung). Befindet sich in der Atemluft jedoch das bei unvollständiger Verbrennung anfallende, (z.B. im Autoabgas) geruchlose Kohlenmonoxid (CO), so ist dessen Bindungsaffinität zu Hb (zu HbCO) etwa 230 mal größer als die des Sauerstoffs. Daraus erklärt sich die Giftig-

keit dieses Gases. Wird Sauerstoff nicht lose, sondern - i. Allg. unter der Einwirkung bestimmter Gifte - fest an das Hb-Molekül gebunden, so liegt eine echte Oxidation vor, die mit einem Wechsel der Zweiwertigkeit in die Dreiwertigkeit des Fe-Atoms verbunden ist. Es entsteht dann Met-Hämoglobin (MetHb), welches ähnlich dem COHb die O₂-Transportkapazität bedrohlich einschränkt (vgl. hypämische Hypoxie). Die im Blutplasma auf dem Wege der Diffusion physikalisch gelöste O₂-Menge reicht bei normalen Druckverhältnissen bei weitem nicht aus, den Bedarf der Körperzelle zu decken. Das Hämoglobin vermag jedoch im Vergleich dazu eine vielfache Menge des O₂ für die Dauer des Transportes zu binden. Bei Körpertemperatur und Meereshöhe vermag 1 g Hb 1,34 ml O₂ zu binden (Hüfner'sche Zahl). 100 g Blut enthalten normalerweise 16 g Hb, binden also 21 ml O₂, man bezeichnet diesen Wert auch als Sauerstoffbindungskapazität des Blutes. Sie stellt das maximale O₂-Bindungsvermögen des Hb in vivo dar.

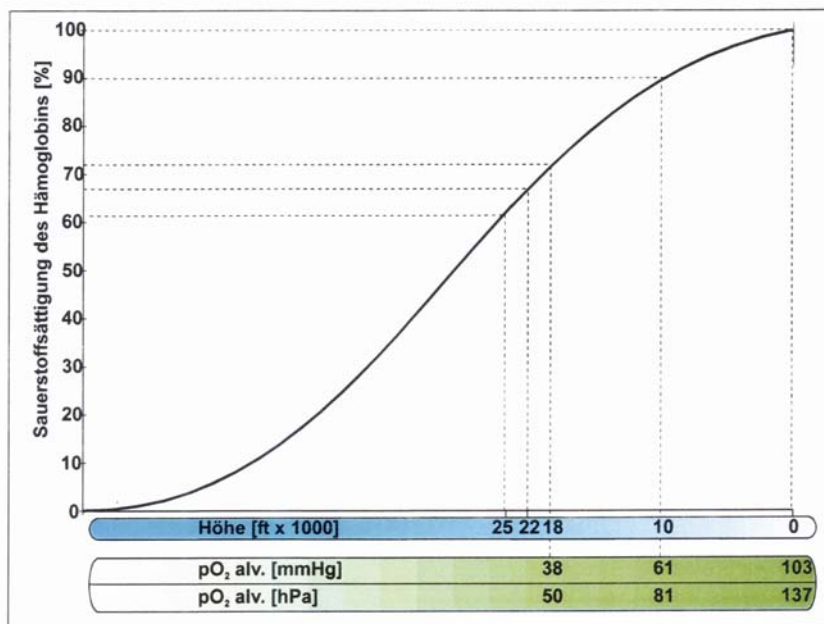


Abb. 2.11: Sauerstoffsättigungskurve (Oxyhämoglobin) bei Atmung von (nicht O₂-angereicherter) Kabinenluft

Für die Flugphysiologie interessiert besonders der Zusammenhang zwischen O₂-Teildruck (der mit zunehmender Höhe abnimmt) und der O₂-Sättigung des Blutes. Die Sauerstoffsättigung gibt an, wie viel Prozent des vorhandenen Hämoglobins mit O₂ gesättigt sind. Dieser sehr wichtige Zusammenhang von alveolärem O₂-Partialdruck (in mmHg bzw. hPa), der umgekehrt proportional zur Flug- (bzw. der „Kabinendruck“-höhe (in ft) ist, und der O₂-Sättigung mit HbO₂ (in %) ist in Abb. 2.11 als

Sauerstoffsättigungskurve dargestellt. Unter Normalbedingungen in Meereshöhe (1013 hPa Luftdruck, bzw. 137 hPa O₂-Teildruck in den Alveolen) sind etwa 98 % des Hb im arteriellen Blut als HbO₂ gesättigt. Mit zunehmender Höhe und abnehmendem Luftdruck geht mit dem absinkenden O₂-Teildruck auch die Hb-Sättigung mit O₂ zurück. Einige markante Punkte aus Abb. 2.11 sind in Abb. 2.12 als Tabelle nochmals zusammengestellt.

Der Wert von 90 % HbO₂ (entsprechend dem Höhenbereich bis 10.000 ft) stellt den Grenzwert einer ausreichenden Sauerstoffsättigung dar. Zunehmende Unterschreitungen führen zu Hypoxie. Die Sauerstoffsättigungskurve verläuft anfangs (von oben rechts nach unten links) relativ flach. Bis 10.000 ft finden wir den (beim Gesunden!) gefahrlosen Bereich. Ab 12.000 ft setzen erste O₂-Mangelsymptome ein („Störschwelle“). Bei 22.000 ft ist die „Kritische Schwelle“ erreicht. Den Bereich darüber nennen wir die „tödliche Zone“.

Druckhöhe		Druck (hPa)		Hb-Sättigung	O ₂ -Versorgung der Organe durch normale Atemluft
Meter	Fuß	P _{O₂}	P _{O₂} (Alveole)	%	
0	0	213	137	98	Ausreichende Versorgung
3.048	10.000	146	81	90	
5.486	18.000	106	50	72	Unzureichende Versorgung (Sauerstoffmangel)
6.706	22.000	90	44	65	

Abb. 2.12: Sauerstoffversorgung und Höhe

Zu einer **Rechtsverschiebung der Kurve** (= verminderten O₂-Bindungsfähigkeit) kommt es bei

- Erhöhung des CO₂-Spiegels im Blut
- Abfall des pH-Wertes zur sauren Seite (bis pH 7,2)
- Anstieg der Körpertemperatur.

Zu einer **Linksverschiebung der Kurve** (= erhöhte O₂-Bindungsfähigkeit) kommt es bei

- Abfall des CO₂-Spiegels im Blut
- Anstieg des pH-Wertes zur alkalischen Seite (bis pH 7,6)
- Abfall der Körpertemperatur (Unterkühlung)

Bei normaler Atmung ist die Veränderung des pH-Wertes für den O₂-Austausch und die CO₂-Abgabe von unterstützender Wirkung: Im CO₂-reichen, sauren Milieu wird die O₂-Abgabe von HbO₂ an die Zelle erleichtert. Durch das Abatmen des CO₂ über die Lunge wird ein alkalisches Milieu erzeugt, welches die Anlagerung des O₂ an das Hb erleichtert (BOHR-Effekt). Wird durch eine unphysiologische Hyperventilation auch im Zellbereich der pH-Wert alkalisch, wird die O₂-Abgabe an die Zelle bzw. das Erfolgsorgan erschwert.

2.3.4 Herz und Gefäßsystem

Das Gefäßsystem wird unterteilt in den großen (oder Körper-) Kreislauf und den kleinen (oder Lungen-) Kreislauf. Beide Kreisläufe sind zu einem Gesamtkreislauf hintereinander geschaltet. Die Blutgefäße stellen also ein geschlossenes Röhrensystem dar, in welchem sich das Transportmittel Blut bewegt. Es werden unterschieden:

Arterien

sind muskelhaltige, kräftige, dickwandige Gefäße, die herznah den (systolischen) Druckstoß des Herzens aufnehmen (Windkesselfunktion). Dieser ist als „Puls“ auch noch entfernt vom Herz tastbar. Arterien führen im großen Kreislauf O₂-reiches Blut, die Lungenarterien hingegen führen CO₂-reiches Blut vom rechten Herzen zur Lunge zurück (kleiner Kreislauf).

Kapillaren

stellen ein weitverzweigtes, dünnkalibriges Gefäßnetz dar, welches aufgrund seines großen Gesamtquerschnitts eine geringe Strömungsgeschwindigkeit des Blutes aufweist. Im Kapillarnetz erfolgt der Gas- und Nährstoffaustausch (Transport und Versorgung).

Venen

sind dünnwandige Gefäße mit geringen Muskelanteilen, in denen der Blutdruck nach der Passage des Kapillarnetzes vergleichsweise gering ist (im Mittel: 15 mmHg bzw. 2 kPa). Venen führen CO₂-reiches Blut aus dem großen Kreislauf zurück zum Herzen; im Lungenkreislauf aber O₂-reiches Blut, das von der Lunge zum linken Herzen zurückfließt.

Das Herz stellt als Hohlmuskel eine „Doppelpumpe“ dar, je aus einem Vorhof, einer Kammer und dazwischen geschalteten Herzklappen, bindegewebigen Ventilen, die den Blutstrom nur in einer Richtung fließen lassen.

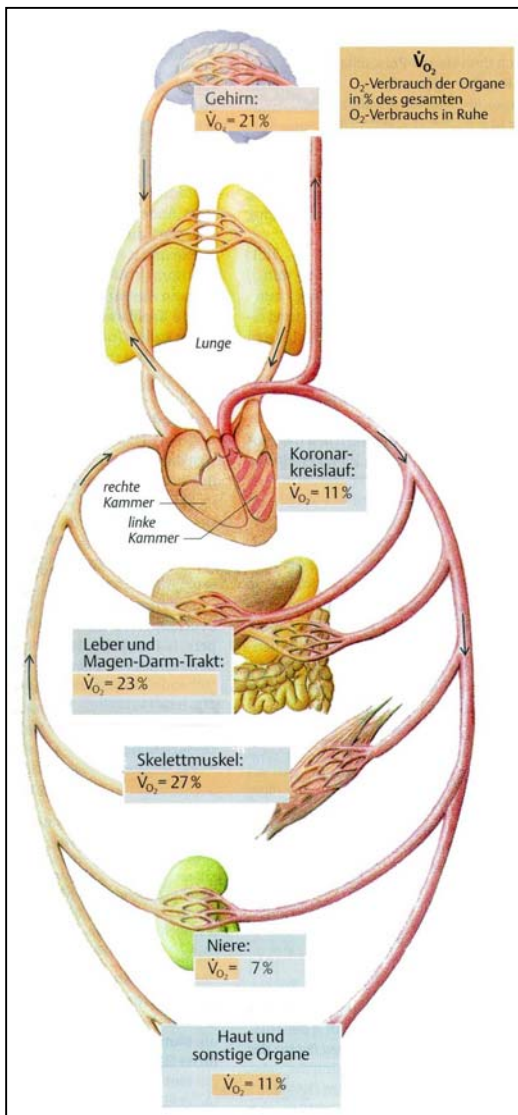


Abb. 2.13: Herz- Kreislaufsystem

Bei der Kontraktion des Herzmuskels (Systole) wirft das linke Herz das Blut in den großen (Körper-) Kreislauf, das rechte Herz in den kleinen (Lungen-) Kreislauf aus. Die Versorgung des Herzmuskels selbst erfolgt über die Herzkranzgefäße (Coronargefäße).

Das pro Herzschlag ausgeworfene Blutvolumen nennt man Herzschlagvolumen (HSV), die pro Minute geförderte Blutmenge Herzzeitvolumen (HZV) bzw. Herzminutenvolumen. Die Verteilung der zirkulierenden Blutvolumina auf die verschiedenen Organsysteme ist aus Abb. 2.13 ersichtlich. Immerhin befinden sich etwa 13 % der gesamten Blutmenge im Kopfbereich. Das Herzzeitvolumen stellt also die Blutförderleistung des Herzens dar. Es errechnet sich aus der Schlagfrequenz multipliziert mit dem Schlagvolumen pro Minute. Pro Minute fließen in Ruhe etwa 5 Liter um, d.h. die gesamte Blutmenge wird also einmal pro Minute durch den Kreislauf bewegt. Ähnlich wie bei der Regelung der Atmung wird auch die Förderleistung des Herzens so geregelt, dass sie an die aktuellen Stoffwechselbedürfnisse optimal angepasst wird. Bei körperlicher Höchstbeanspruchung kann das Herzminutenvolumen von 5 auf 30 l/min ansteigen.

Der Blutdruck ist im arteriellen Teil des großen Kreislaufs naturgemäß höher (120/80 mmHg bzw. 16/10,6 kPa) als im venösen Teil (25/10 mmHg bzw. 3,3/1,3 kPa). Die zweifache Angabe des Drucks bezieht sich auf: systolisch/diastolisch; der erste Wert auf die Austreibungsphase des Herzmuskels, der zweite auf die Erschlaffungsphase.

Die Blutversorgung der Organe und der Blutdruck wird in Abhängigkeit der aktuellen Bedürfnisse also über die Herztätigkeit (d.h. über das HZV) und über die Weite der zuführenden Arterien sichergestellt.

Beispielsweise findet bereits bei einer Lageänderung des Menschen vom Liegen zum aufrechten Stehen eine erhebliche Änderung der Blutdrücke und Blutverteilung (orthostatische Volumenverschiebungen) statt. Komplexe Regelungsvorgänge gleichen das vorübergehende „Versacken“ von etwa 500 ml in die dann unteren Körperabschnitte aus (= reflektorische Gegenregulationen über bestimmte Pressorezeptoren und Vasokonstriktionen sowie über die Änderung des HZV).

Diese orthostatischen Blutdruckregelmechanismen gleichen auch eine Minderversorgung bei geringer bis mäßiger Einwirkung von Fliehkräften auf den Körper eines gesunden Menschen aus. In der Fliegerei sind jedoch Piloten von Hochleistungskampfflugzeugen einem Vielfachen der Erdbeschleunigung ausgesetzt (vgl. Kap. 6). Hier bedarf es technischer Hilfsein-

richtungen (z.B. Anti-G-Anzug), um die Blutversorgung des Körpers, vor allem des Gehirns noch aufrecht zu erhalten.

2.4 Verwendete und weiterführende Literatur

Aeromedical training for flight personnel. FM 1-301, Fort Rucker, US Army

Armstrong, H. C. (ed). Aerospace medicine. Williams and Wilkins, Baltimore, 1961

Burton, A. C. Physiologie und Biophysik des Kreislaufs. Schattauer, Stuttgart, 1969

Cogo, A., Legani, D., Allegra, L. Respiratory function at different altitudes. *Respiration* 64 (6), 416-421, 1997

Comroe, J. L., Forster, R. E., Dubois, A. B., Briscoe, W. A., Carlsen, E. Die Lunge. 2. Aufl., Schattauer, Stuttgart, 1968

DeHart, R. L. (ed) Fundamentals of aerospace medicine. 2. ed., Williams and Wilkins, Baltimore, 1996

Ernsting, J., Nicholson, A. N., Rainford, D. J. (eds) Aviation medicine. 3. ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000

Flight surgeon's guide. – AFM-161-18 – Department of the Air Force, Washington, 1968

Luft, U. C. Aviation physiology. In: Fenn, W. O., Rahn, H (eds). Handbook of physiology, Sect 3, 2: Respiration, Chapter 44. American Physiological Society, Washington, 1965

Papenfuß, W. Luftfahrtmedizin. Brandenburgisches Verlagshaus, Berlin, 1990

Reinhart, R. O. Basic of flight physiology. 2. ed., McGraw-Hill, New York, 1996

Schmidt, R. F., Thews, G., Lang, F. (Hrsg.) Physiologie des Menschen. 28. Aufl. Springer, Berlin, 2000

Silbernagl, S., Despopoulos, A. Taschenatlas der Physiologie. 5. Aufl., Thieme, Stuttgart, 2001

3 SAUERSTOFFMANGEL (HYPOXIE)

Unter Hypoxie (aus dem Griechischen: hypo = unter und oxys = sauer) wird eine ungenügende O₂-Versorgung der Körperzelle verstanden. Der menschliche Organismus gewinnt durch Oxidation (Verbrennung) von Nährstoffen Energie. Somit ist ausreichende O₂-Versorgung eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit des Organismus. Fehlende (Anoxie) oder ungenügende (Hypoxie) O₂-Versorgung der Körperzellen beeinträchtigt die Körperfunktion und kann rasch zum Tode führen.

Die Hypoxieempfindlichkeit der verschiedenen Organe und Gewebe ist unterschiedlich. Das Gehirn reagiert dabei sehr empfindlich auf Sauerstoffmangel, schon nach ca. 3 min. ohne Sauerstoff können irreparable Schäden auftreten.

Die Ursachen dafür, dass die Körperzellen nicht ausreichend Sauerstoff erhalten, können in vier Gruppen aufgeteilt werden.

- Hypoxische Hypoxie
- Hypämische Hypoxie
- Stagnierende Hypoxie
- Histotoxische Hypoxie

3.1 Hypoxische Hypoxie

Die hypoxische Hypoxie ist durch einen ungenügenden Partialdruck des Sauerstoffes (Po₂) im arteriellen Blut gekennzeichnet. Daraus ergibt sich eine mangelhafte Versorgung der Zelle mit O₂. Grund für diesen erniedrigten Po₂ des arteriellen Blutes kann ein niedriger Po₂ der Umgebungsluft sein, der einen erniedrigten Po₂ in der Alveolarluft der Lunge zur Folge hat. Die Diffusion des O₂ ins Blut nimmt ab, der Verbraucher „Zelle“ leidet unter Sauerstoffmangel. Ein anderer möglicher Grund für das Absinken des Po₂ im arteriellen Blut kann ein verschlechterter Gasaustausch in der Lunge sein, bedingt durch eine Verdickung der Grenzmembranen, (z.B. bei einer chronischen Bronchitis) oder durch eine Verringerung der dem Gasaustausch zur Verfügung stehenden Diffusionsfläche (z.B. bei Pneumonie, Atelektasen, Emphysem oder Pneumothorax). Die hypoxische Hypoxie ist die bei weitem häufigste Art des Sauerstoffmangels, von dem fliegendes Personal betroffen werden kann, da mit Zunahme der Flughöhe der Po₂ der Umgebungsluft abfällt (entsprechend dem DALTON'schen Gasgesetz).

3.1.1 Die Stadien der hypoxischen Hypoxie

Um höhenbedingte O₂-Mangelreaktionen des menschlichen Organismus einteilen zu können, wurden einzelne Zonen und Schwellen definiert (vgl. Abb. 3.1). Beim Aufstieg des Menschen von Meereshöhe in zunehmend höhere Schichten der Lufthülle der Erde reagiert der Organismus in den bodennahen Schichten bis etwa 7.000 ft zunächst indifferent (**Indifferenzzone**).

Trotz des stetig fallenden Po₂ in der Atem- und Alveolarluft tritt hier nur eine geringfügige Senkung der Sauerstoffsättigung des Blutes ein. Die einzige objektiv nachweisbare Störung, die sich in diesem Bereich bei ca. 5.000 ft einstellen kann, ist eine Verschlechterung des Nachtsehvermögens aufgrund der hochgradigen Empfindlichkeit der Netzhautstäbchen gegenüber schon leichtem O₂-Mangel.

Bei Erreichen einer Höhe von 6.000 - 7.000 ft = „**Reaktionsschwelle**“ reagiert der Körper auf den Sauerstoffmangel mit Kompensationsmaßnahmen, die vor allem in der Steigerung des Herzzeitvolumens und einer Vertiefung und Beschleunigung der Atmung (Atemminutenvolumen) bestehen. Durch diese physiologischen Reaktionen wird der O₂-Mangel bis zu einer Höhe von 10.000 bis 12.000 ft beim Gesunden voll ausgeglichen. Bis dahin reicht die „**Zone der vollständigen Kompensation**“.

Allerdings konnte eine Beeinträchtigung der Leistung des Kurzzeitgedächtnisses bereits in einer Höhe von 8.000 ft nachgewiesen werden. Ein Kranker hat in dieser Höhe u. U. keine Möglichkeit der Kompensation mehr, denn er muss die Insuffizienzerscheinungen seitens seines Kreislaufs, der Atmung und des Blutes schon viel früher, oder sogar schon am Boden, kompensieren.

Beim Transport von Passagieren in Linienflugzeugen sollte die Kabinenhöhe 8.000 ft nicht übersteigen, weil davon ausgegangen werden muss, dass einzelne Fluggäste durch ihre körperliche Konstitution bereits in dieser Höhe ihre Reserven ausgeschöpft haben können.

Höhe [ft]	PO ₂ Atmosphäre	O ₂ -Sättigung (%)	Höhenschwellen	Physiologische Zonen	Leistungsbild
38.000	44 hPa 33 mmHg	< 65		Tödliche Zone	Tod
22.000	90 hPa 67 mmHg		Kritische Schwelle	Kritische Zone	Bewusstlosigkeit
12.000	135 hPa 101 mmHg	65 - 86	Störschwelle	Zone der unvollständigen Kompensation	Leistungsabfall
7.000	164 hPa 123 mmHg	86 - 93	Reaktionsschwelle	Zone der vollständigen Kompensation	Sehstörung möglich
0	213 hPa 160 mmHg	93 - 98		Indifferenzzone	Volle Leistung

Abb. 3.1: Höhen, Höhenschwellen, O₂-Partialdrücke und physiologische Zonen

Nach Überschreiten der Höhe von 10.000 bis 12.000 ft wird die „**Störschwelle**“ erreicht. Hier beginnt die „**Zone der unvollständigen Kompensation**“: Ohne künstliche O₂-Zufuhr wird die erforderliche O₂-Sättigung des Blutes nicht mehr voll erreicht. Allgemeiner Leistungsabfall ist die Folge. Erste O₂-Mangelsymptome stellen sich ein.

In 22.000 ft wird dann die „**kritische Schwelle**“ erreicht. Nunmehr ist eine Kompensation des Sauerstoffmangels unmöglich. In Abhängigkeit von der Flughöhe (bei Verwendung von Druckkabinen ist natürlich die jeweilige „Kabinenhöhe“ maßgebend) tritt oberhalb dieser Schwelle in der „**Tödlichen Zone**“ das Vollbild des O₂-Mangels ein: Mehr oder weniger schnell stellen sich Handlungsunfähigkeit, Bewusstlosigkeit und schließlich der Tod ein.

Typischerweise beginnen die O₂-Mangelsymptome mit recht unspezifischen, allgemeinen Sensationen, wie Kribbeln in den Füßen, den Händen, mit Wärme- (oder Kälte-) Gefühl im Bauch oder auf der Haut, mit Sehstörungen (z.B. verminderte Farbwahrnehmung) oder Druckgefühl im Kopf. Herabgesetzte Denk- und Urteilsfähigkeit, ja euphorische Zustände kennzeichnen die Gefährlichkeit des O₂-Mangels für den Flugzeugführer, der aus diesem

Grunde seine individuelle O₂-Mangelsymptomatik in regelmäßigen Abständen in der Höhen (Unterdruck)-Kammer unter für ihn sicheren Begleitumständen kennenlernen und wiedererkennen muss. Die eigentlichen Ursachen für das Auftreten aller dieser O₂-Mangelerrscheinungen - dies sei hier wiederholt - ist die Verminderung des für eine Gasdifffusion notwendigen Druckgefälles zwischen den O₂-Partialdrücken in den Lungenalveolen und im Blut. Die dadurch erschwerte Diffusion des O₂ in das Blut bedingt dann die unzureichende Sauerstoffsättigung des Hämoglobins und führt somit zur Hypoxie der Körperzellen.

3.1.2 O₂-Partialdrücke

Wie wir gesehen haben, ist der entscheidende Faktor bei der Entwicklung einer Höhenkrankheit (hypoxische Hypoxie) der Sauerstoffpartialdruck in den Lungenalveolen. Entsprechend dem DALTON'schen Gasgesetz hat die Atmosphäre in Meereshöhe einen Stickstoffpartialdruck von 790 hPa und einen Sauerstoffpartialdruck von 213 hPa. Dem entspricht ein P_{O₂} in den Lungenalveolen von ca. 137 hPa. Entsprechend den Gesetzen der Gasdifffusion haben Gase unterschiedlicher Konzentration, wenn sie durch eine permeable Membran getrennt sind, die Tendenz, das Konzentrationsgefälle auszugleichen und sich gleichmäßig zu verteilen. So entspricht in Meereshöhe der alveolare P_{O₂} dem arteriellen P_{O₂}* (beide ca. 137 hPa) (* siehe hierzu Kap. 2, 2.1.6). Das Hämoglobin ist dabei zu 98 % mit Sauerstoff gesättigt. Wenn dieser Sättigungswert aufgrund des sinkenden alveolaren und damit des arteriellen P_{O₂} absinkt, entwickelt sich die hypoxische Hypoxie.

Die alveolare Sauerstoffspannung kann sowohl gemessen als auch berechnet werden. Zur Berechnung der Atemluftteildrücke werden folgende Formeln benutzt. Der Teildruck des Wasserdampfes bei 37 °C beträgt 62,5 hPa.

Formel 1 dient zur Berechnung des P_{O₂} in der Trachea (P_TO₂)

$$p_{T}O_{2}=(P-p_{H_{2}O})\cdot F_{I}O_{2}$$

Formel 2 dient zur Berechnung des P_{O₂} in den Lungenalveolen (P_AO₂)

$$p_{A}O_{2}=p_{T}O_{2}-p_{A}CO_{2}\left(F_{I}O_{2}+\frac{1-F_{I}O_{2}}{RQ}\right)$$

Diese Formeln finden Anwendung bei Atmung eines normalen Luftgemisches. Die letzte Formel kann dadurch vereinfacht werden, dass für den RQ ein Wert von 1 angenommen wird (normal: 0,8):

Formel 3:

$$p_{A}O_{2}=p_{T}O_{2}-p_{T}CO_{2}$$

(P=Gesamtluftdruck; p_TO₂=trachealer O₂-Teildruck; p_AO₂=alveolarer O₂-Teildruck; P_ACO₂=alveolarer CO₂-Teildruck; RQ=Respirationsquotient (CO₂-Abgabe/O₂-Aufnahme) P_{H₂O}=Wasserdampfdruck bei 37 °C; F_IO₂=Volumenanteil O₂ (1,0 für 100 % O₂; 0,21 für Luft))

Die für die Errechnung von alveolarem Sauerstoffpartialdruck angegebene Formel 2 ergibt aber nur dann genaue Werte, wenn die kompensatorische Reaktion von Atmung und Kreislauf (durch Erhöhung der Atemfrequenz, der Atemtiefe, der Pulsfrequenz und des Herzzeitvolumens) in der Sauerstoffmangelsituation berücksichtigt wird. Der P_AO₂ in den Lungenalveolen ist auch vom Kohlendioxidanteil und von dem Verhältnis zwischen CO₂-Abgabe und O₂-Aufnahme (dem Respiratorischen Quotienten RQ) abhängig.

Luftatmung									
Höhe [ft]	P		P _{TO₂}		P _{ACO₂}		P _{AO₂}		RQ
	mmHg	hPa	mmHg	hPa	mmHg	hPa	mmHg	hPa	
Meereshöhe	760	1013	150	200	40	53	103	137	0,85
10.000	523	697	100	133	35	47	61	81	0,90
18.000	380	506	70	93	30	40	38	50	0,98
22.000	321	428	58	77	28	37	33	44	1,05
25.000	283	377	50	66	27	36	30	40	-
100 % Sauerstoff-Atmung									
36.000	171	228	124	165	85	113	38	51	1,0 (+)
39.000	148	197	101	134	64	85	36	48	1,0 (+)
42.000	128	171	81	108	48	64	33	44	1,0 (+)
45.000	111	148	64	85	34	45	30	40	1,0 (+)
(+) = angenommene Werte									

Abb. 3.2: Partialdrücke, Höhen und Respiratorische Quotienten bei Luft- und 100% O₂-Atmung

Die Werte für das normale Atemluftgemisch lassen sich aber nur bis zu einer Höhe von 25.000 ft bestimmen, für die Atmung von 100% O₂ nur bis zu einer Höhe von 45.000 ft (Abb. 3.2). Darüber hinaus tritt hypoxiebedingte Bewusstlosigkeit ein, in-vivo-Messungen verbieten sich.

3.1.3 Diffusionsgefälle und Höhe

Bei einem Höhengaufstieg (Abb. 3.3) sinkt der P_{O₂} in den Lungenalveolen in 10.000 ft Höhe von dem in Meereshöhe vorhandenen P_{AO₂} von 137 hPa (103 mmHg) auf ca. 81 hPa (61 mmHg). Bei 18.000 ft ist der alveolare O₂-Teildruck (P_{AO₂}) annähernd so hoch, wie er in Meereshöhe in der Zelle ist. Somit ist das Diffusionsgefälle zwischen Lunge und Blut bereits aufgehoben, wenn der Körper den O₂-Mangel nicht durch die beschriebenen Kompensationsmaßnahmen auszugleichen imstande wäre. In der Höhe von 25.000 ft ist das Diffusionsgefälle zwischen alveolarem O₂-Teildruck und dem O₂-Teildruck des Blutes trotz kompensatorischer Maßnahmen endgültig aufgehoben. Es kann u.U. sogar eine Umkehr der O₂-Diffusion stattfinden, so dass O₂ aus dem Blut in die Lungenalveolen zurückdiffundiert. Das ist die Ursache für die nach plötzlichem Druckkabinenverlust (rapide Dekompression) in diesen Höhen besonders rasch einsetzende Bewusstlosigkeit.

In der Abb. 3.3 sind einige Sauerstoffpartialdruckmesswerte, die bei Höhengaufstiegen (Unterdruckfahrten) bestimmt wurden und teilweise zu einer unzureichenden O₂-Versorgung des Körpers führten, dargestellt. Die Werte wurden verschiedenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die durch unterschiedliche Symbole gekennzeichnet sind, entnommen.

Negative O₂-Diffusionsgefälle zwischen den Geweben und dem arteriellen Blutgefäßsystem führen ab 25.000 ft zu einer O₂-Abgabe der Gewebe an das Blut.

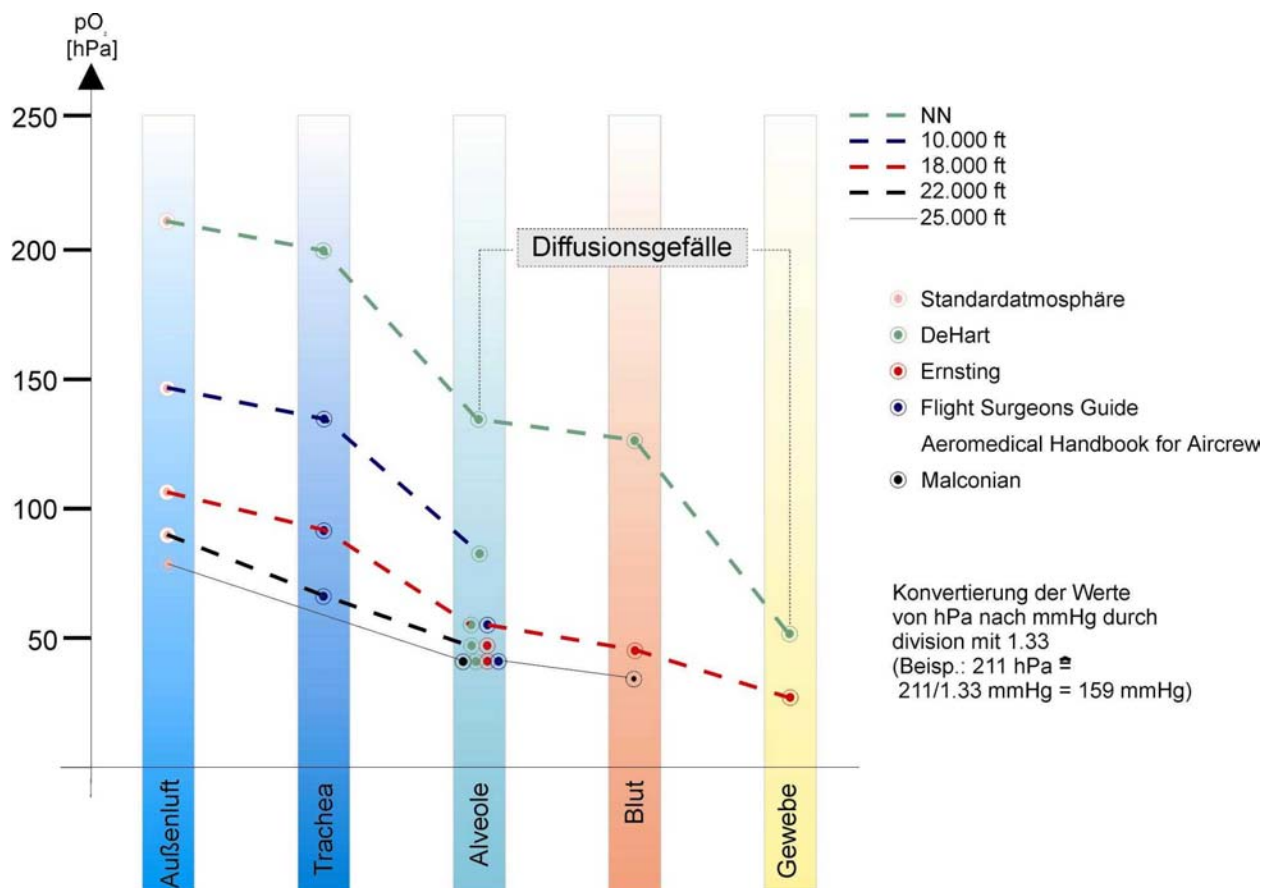


Abb. 3.3: Diffusionsgefälle in Abhängigkeit von der (Druck-) Höhe

3.2 Hypämische Hypoxie

oder auch anämische Hypoxie. Ihr Kennzeichen ist eine Verminderung der Sauerstoff-Transportkapazität des Blutes, d.h. dem in der Alveole reichlich vorhandenen O₂ steht im Blut nicht genügend freies Hämoglobin als Transportmittel zur Verfügung. Der O₂-Gehalt des Blutes reicht nicht mehr aus, das Gewebe leidet unter Sauerstoffmangel. Die Verminderung des freien Hämoglobins kann verschiedene Gründe haben:

Der Hb-Abfall kann durch Erythrozytenmangel bei Blutverlust entstehen oder durch verschiedene Arten von Anämien. Möglich ist auch, dass das Hämoglobin in ausreichender Menge vorhanden ist, jedoch für den O₂-Transport nicht mehr zur Verfügung steht, weil es chemisch anderweitig gebunden ist. (Bildung von Methämoglobin: MetHb, Bindung von Kohlenmonoxid: COHb). Da die Affinität des Kohlenmonoxids (CO) an das Hämoglobinmolekül etwa 230 mal größer ist als die des O₂, spielt das COHb gerade in der Luftfahrt eine wichtige Rolle. Die Atemluft kann durch CO verunreinigt sein, z.B. durch

- angesaugte Triebwerksabgase (eines davor startenden Flugzeugs)
- Schwelbrände im Cockpit-Bereich (Smokes and Fumes)

Auch Rauchen führt zu einer Besetzung des Hb mit CO (zu COHb) und schränkt die O₂-Transportleistung des Hämoglobins ein. Bei einem mittelstarken Raucher finden wir bereits 5 – 8 % COHb im Blut. Damit ist die Höhentoleranz im Vergleich zu einem Nichtraucher verringert, d.h. bei einem Flug in 10.000 ft (Kabinen-) Höhe würde sich ein Raucher bereits in einer physiologischen Höhe von 15.000 ft befinden (s. Abb. 3.4) und somit schon in der Zone der unvollständigen Kompensation liegen. Um seine volle Leistungsfähigkeit zu erhalten, bzw. die volle O₂-Sättigung des Blutes aufrechtzuerhalten, bedürfte er bereits jetzt einer erhöhten O₂-Zufuhr.

Kohlenmonoxid ist ein farb- und geruchloses Gas, etwas leichter als Luft. Sein Vorhandensein wird ohne jegliche Vorwarnung erst dann bemerkt, wenn sich die ersten Symptome einer CO-Vergiftung einstellen. Zu Beginn kann es zu leichten Kopfschmerzen, Schwindel oder

Sehstörungen kommen, gefolgt von einer Einschränkung der Wahrnehmungs- und Konzentrationsfähigkeit, bis zu z.T. schwersten Kopfschmerzen, Übelkeit, Erbrechen und Kollaps. Da diese Vergiftungssymptome recht unspezifisch sind und denen des O₂-Mangels ähneln, muss bei Verdacht auf eine CO-Vergiftung sofort an eine mögliche Quelle für Kohlenmonoxid gedacht und diese ausgeschaltet werden. Die sofortige Zufuhr von Frischluft, besser noch von reinem Sauerstoff, verhindert dann eine weitere Besetzung des Hämoglobins mit CO, bzw. führt zu einer schnelleren Elimination von CO aus dem Blut. Bei schweren CO-Vergiftungen ist eine hyperbare Oxygenation (Zufuhr von 100 % Sauerstoff im Überdruck) die Therapie der Wahl. So ist die Halbwertszeit von COHb bei Atmung von Frischluft ca. 5 h, bei Atmung von 100 % O₂ 1,3 h und bei Atmung von 100 % O₂ mit 3 bar Überdruck 23 min.

3.3 Stagnierende Hypoxie

Kennzeichnend für die „Stauungshypoxie“ ist eine Einschränkung der Blutströmung im ganzen Körper oder in einzelnen Körperteilen bzw. Organen. Das Ergebnis ist wiederum ein Abfall der O₂-Spannung des Blutes und somit Sauerstoffmangel im Gewebe und in den Zellen. Gründe für eine Störung der Blutzirkulation im ganzen Körper können Herzversagen, Kollaps, Schock oder länger anhaltende positive Druckatmung sein.

Die bei Beschleunigungen auftretenden G-Kräfte, vor allem in Kopf-Fuß-Richtung (+G_z), führen beim (ungeschützten) Flugzeugführer zu einem „Versacken“ größerer Blutvolumina in die unteren Körperbereiche mit den Erscheinungen einer Stauungshypoxie.

Die durch Kälteexpositionen entstehende örtliche Arterienverengung bedingt eine lokale Stauungshypoxie. Alle Formen der Embolie (Verlegung von Arterien durch Blutgerinnsel oder Gasblasen) oder der Thrombose führen zu einer echten stagnierenden Hypoxie, natürlich auch das zu lange Abbinden von Extremitäten.

3.4 Histotoxische Hypoxie

Bei dieser Art der Hypoxie ist die Zelle nicht fähig, ein ausreichendes (normales) Angebot an O₂ zu nutzen. Grund dafür ist das Stoffwechselversagen der Zelle bei einer Zellintoxikation, z.B. durch Blausäureverbindungen oder Alkohol. Bei Cyanidvergiftungen kann beispielsweise die Cytochromoxydase der Mitochondrien nicht mehr mit molekularem Sauerstoff in Reaktion treten. Ein weiteres Zellgift ist der Alkohol. Nach übermäßigem Genuss von Alkohol kommt es zu einer übermäßig starken Flüssigkeitsausscheidung durch die Nieren. Damit verbunden ist ein starker Elektrolyt- (Salz-, Mineralien-) Verlust, der eine Veränderung des Säure-Basen-Haushalts in den Körperzellen zur Folge hat. Die Zellen sind auch in diesem Fall nicht fähig, den angebotenen Sauerstoff ausreichend aufzunehmen. Entsprechend kann das Atmen von 100 % O₂ die Folgen des Alkoholkonsums nicht beseitigen (im Blut ist genügend O₂ vorhanden). Wichtig ist hier die Substitution der ausgeschiedenen Flüssigkeitsmengen und der gleichzeitig verloren gegangenen Mineralstoffe. Diese vier beschriebenen Hypoxiearten können einzeln oder in Kombination auftreten. Ein Pilot kann einen O₂-Mangel in der Atemluft (hypoxische Hypoxie) und gleichzeitig eine Minderdurchblutung des Gehirns, bedingt durch Einwirkung von hohen G-Kräften (stagnierende Hypoxie), erleiden.

3.5 Sauerstoffmangel - tabellarische Zusammenfassung

Zur besseren Übersicht seien Arten und Ursachen der Hypoxie nachfolgend tabellarisch zusammengestellt (Abb. 3.5):

Art	Ort der Störung	Ursache	Eintritt bei
Hypoxische Hypoxie	<ul style="list-style-type: none"> • Atemgemisch • Alveoläre Membran 	O ₂ -Mangel in der Atemluft Diffusionshindernis	<ul style="list-style-type: none"> • Flughöhen über 10.000 ft • Lungenerkrankungen
Stagnierende Hypoxie	<ul style="list-style-type: none"> • Kreislauf 	Beeinträchtigung der Blutzirkulation	<ul style="list-style-type: none"> • Kollaps, Schock • Dauerüberdruckbeatmung • Gefäßkrämpfe oder -erweiterungen • Beschleunigungen
Anämische Hypoxie	<ul style="list-style-type: none"> • Blut 	Mangel an funktionstüchtigem Hämoglobin	<ul style="list-style-type: none"> • Blutungen • Anämien • Blockierung des Hämoglobins (CO)
Histotoxische Hypoxie	<ul style="list-style-type: none"> • Zelle 	Vergiftung der Zelle	<ul style="list-style-type: none"> • Blausäurevergiftung (Cyankali) • Alkoholintoxikation

Abb. 3.4: Art und Ursachen der Hypoxieformen

Ein Verwundeter oder Kranker - daran ist vor allem beim Lufttransport zu denken - befindet sich evtl. in einer noch ungünstigeren Lage, da hier häufig noch eine Anämie und in manchen Fällen auch eine zusätzliche Behinderung des Gasaustausches in der Lunge (Pneumonie, Bronchitis, Pneumothorax) vorliegen kann. Kranke können in Höhen, in denen ein Gesunder den Sauerstoffmangel noch vollständig kompensiert und daher nicht bemerkt, schon schwere Symptome der Sauerstoffmangelkrankheit aufweisen. Von allen bisher besprochenen Arten der Hypoxie ist für den gesunden Piloten die hypoxische Hypoxie von elementarer Bedeutung. Deshalb sollen im folgenden die Symptomatik und der klinische Verlauf dieser Art der O₂-Mangelkrankheit herausgestellt werden.

3.6 Symptomatik der O₂-Mangelkrankheit

Die Anzeichen einer (hypoxischen) Hypoxie können sehr variabel sein. Der Zeitabstand vom ursächlichen Beginn (Abfall des O₂-Teildruckes in der Atemluft) bis zum Auftreten erster O₂-Mangelscheinungen, Reihenfolge und Schweregrade der Symptomatik hängen von folgenden Faktoren ab:

- Ausmaß und Schnelligkeit des O₂-Partialdruckabfalles in der Atemluft
- Zeitdauer der Exposition.

Weitere Faktoren modifizieren die Symptomatik:

- **Körperliche Aktivität:**
Bei körperlicher Tätigkeit reduziert sich die Sauerstoffmangeltoleranz wegen des erhöhten Sauerstoffbedarfs der Zellen
- **Umgebungstemperatur:**
Extreme Hitze oder Kälte reduzieren die O₂-Mangeltoleranz beträchtlich (veränderte O₂-Bindungskapazität)

- **Individuelle Faktoren:**

Es gibt individuelle Unterschiede bezüglich der Toleranz gegen Sauerstoffmangel. Die Gründe dafür sind noch nicht vollständig geklärt. Erythrozytenzahl und Hb-Gehalt des Blutes, Höhenadaptation, Ernährung und Stoffwechsel spielen dabei wesentliche Rollen.

- **Körperliche Fitness:**

Der körperlich Trainierte hat eine bessere Höhentoleranz als der Untrainierte.

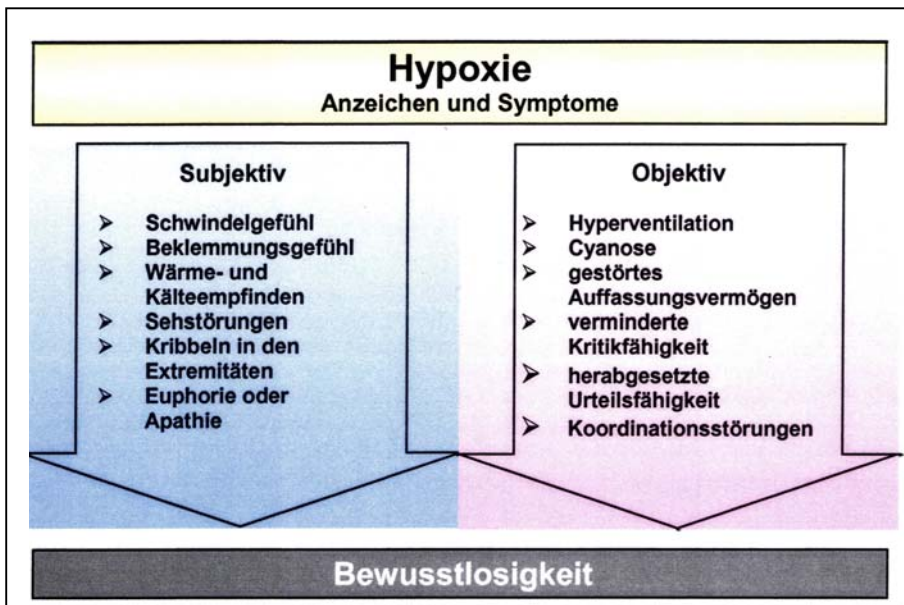
- Bestehende **Infektionskrankheiten,**

- Einnahme bestimmter **Medikamente,**

- **Alkoholkonsum,**

- **Psychische Faktoren:**

Stress und psychische Übererregung sowie Furcht oder Angst setzen die Höhentoleranz herab.



Allgemein gilt, dass mit zunehmender Höhe die O₂-Mangelsymptome immer deutlicher werden. Nur bei einem sehr raschen Höhengaufstieg, z.B. bei rapidem Kabinendruckverlust, kann es unter Überspringen der sonst üblichen ersten Warnsymptome zu plötzlicher Bewusstlosigkeit kommen.

Abb. 3.5: Sauerstoffmangelsymptome

Wir unterscheiden zwischen subjektiven und objektiven Symptomen (vgl. Abb. 3.6).

Subjektive Symptome

- Angst, Beklemmung
- Wärme-, Hitze-, Kältegefühl oder Kribbeln in einzelnen Körperpartien oder im ganzen Körper
- Druck im Kopf, hinter den Augen, in Brust oder Bauch
- Müdigkeit, Schläfrigkeit, Benommenheit, Schwindel, Schweißausbruch
- Dunkelwerden und/oder Einschränkung des Gesichtsfeldes, Flimmern vor den Augen, unscharfes Sehen, Verlust des Farbsehens;

Typisch ist, dass bei Fortbestehen der Ursachen die vorgenannten Symptome wieder verschwinden können bzw. nicht mehr wahrgenommen werden. Es kann sich sogar ein Gefühl des Wohlbefindens, ja eine Euphorie einstellen.

Objektive Symptome

- Beschleunigung der Atem- und Pulsfrequenz

- Cyanose (zunächst peripher, Blauverfärbung der Akren)
- gestörtes Auffassungsvermögen, verminderte Kritikfähigkeit, herabgesetzte Urteilsfähigkeit
- Koordinationsstörungen bis zu Krämpfen
- Bewusstlosigkeit

Gewöhnlich treten mehrere der hier aufgelisteten Symptome bei einem Individuum auf.

Für den Piloten ist von besonderer Wichtigkeit:

- Bei Sauerstoffmangel gibt es kein Erstickungsgefühl.
- Die ersten Anzeichen eines Sauerstoffmangels sind oft schwer auszumachen und von denen einer Hyperventilation häufig nicht zu unterscheiden.
- Empfindlichkeit und Reaktion auf die Hypoxie unterliegen individuell großen Schwankungen.
- Die Sauerstoffmangelsymptome können sich im Laufe des Lebens verändern. Man kann sich also nicht unbedingt auf das Auftreten eines bestimmten Warnzeichens verlassen. Entsprechend muss ein Pilot in regelmäßigen Abständen seine individuellen Warnzeichen erfahren.
- Der Verlust des Auffassungsvermögens und der Urteilsfähigkeit ist das gefährlichste Sauerstoffmangelsymptom, weil es das Erkennen der kritischen Lage erschwert oder sogar unmöglich macht.

3.7 Selbstrettungszeit

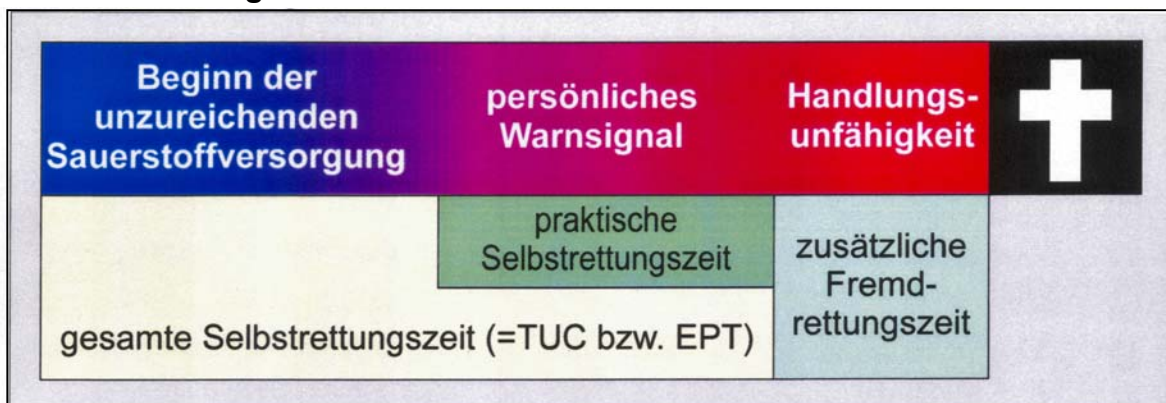
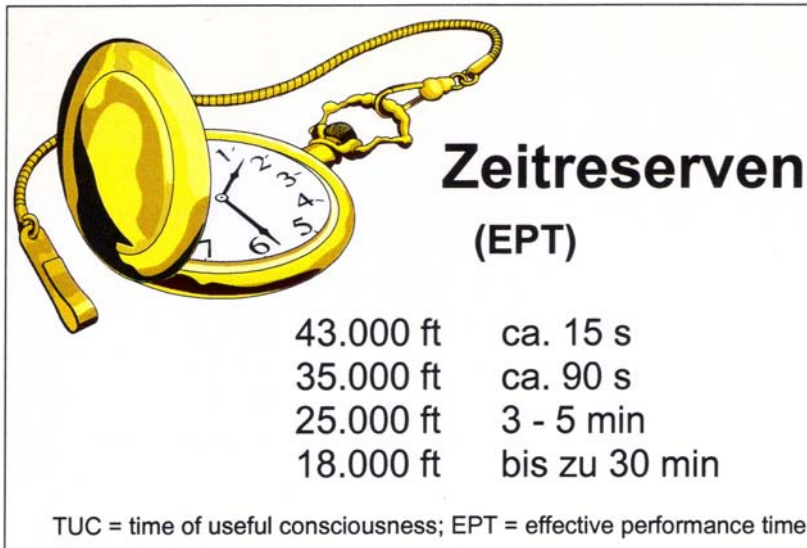


Abb. 3.6: Selbstrettungszeit „TUC“ bzw. „EPT“

Die Selbstrettungszeit oder „TUC“ (= Time of Useful Consciousness) ist der Zeitraum vom Beginn einer unzureichenden Sauerstoffversorgung bis zur eintretenden Handlungsunfähigkeit. Die „EPT“ (= Effective Performance Time) ist die Zeit, in der ein Luftfahrzeugführer seine Aufgaben erfüllen kann, obgleich er mit zu wenig Sauerstoff versorgt wird. Danach ist der Betroffene nicht mehr imstande, selbst noch entsprechende korrigierende und somit rettende Maßnahmen einzuleiten. Er ist zwar handlungsunfähig, eine vollkommene Bewusstlosigkeit ist jedoch noch nicht eingetreten. Durch fremdes Eingreifen kann eine solche Situation noch bereinigt und der tödliche Ausgang abgewendet werden (zusätzliche Fremdrettungszeit) (siehe Abb. 3.7). Die Länge der Selbstrettungszeit ist individuell unterschiedlich und von den gleichen Faktoren abhängig, die auch für die Reihenfolge und den Schweregrad des Auftretens der O₂-Mangelkrankheit verantwortlich sind (s. 3.5):

- Ausmaß und Schnelligkeit des O₂-Partialdruckabfalles
- Erfahrung im Umgang mit Hypoxie
- Stressexposition
- allgemeine körperliche Fitness



Von Interesse ist die Größe der EPT in verschiedenen Höhen. Wie aus Abb. 3.8 erkennbar, sind die Selbststretungszeiten in großen Höhen sehr kurz. Nach dem Erkennen eines aufgetretenen O₂-Mangels muss der Flugzeugführer eines Kampfflugzeuges innerhalb der TUC unverzüglich folgende Schritte einleiten:

- Umschalten des O₂-Reglers auf Notversorgung (Emergency/100% Sauerstoff mit Überdruck)
- Überprüfung von Atemmaske, Atemschlauch, und Regler (PRICE-Check; s. 4.1.2.2)
- ggf. Aktivierung der Notsauerstoffversorgung.
- Abstieg unter 10.000 ft, d.h. Erreichen von Luftschichten mit „atembarer“ Luft

Nach einer rapiden Dekompression auf Höhen über 33.000 ft verringert sich die EPT um bis zu 50 %, weil es durch den großen Druckabfall zu einer Umkehrung des O₂-Flusses von den Zellen zur Lunge kommt und die Kompensationsmaßnahmen des Organismus zu langsam in Gang kommen.

3.8 Sauerstoffatmung

Um der Entwicklung einer hypoxischen Hypoxie vorzubeugen, muss die Atemluft in Abhängigkeit von der Höhe zunehmend mit O₂ angereichert werden. Der entscheidende Faktor ist dabei der alveolare Partialdruck des Sauerstoffs. Während der alveolare Wasserdampf-Partialdruck von der Höhe unabhängig beibehalten wird (ca. 63 hPa bzw. 47 mmHg), nehmen die alveolaren Partialdrucke von O₂ und N₂ entsprechend der Luftdruckänderung ab. Der CO₂-Partialdruck nimmt aufgrund der kompensatorischen Hyperventilation ebenfalls ab (s. Abb. 3.2). Damit ein alveolarer Po₂ von 137 hPa bzw. 103 mmHg entsprechend dem Zustand auf Bodenniveau erhalten bleibt, werden für den Aufstieg in die Höhe durch Zumischung von Sauerstoff künstliche Atemgemische hergestellt und in der Regel über eine Atemmaske angeboten. Die Berechnung des der Höhe entsprechenden Mischungsverhältnisses ergibt sich aus den Gesetzmäßigkeiten nach DALTON. Die Sauerstoffzumischung durch den Regler wächst anteilmäßig mit zunehmender (Kabinendruck-)Höhe bis zur Abgabe von 100 % O₂, also reinem Sauerstoff, der ab 32.000 ft notwendig wird.

Den Anteil des O₂-Bedarfs (in Vol%) in der Atemluft in Abhängigkeit von den entsprechenden Druckhöhen verdeutlicht Abb. 3.9. Wird 100 % O₂ geatmet, entspricht die tatsächliche Höhe von 40.000 ft einer „physiologischen Höhe“ von 10.000 ft bei normaler Luftatmung. Die so erreichte Hb-Sättigung ist damit ausreichend. Die „Störschwelle“, die ja bei Atmung von Luft zwischen 10.000 und 12.000 ft liegt, wird bei der Atmung von reinem Sauerstoff auf etwa 41.000 ft angehoben (vgl. Abb. 3.2).

In Druckhöhen oberhalb von 43.000 ft ist die Sauerstoffversorgung des Organismus selbst bei reiner O₂-Atmung nicht mehr ausreichend. Um einer jetzt einsetzenden hypoxischen Hypoxie vorzubeugen, ist nunmehr eine Druckatmung notwendig. Dabei wird der reine Sauerstoff unter kontinuierlichem Druck über die Atemwege in die Lunge gedrückt, um so den alveolaren Sauerstoffpartialdruck auf möglichst hohem Wert zu halten (mindestens jedoch 80 hPa, bzw. 60 mmHg). Aus Sicherheitsgründen bietet der O₂-Regler einen (leichten) Überdruck bereits erheblich früher an, als es physiologisch erforderlich wäre (safety pressure ab 28.000 ft). Vgl. Abb.

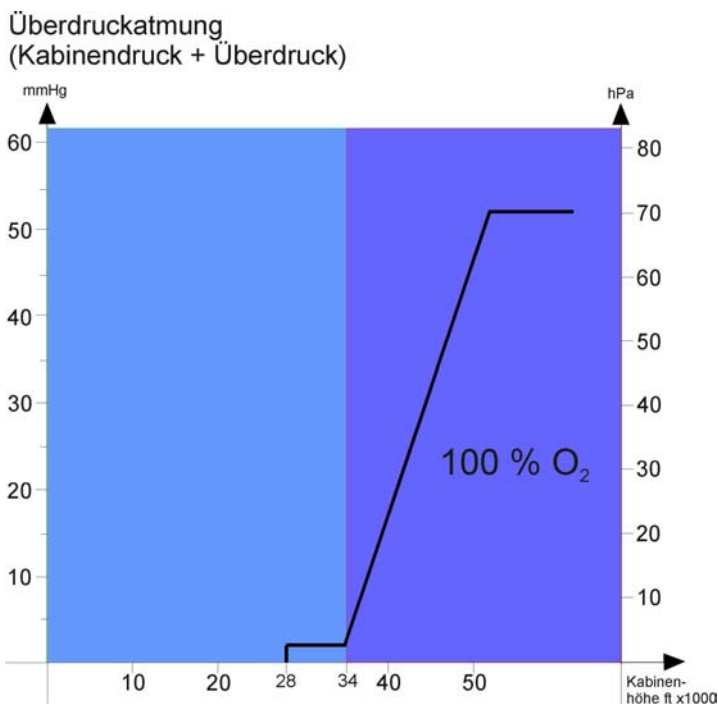


Abb. 3.9: Regelung des Überdrucks in Abhängigkeit von der (Kabinen-) Höhe

Höhe [ft]	Barometr.Druck [hPa]	O ₂ -Bedarf [Vol%]
0	1013	21
5.000	843	25
10.000	697	31
12.000	645	33
18.000	506	42
20.000	466	46
22.000	428	50
25.000	377	56
27.000	344	62
30.000	302	71
34.000	251	85
36.000	228	93
38.000	207	>100

Abb.3.8: Sauerstoffbedarf und Druckhöhe

3.10 und Kap. 14. Auch der Druckatmung von 100 % Sauerstoff sind Grenzen gesetzt. Ab etwa 45.000 bis 48.000 ft Höhe würde der zur ausreichenden O₂-Sättigung des Blutes benötigte O₂-Überdruck so stark, dass der Mensch nicht mehr imstande wäre, gegen ihn auszuatmen, da die Atemmuskulatur rasch zu ermüden beginnt (vgl. 2.1.2).

Über dieser Grenze liegende Druckhöhen können nur noch mit Hilfe von Druckanzügen (Ganzkörperanzug, Raumfahrtanzug, Volldruckanzug, Teildruckanzug) oder geschlossenen Druckkabinen bewältigt werden.

3.9 O₂-Toxizität

Wenn auch die Unentbehrlichkeit von Sauerstoff zur Erhaltung des menschlichen Lebens außer Zweifel steht, kann ein zu hoher O₂-Partialdruck in den Alveolen bei entsprechender Einwirkzeit toxisch wirken. Stark erhöhter O₂-Partialdruck in den Körperzellen (Hyperoxie) führt zu Oxidation und Hemmung zahlreicher Enzyme des Gewebestoffwechsels. Außerdem wird die Bindungsfähigkeit für CO₂ vermindert, so dass CO₂ sich im Gewebe, insbesondere im Gehirn anreichert. Längeres Atmen von O₂ in hoher Konzentration bei normalem Luftdruck (>60 Vol%; >12 h) führt hauptsächlich zu Symptomen der Lungen: Irritation der Luftwege, trockener Husten und Schmerzen hinter dem Brustbein. Nach ca. 24 h sinkt die Vitalkapazität; es kommt zum Auftreten von Atelektasen und später zum toxischen Lungenödem. Verlust von Surfactant (Grenzflächen aktive Substanz) und Auftreten von strukturellen Veränderungen im Lungengewebe sind weitere Folgen. Bei Kleinkindern, insbesondere bei Frühgeburten, führt eine langfristige Beatmung bei normalem Luftdruck mit mehr als 60 Vol% O₂ zu einer proliferativen Reaktion der Linsenkapsel, die zur Erblindung führen kann (retrolentäre Fibroplasie). Atmen von 100 % O₂ im Überdruck (> 2 bar) führt in erster Linie zu zentralnervösen Symptomen: Übelkeit, Schwindel, Muskelzucken bis hin zum Grand-Mal-Krampfanfall. Festzustellen ist also, dass die Probleme der O₂-Vergiftung in der hyperbaren bzw. Tauchermedizin eine Rolle spielen, nicht in der Fliegerei, weil dort zwar die Atemluft künstlich mit O₂ angereichert wird (bis zu 100 % O₂), der für die Entwicklung einer O₂-Toxizität erforderliche hohe alveoläre O₂-Partialdruck durch den in entsprechenden Flughöhen herrschenden niedrigen Luftdruck nicht erreicht wird und die Einwirkzeiten (Flugzeiten) relativ kurz sind. Eine ganz andere Wirkung der O₂-Atmung wird jedoch häufiger beobachtet: Wird während des Sinkfluges (oder des Abstieges in der Unterdruckkammer) noch reiner O₂ geatmet, strömt dieser im Verlauf des Druckausgleiches auch in das Mittelohr. Nach einiger Zeit wird O₂ von der Schleimhaut resorbiert, so dass im Mittelohr ein Unterdruck entsteht. Hierdurch wird - auch noch nach Beendigung des Fluges! - das Trommelfell nach innen verzogen. Das führt zu einem Taubheitsgefühl und zu Ohrenscherzen (delayed otitic barotrauma = verzögerte Barotitis). Wiederholtes VALSALVA-Manöver, u.U. auch abschwellende Nasentropfen, schaffen hier Abhilfe.

3.10 Verwendete und weiterführende Literatur

Ackles, K. N., Porlier, J. A. G., Holness, D. E., Wright, G. R., Lambert, J. M., McArthur, W. J. Protection against the physiological effects of positive pressure breathing. *Aviat Space Environ Med* 46 (6), 753-758, 1978

DeHart, R. L. (ed). *Fundamentals of aerospace medicine*. 2. ed., Williams and Wilkins, Baltimore, 1996

Dobie, T. G. *Aeromedical handbook for aircrew*. AGARD, Neuilly-sur-Seine, (AGARDograph, No 154), 1972

Ernsting, J., Nicholson, A. N., Rainford, D. J. (eds). *Aviation Medicine*. 3. ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000

Schoene, R. B. et al. Relationship of hypoxic ventilatory response to exercise performance on Mount Everest. *J Appl Physiol* 56 (6), 1478-1483, 1994

4 Sauerstoffsysteme und Druckkabinen

4.1 Sauerstoffversorgungssysteme

4.1.1 Allgemeines

Sauerstoffsysteme sind bei Kabinenhöhen über 10.000 ft ständig zu benutzen. In Kabinen, die ein bodennahes Druckniveau halten, werden Notsauerstoffanlagen mitgeführt.

4.1.2 Typischer Aufbau eines Sauerstoffsystems

Zugrunde gelegt werden der Aufbau und die Arbeitsweise eines Sauerstoffsystems, wie es bei Kampfflugzeugen verwendet wird. Im Flugbetrieb werden Kabinenhöhen bis etwa 20.000 ft erreicht. Dies macht die Verwendung von Sauerstoff erforderlich. Außerdem muss bei Versagen der Druckkabine in großen Höhen zeitverzugslos eine sichere Sauerstoffversorgung der Besatzung gewährleistet sein.

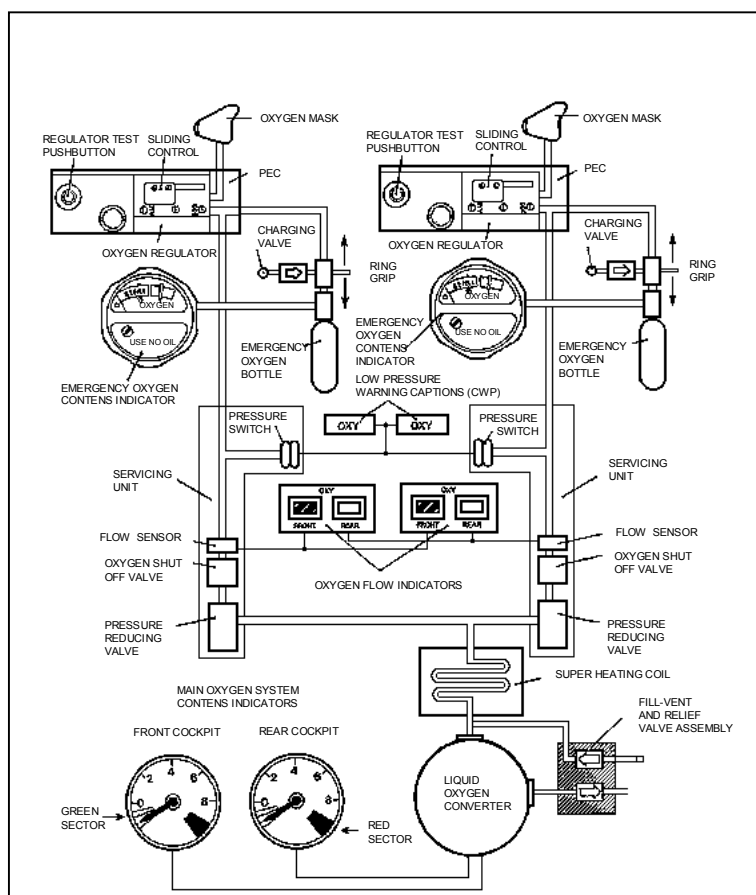


Abb. 4.1: Schema der O₂-Versorgung im Waffensystem Tornado (PA 200)

Schema der O₂-Versorgung in Kampfflugzeugen

Vgl. hierzu Abb. 4.1. Sie zeigt schematisch die O₂-Versorgung der Piloten im System Tornado. Nachfolgend werden die Komponenten der Sauerstoffausrüstung beschrieben:

(1) Vorratsbehälter

Im Rumpf der Systeme F4/F und PA 200 wird ein Vorratsbehälter für Flüssigsauerstoff (Liquid Oxygen = LOX) mitgeführt (vgl. hierzu auch Abb. 4.6). Im System MiG 29 wird gasförmiger Sauerstoff bevorratet (Gaseous Oxygen = GOX).

(2) Konverter (LOX-Systeme)

Systeme mit flüssigem Sauerstoff müssen einen Konverter zu seiner Umwandlung in gasförmigen Sauerstoff besitzen.

(3) On Board Oxygen Generating System (OBOGS)

bestehend aus „Molecular Sieve Oxygen Concentrating System“

(MSOCS) und den notwendigen peripheren Geräten.

Ziel technischer Bemühungen war seit langem, nicht mehr auf mitgeführten Sauerstoff angewiesen zu sein, sondern den Sauerstoff an Bord eines Flugzeuges selbst zu generieren oder durch Luftzerlegung anzureichern und so das Unfallpotential bei Abfüllen und Einbau der O₂-Vorratsbehälter zu vermeiden. Aus mehreren Möglichkeiten (Chem. Absorption, elektrochemische Konzentration, permeable Membranen) hat sich das Molekularsiebsystem (Molecular Sieve Oxygen Concentrating System = MSOCS) durchgesetzt. Die dabei benutzten Moleku-

larsiebe sind poröse Substanzen (atomar poröse) mit einer regelmäßigen Gitterstruktur von gleichgebauten Hohlräumen (Zeolithe). Die Sieb- oder Adsorptionswirkung von Molekularsieben beruht auf der Eigenschaft, dass diese Hohlräume (Poren) eine einheitliche Größe haben, und dass nur solche Substanzen adsorbiert werden, deren Moleküle in diese Poren eindringen können. Somit wirkt die Gitterstruktur wie ein Filter. Nach erfolgter Beladung ist das Molekularsieb zunächst erschöpft und muss von den Gasmolekülen gereinigt werden. Dies geschieht während der Desorption durch Druckabsenkung. Danach ist das Porennetz wieder frei. Adsorption und Desorption können beliebig oft wiederholt werden; folgen sie zyklisch aufeinander, dann kann das System kontinuierlich Sauerstoff aus der Umgebungsluft konzentrieren. Die Druckluft für die Adsorption wird von den Triebwerken geliefert, der niedrige Druck für Desorption steht in der Höhe (sinkender Umgebungsdruck) ohnehin unbegrenzt zur Verfügung.

(4) Regler

In den Cockpits befindet sich ein Sauerstoffregler (od. Demand Pressure Regulator bei OBOGS) für jedes Besatzungsmitglied.

(5) PEC-Gerät (Zentralkupplung)

Die bordseitige Versorgungsleitung endet links vom Schleudersitz in einer Zentralkupplung (PEC: Personal Equipment Connector), auf die der Schlauch der Atemmaske aufgesteckt wird.

(6) Not-Sauerstoff

Ein von der Hauptanlage unabhängiges Notsystem (gasförmiger O₂ in einer Flasche) kann jederzeit vom Piloten angewählt werden. Beim Schleudersitzausschuss wird es automatisch aktiviert und liefert für 4-6 Minuten kontinuierlich 100 % Sauerstoff unter Überdruck.

4.1.3 Arbeitsweise der O₂-Anlage

Der Regler (Oxygen Regulator), LOX

Die Abb. 4.2 zeigt die Bedienelemente auf der Bedienkonsole des O₂-Reglers im Cockpit.

a) **Ein-/Ausschalter**

SUPPLY ON - OFF

b) **Gemisch-Wahlhebel**

NORMAL - 100 % Oxygen

In der **Position NORMAL** wird der Atemluft abhängig von der Kabinenhöhe Sauerstoff beigemischt. Dabei wird zunächst ein Atemgemisch hergestellt, das physiologisch der Atmung von Außenluft in Meereshöhe entspricht. Abb. 4.3 liefert die Kenndaten des Sauerstoffreglers: In 34.000 ft muss der Regler 100 % O₂ liefern (Gemischhebel in Position NORMAL), um dieses Äquivalent zu halten. Bis 40.000 ft wird eine leichte Sauerstoffschuld eingegangen. In 40.000 ft Höhe entspricht die Atmung von 100 % O₂ physiologisch der Atmung von atmosphärischer Luft bei 10.000 ft Höhe (Obergrenze der „physiologischen Zone“). Oberhalb 40.000 ft liefert der Regler kontinuierlich 100 % O₂ unter ständig zunehmendem Überdruck. Gehalten wird so das „10.000 ft-Äquivalent“. In der **Position 100 %** liefert der Regler reinen Sauerstoff (100 % O₂) unabhängig von der Kabinenhöhe. Druckatmung ab 40.000 ft.

c) **Notschalter**

In der Position EMERGENCY liefert der Regler 100 % O₂ unter Überdruck: Notschaltung bei Sauerstoffzwischenfällen (Hypoxie). Der Regler selbst muss dabei eingeschaltet sein. In der Position TEST MASK kann der gesamte Druck, den die Anlage liefern kann, abgerufen werden.

- d) **Druckanzeige**
 Der Betriebsdruck der Anlage wird angezeigt. Er liegt bei Flüssigkeitssystemen zwischen 70 und 90 psi.
- e) **Durchflussanzeige (FLOW)**
 Die Durchflussanzeige (Blinker, Flow-Indicator) zeigt beim Einatmen ein weißes Feld, das beim Ausatmen verschwindet (Funktions- und Atmungskontrolle des Reglers).

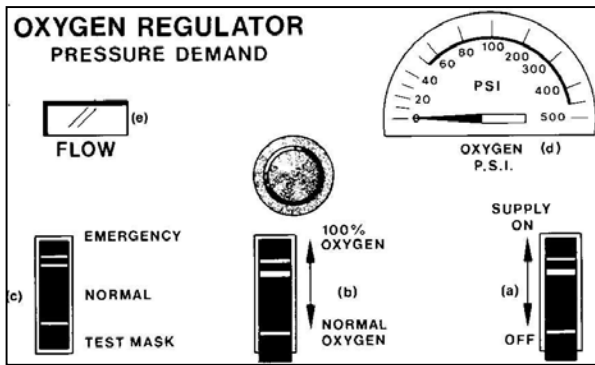


Abb. 4.2: Bedienkonsole des Sauerstoffreglers

Höhe x1000 ft	Barometrischer [Druck [mm Hg]	Atmung von	pO ₂ (alv.) (mm Hg)	Hb % Sättigung
50	87	100% O ₂ +54 mm Hg Überdruck	~60	87
43	120	100% O ₂ +21 mm Hg Überdruck	~60	87
40	141	100% O ₂	~60	87
34	188	100% O ₂	~100	97
10	523	Kabinen Luft*)	~60	87
S.L.	760	Kabinen Luft	103	97

Abb. 4.3: Die Funktion des Sauerstoffreglers bei verschiedenen (Kabinen-) Höhen

Mit dem Akronym PRICE wird eine Überprüfung der Sauerstoffreglerfunktion beschrieben. Bemerkt ein Pilot erste Symptome einer Hypoxie, führt er den PRICE-Check durch:

- P** Pressure -genügend Druck in der Anlage?
- R** Regulator -Regler an?
- I** Indicator -abwechselnd schwarz/weiß blinkend?
- C** Connection -Atemschlauchverbindung fest?
- E** Emergency -100% O₂ wird mit leichtem Überdruck angeboten / O₂-Notflasche aktivieren (green apple)

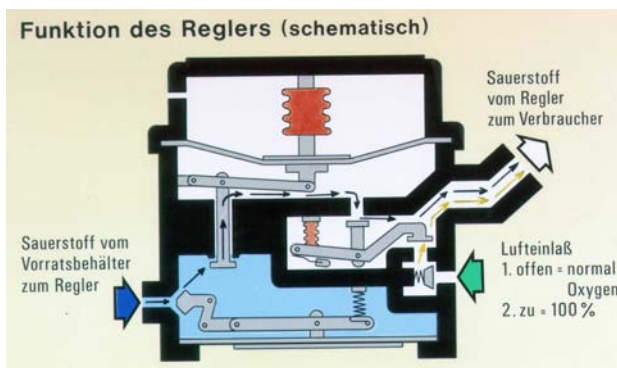


Abb. 4.4: Funktion des Reglers, schematisch

Die Funktionsweise des Reglers ist in Abb. 4.4 dargestellt. Die Beimischung des Sauerstoffs wird in Gemischhebelstellung NORMAL mittels einer barometrischen Dose geregelt. In 100%-Stellung wird der Lufterlass für die Kabinenluft geschlossen.

4.1.4 Die Atemmaske MBU-5/P

- **Verwendungszweck**

Mit der Atemmaske MBU-5/P kann ein gasförmiges Sauerstoff-Luft-Gemisch eingeatmet werden, bei gleichzeitiger Sprechmöglichkeit über das in der Atemmaske eingebaute Mikrofon.

- **Technische Daten**

- **Art der Befestigung am Fliegerhelm:**

- 4-Punkt-Befestigung mit Bajonettverschluss („Offset-Stecker“)

- **Länge des Schlauchs:** 44,45 cm

- **Masse der Maske mit Schlauch:** 0,326 kg

- **Aufbau des Gerätes**

Die Gehäuseschale (in 4 Größen) ist mit einer Silikon-Gesichtsmaske ausgekleidet, die einen luftdichten Anschluss der Atemmaske MBU-5/P an die Gesichtsförmigkeit des Benutzers ermöglicht. An der Verbindungsstelle zwischen der Gesichtsmaske und dem Schlauch für die Sauerstoffzufuhr ist ein Kombinationsventil eingebaut, das den Einatem- und Ausatemvorgang regelt. Das Mikrofon für den Sprechfunkverkehr befindet sich innerhalb der Gesichtsmaske. Die elektrische Zuleitung für das Mikrofon wird durch die Gehäuseschale geführt und mit dem Stecker des Mikrofons verbunden. Die Befestigung ist an der Außenseite der Gehäuseschale angebracht.

- **Funktionsbeschreibung des Geräts**

Das Sauerstoff-Luft-Gemisch gelangt beim Einatmen über den Schlauch und das Ventil in das Innere der Atemmaske MBU-5/P. Die ausgeatmete Luft gelangt über die Ausatemschlitze des Ventils nach außen, wenn der Druck der ausgeatmeten Luft 1,3 hPa (0,975 mmHg) höher ist als der Druck des zugeführten Sauerstoff-Luft-Gemisches.



Abb. 4.5: Atemmaske MBU-5/P mit Fliegerhelm HGU-55/G

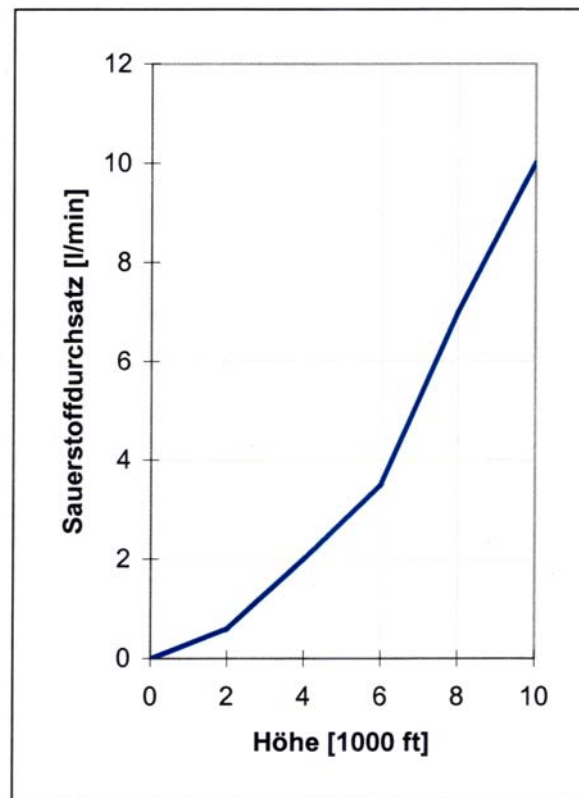


Abb. 4.6: Sauerstoffdurchsatz MiG 29

- **Zusammenwirken der Atemmaske MBU-5/P mit der Sauerstoffanlage**

Die mit dem Schlauch am Sauerstoffsystem des Luftfahrzeuges angeschlossene Atemmaske MBU-5/P wird über einen Sauerstoffbedarfsregler mit Sauerstoff oder Sauerstoff-Luft-Gemisch versorgt.

- **Anpassen der Atemmaske an den Fliegerhelm**

Die Atemmaske wird in Verbindung mit dem Fliegerhelm verwendet und am Helm mit den an der Befestigung angebrachten Bajonettverschlüssen befestigt. Die Gegenstücke sind seitlich am Helm angebracht.

Die Abb. 4.6 gibt die O₂-Verbrauchsmengen abhängig von der Kabinenhöhe am Beispiel der MiG 29 an.

4.2 Kabinendrucksysteme

Die gravierendsten physiologischen Probleme bei Flügen in größeren Höhen hängen direkt mit der Abnahme des atmosphärischen Drucks zusammen. Flugzeuge erreichen Höhen, die die menschlichen Toleranzgrenzen bei weitem überschreiten. Dies hatte zur Folge, dass zunehmend komplexe Systeme entwickelt werden mussten, die Besatzungen und Passagiere vor den Folgen des in der Höhe verminderten Außendrucks schützen können.

4.2.1 Druckkabinen

In Druckkabinen wird der Luftdruck auf einem Niveau gehalten, das höher liegt als der das Flugzeug umgebende Luftdruck. Es werden Drücke gehalten:

- die den Bedingungen am Boden entsprechen (Raumfahrt),
- die in der physiologischen Zone, d.h. unterhalb 10.000 ft liegen (zivile Luftfahrt 8.000 ft, militärische Transportflugzeuge) oder
- die in der physiologischen Mangelzone liegen, aber unterhalb der Schwelle für ein kritisches Sauerstoffmangelgeschehen (22.000 ft) bleiben (Kampfflugzeuge).

Da innerhalb der Kabinen ein höherer Luftdruck als außerhalb herrscht, müssen die Flugzeugzellen verstärkt und abgedichtet werden, um den Druck halten zu können. Diese Bauweise schränkt die Leistung (performance) ein, da das Gewicht der Flugzeugzelle erhöht wird und die Druckluft von den Triebwerken geliefert werden muss.

Völlig dichte Druckkabinen (sealed cabins)

Völlig dichte Kabinen werden bei extrem hoch fliegenden Flugzeugen und in der Raumfahrt verwendet. Die Atemluft wird aus Flüssigsauerstoffsystemen unter Zusatz eines anderen Gases (Stickstoff oder Helium) erzeugt und füllt die ganze Kabine. Atemmasken werden außer bei kritischen Flugphasen (Start / Landung) nicht getragen. Die Kabine darf nur sehr geringe Undichtigkeit aufweisen, der Druck in ihr entspricht dem Druck in Meereshöhe.

Druckbelüftete Kabinen (pressurized cabins)

Der Druck wird durch Kompressoren oder über die Triebwerksverdichterstufen erzeugt und der Kabine zugeführt. Die Menge der zugeführten Außenluft wird in Abhängigkeit vom Druck und von der Ventilation geregelt. Es gibt zwei Arten der Druckregelung:

- **Isobarische Druckregelung**

Es kann eine Kabinendruckhöhe zwischen 0 und 8000 ft gewählt werden, die dann gehalten wird bis zu einer Druckdifferenz von 566 hPa (425 mmHg, 8,25 psi) zwischen Innen- und Außendruck. Die Druckdifferenz nimmt mit steigender Flughöhe zu. Die isobarische Kabinendruckregelung ist typisch für zivile Linienverkehrsflugzeuge (vgl. Abb. 4.10).

- **Isobarische Druckregelung / Differenzdruckregelung (Kombination)**

Kampfflugzeuge haben in niedrigen Flughöhen keine Kabinendruckregelung. Nach Erreichen einer Ausgangshöhe zwischen 5.000 und 8.000 ft wird dieses Niveau bis zum Erreichen der maximalen Druckdifferenz von 345 hPa (260 mmHg, 5 PSI) gehalten. Erst danach steigt die Kabinenhöhe mit der Flughöhe an. Bei großen Reiseflughöhen wird ein Kabinendruck unter 20.000 ft gehalten. Sauerstoffmasken werden im Flug permanent getragen, mit zunehmender Kabinenhöhe wird der Atemluft über ein Regelsystem Sauerstoff beigegeben (vgl. 4.3). Die Abb. 4.7 gibt einen Gesamtüberblick, Abb. 4.8 und 4.9 zeigen die Druckregelung der Kampfflugzeuge MiG 29 und F-4F Phantom mit 4,25 bzw. 5 psi Differenzdruck.

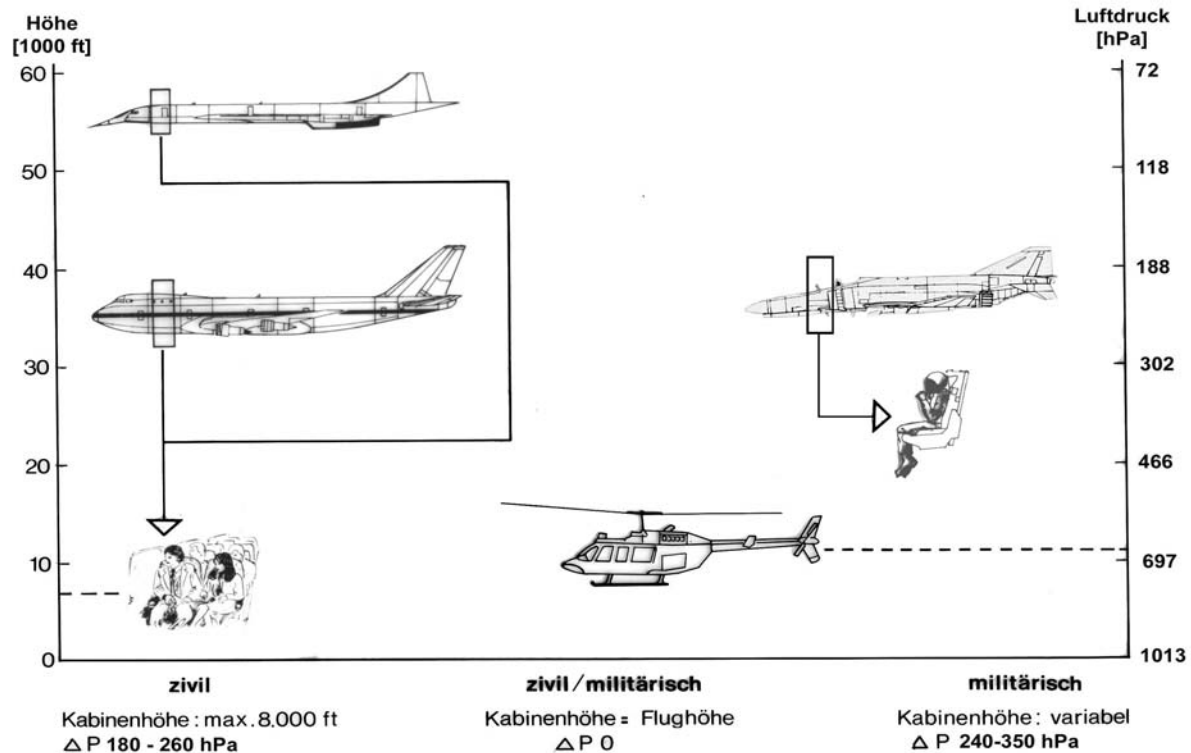


Abb. 4.7: Kabinenhöhen in Abhängigkeit von Verwendungszweck und Einsatzart

4.2.2 Besonderheiten von Druckkabinen

Vorteile

Druckkabinen halten ein Niveau entweder innerhalb der „physiologischen Zone“ also unterhalb von 10.000 ft (Verkehrsflugzeuge) oder unterhalb der Schwellenhöhe von 22.000 ft für ein kritisch verlaufendes Sauerstoffmangelgeschehen (Kampfflugzeuge). Die Gefahren der Höhenkrankheit (hypoxische Hypoxie) und der Druckfallkrankheit sowie Schwierigkeiten aufgrund der Gasausdehnung im Magen-Darmtrakt werden minimiert oder ausgeschlossen. Die Kabinen sind klimatisierbar, meist nur heizbar und ventiliert. Erst durch die Verwendung von Druckkabinen wurden große Reiseflughöhen (optimale Treibstoffnutzung = große Reichweite) weitgehend gefahrlos möglich.

Nachteile

Die Nachteile, die allerdings nicht sehr ins Gewicht fallen, sind:

- **Höheres Gewicht**, da die Flugzeugzelle verstärkt werden muss;

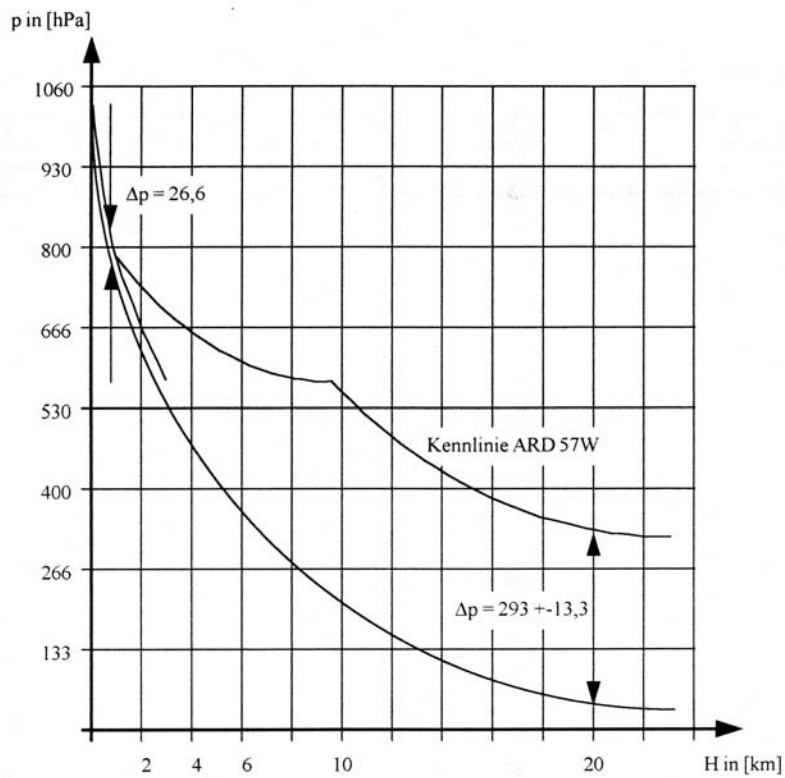


Abb. 4.8: Kabinendruck MiG 29

F-4F „Phantom“

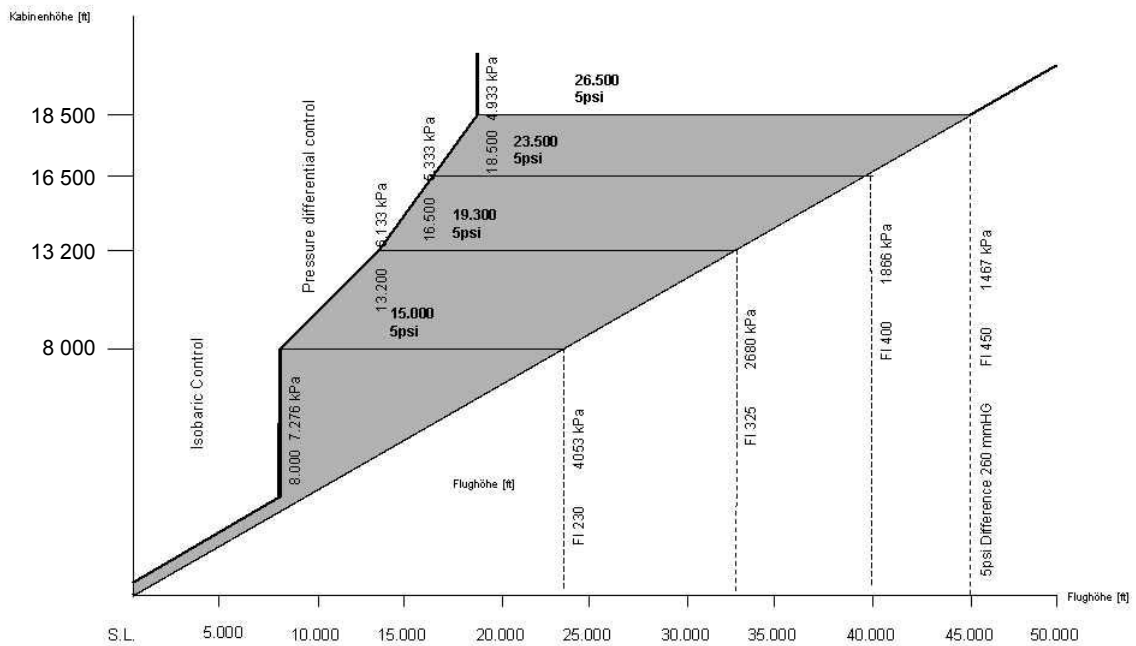


Abb. 4.9: Kabinendruck der F-4F

- **Zusätzliche Ausrüstung**; ein Teil der Triebwerksleistung wird für Druckerzeugung, Ventilation und Klimaanlage gebraucht;
- **Maximale Leistung und Zuladung** werden **beeinträchtigt**. Die größte Beeinträchtigung der Sicherheit bildet ein möglicher Kabinendruckverlust (Rapide Dekompression), wobei Besatzung und Passagiere plötzlich dem reduzierten atmosphärischen Druck ausgesetzt sind.

4.2.3 Rapide Dekompression

Faktoren, die den Dekompressionsverlauf bestimmen

- **Volumen der Druckkabine**
Je größer die Kabine ist, desto langsamer verläuft die Dekompression.
- **Leck**
Je größer das **Leck** ist, desto schneller verläuft die Dekompression.
- **Druckgefälle**
Je größer die Druckdifferenz zwischen Innen- und Außendruck ist, desto schneller verläuft die Dekompression.
- **Flughöhe**
Die physiologischen Auswirkungen im Hinblick auf Hypoxie und Druckfallkrankheit hängen von der Flughöhe ab, in der die Dekompression erfolgt. Die größten Auswirkungen wird eine Dekompression mit großem Druckunterschied zwischen innen und außen haben, die in sehr kurzer Zeit erfolgt (Vgl. Abb. 4.11).



Abb. 4.10: Faktoren einer rapiden Dekompression im Flugzeug

Physikalische Symptomatik

Eine rapide Dekompression ist mit nachfolgenden physikalisch bedingten Phänomenen verbunden.

- **Explosionsartiger Knall**
Der plötzliche Druckverlust einer Kabine ist von einem explosionsartigen Knall begleitet.
- **Aufwirbeln von Gegenständen**
In der Kabine entsteht ein Sog in Leckrichtung. Nicht verzurte Gegenstände fliegen umher, Schmutz und Staub wird aufgewirbelt.
- **Nebelbildung**
Der Druck- und Temperatursturz lässt den in der Luft enthaltenen Wasserdampf (als Nebel) kondensieren, da die Sättigung der Luft überschritten wird. Der Nebel verschwindet in kleinen Kabinen schnell, in großen langsamer (Luftströmung!).
- **Temperatur**
Die Temperatur in der Kabine fällt stark ab: Die Außentemperatur in 35.000 ft beträgt im Mittel -55°C .
- **Luftdruck**
Der Luftdruck fällt rapide ab und erreicht schließlich den atmosphärischen Druck der umgebenden Luft.

Physiologische Symptomatik

Abhängig von der Flughöhe und der Aufenthaltsdauer ist mit den nachfolgenden physiologischen Symptomen zu rechnen:

- akuter Sauerstoffmangel
- Druckfallkrankheit
- Beschwerden aufgrund der Gasausdehnung im Magen-/ Darmtrakt

Ein sofort eingeleiteter Notabstieg mindert diese akut einsetzenden Gefahren ebenso, wie die bei Verkehrsflugzeugen von Besatzung und Passagieren dann sofort zu benutzenden Sauerstoffausrüstungen. Bei Verkehrsflugzeugen besteht bei großen Lecks zudem die Gefahr, dass nicht angeschnallte Personen, die sich in der Nähe der Öffnung befinden, durch den Sog nach außen gerissen werden. Die physiologischen Auswirkungen sind bei Kampfflugzeugen weniger gravierend, da ihre Kabinen ein geringeres Druckdifferential aufweisen und damit einen geringeren „Höhensprung“ bei einer Dekompression haben. Sauerstoffmasken werden außerdem im Fluge ständig getragen und die Regler würden den für die jeweilige Höhe erforderlichen Sauerstoff zeitverzugslos liefern. Notabstiege können außerdem aufgrund der Flugleistungen wesentlich schneller durchgeführt werden als mit den sehr viel größeren Verkehrsflugzeugen. Eine physiologische Besonderheit bei der Dekompression, die ein zusätzliches Gefahrenmoment darstellt, sei noch angemerkt: Nach einer rapiden Dekompression auf Werte über 25.000 ft (Höhensprung) kommt es kurzzeitig zu einer Diffusion von O_2 aus dem venösen Blut heraus in die Alveolen der Lunge. Man spricht von einem **umgekehrten Diffusionsgefälle**. Die Selbstrettungszeiten (EPT = Effective Performance Time od. TUC = Time of useful consciousness) sind daher nach einer rapiden Dekompression noch kürzer, als es sonst in der entsprechenden Höhe zu erwarten wäre (vgl. 3.8).

4.3 Verwendete und weiterführende Literatur:

Cogo, A., Legani, D., Allegra, L. Respiratory function at different altitudes. *Respiration* 64 (6), 416 – 421, 1997

Holtmann, H. Im Falle eines plötzlichen Druckverlustes: rapid decompression und Flugsicherheit. *Flug- und Reisemedizin* 2 (2), 4 – 6, 1995

Forte, V. A., Leith, D. E., Muza, S. R., Fulco, C. S., Cymerman, A. Ventilatory capacities at sea level and high altitude. *Aviat Space Environ Med* 68 (6), 488-493, 1997

5 Auswirkungen von Luftdruckänderungen

Die Veränderung des Umgebungsdrucks beeinflusst den Menschen auf vielfältige Weise. Beim Ab- und Auftauchen im Wasser sind die Druckdifferenzen des umgebenden Mediums besonders groß: Sie liegen für den Taucher etwa im Bereich von 1013 hPa (1 bar, Meereshöhe) bis zu 5065 hPa (5 bar, 40 m Wassertiefe) und darüber.

Beim Auf- und Abstieg innerhalb der Luftatmosphäre beträgt die maximale Druckdifferenz zwischen Meereshöhe und Weltraum zwar nur 1013 hPa, die Auswirkungen sind aber nicht minder schwerwiegend.

Hier sollen nur jene Auswirkungen beschrieben werden, die der Mensch bei wechselndem Luftdruck entsprechend den Gasgesetzen nach BOYLE-MARIOTTE und HENRY (vgl. Kap. 1) erfährt.



Abb. 5.1: Zur Wirkung von eingeschlossenen und gelösten Gasen bei Luftdruckänderungen

5.1 Auswirkungen nach dem Gasgesetz von BOYLE-MARIOTTE

Der menschliche Körper toleriert auch große Druckunterschiede, solange ein Druckausgleich zwischen dem Körperinnern und der Umgebung hergestellt werden kann. Mittelohr, Nasennebenhöhlen, Magen-Darmtrakt und Atmungstrakt sind Körperhöhlen, die unterschiedliche Mengen Gas enthalten. Bei Druckwechsel außerhalb des Körpers folgen diese Gase dem Gesetz von BOYLE-MARIOTTE: Nimmt der Druck mit zunehmender Höhe (Steigflug) ab, dehnen sie sich aus. Bei zunehmendem Druck (entsprechend einem Sinkflug) werden sie komprimiert. Eine Besonderheit in den Körperhöhlen ergibt sich dadurch, dass die darin enthaltene Luft nicht trocken, sondern wasserdampfgesättigt ist. Bei der normalen Körpertemperatur (37 °C) ist der Wasserdampf-Partialdruck 62,5 hPa (47 mmHg). Bei abnehmendem Luftdruck finden wir bei wasserdampfgesättigter Luft eine größere Volumenzunahme, als dies bei trockenen Gasen der Fall ist. Abb. 5.2 zeigt die Verhältnisse (s. auch Kap. 1.4.1).

Höhe	Barometrischer Druck		Volumen trockener Gase	Volumen Feuchter Gase
	[ft]	[hPa]	[mmHg]	[l]
0	1013	760	1,0	1,0
10.000	697	523	1,5	1,5
20.000	466	350	2,2	2,4
30.000	302	227	3,4	4,0
40.000	188	141	5,4	7,6
50.000	117	88	8,7	17,4
60.000	72	54	14,1	100,1
63.000	63	47	16,1	nicht definiert
Wasserdampf-Partialdruck bei 37°C = 62,5hPa (47 mmHg)				

Abb. 5.2: Volumenzunahme in verschiedenen Höhen bei trockener und wasserdampfgesättigter Luft

5.1.1 Mittelohr

Das Mittelohr ist eine mit Schleimhaut ausgekleidete kleine Knochenhöhle hinter dem Trommelfell, die über einen normalerweise verschlossenen Gang, die Eustachische Röhre (E.R. oder Tuba Eustachii), mit dem Nasen-Rachen-Raum verbunden ist. Beim Gähnen, Kauen, Schlucken ziehen Muskelfasern die E. R. kurzzeitig auf, so dass bei langsam ablaufenden Druckänderungen (z.B. wetterbedingte Hoch-/Tiefdruckänderung, Bergwandern, Passüberfahrten mit dem Auto) problemlos ein Druckausgleich erzielt werden kann. Ihre enge Bauweise verhindert normalerweise eine bakterielle Besiedlung des Mittelohrs, schafft aber bei rasch ablaufenden Druckänderungen Probleme, erst recht beim entzündlichen Verschluss. Bei raschen Druckänderungen (Tauchen, Fliegen) kommt es selbst bei einer nicht entzündlich veränderten E. R. bisweilen - vor allem bei einer Druckzunahme (Abtauchen, Sinkflug) – zu einem mangelhaften Druckausgleich. Durch ihre Schlauchform wirkt die E.R. als „Einwegventil“, die Entlüftung des Mittelohrs (beim Aufstieg) erfolgt somit leichter als die Belüftung (Abstieg). Die resultierende Druckdifferenz zwischen Außenwelt und Mittelohr drückt das Trommelfell schmerzhaft nach innen (vgl. Abb. 5.3). Erkältungen mit banalem Schnupfen führen zu erheblichen Einschränkungen der Be- und Entlüftung des Mittelohrs, da sie mit einer serösen oder eitrigen Verklebung der E. R. und somit mit einem völligen Verschluss einhergehen kann (Tuberkatarrh). Ist die Tubendurchgängigkeit dadurch behindert, kommt es vor allem beim Abstieg zum gefürchteten Earblock, einer Form des Barotraumas. Das Trommelfell wird schmerzhaft nach innen gedrückt, das Hörvermögen wird in den oberen Frequenzen durch die Vorspannung erheblich beeinträchtigt; es kommt zu einem zunächst serösen, dann blutigen Erguss hinter dem Trommelfell (Hämatotympanon); dies führt zu einer entzündlichen Veränderung des Trommelfells und des Mittelohrs (Barotitis media). In Ausnahmefällen kann es auch zu einem Trommelfelleinriss kommen. Bei leichteren Fäl-

len, in denen der Pilot aufkommende Schwierigkeiten mit dem Druckausgleich spürt, ist es möglich, mit dem VALSALVA-Manöver Abhilfe zu schaffen: Eine Press-Ausatmung gegen den geschlossenen Mund und die geschlossene Nase (mit den Fingern zuhalten!) führt zu einem starken Druckaufbau im Rachen gegen das Mittelohr. Die Luft wird in das Mittelohr gedrückt und somit ein Druckausgleich ermöglicht.

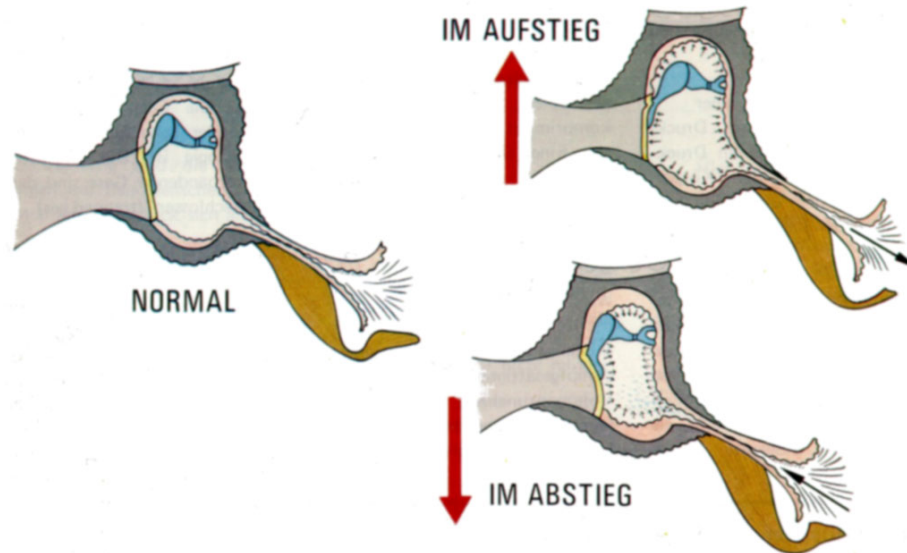


Abb. 5.3: Zum Druckausgleich im Mittelohr

Ist die Druckdifferenz bereits sehr hoch, kann mit dem VALSALVA-Manöver im Nasen-Rachen-Raum für die Belüftung des Mittelohrs evtl. nicht mehr genügend Überdruck aufgebaut werden. Aus diesem Grund sollten schlafende Passagiere vor dem Abstieg geweckt und zur Anwendung des VALSALVA-Manövers angehalten werden. Bei einem entzündlichen Earblock (z. B. bei einem akuten Schnupfen oder einer Mittelohrentzündung, Barotitis media) reicht dieses Manöver allein nicht mehr aus: Die Kombination von Minderung der Druckdifferenz (Wiederaufstieg), Einnahme von abschwellenden Nasentropfen und VALSALVA-Manöver kann zum Druckausgleich und damit zu einer Besserung der Beschwerden führen.

5.1.2 Nasennebenhöhlen

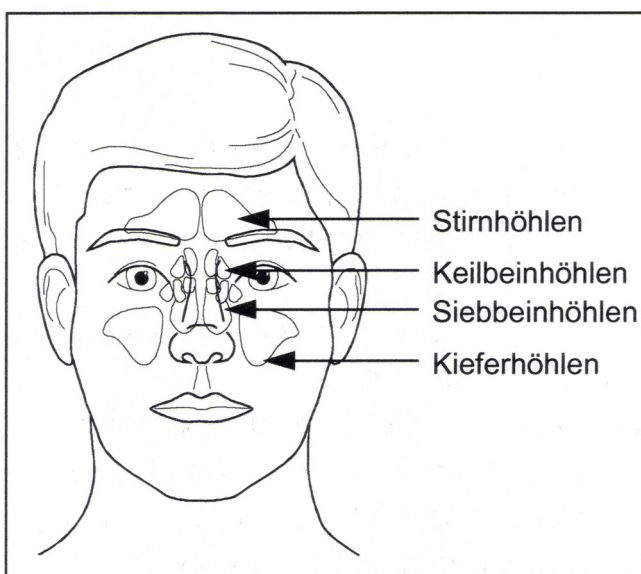


Abb. 5.4: Nasennebenhöhlen

Auch die Nasennebenhöhlen, zu denen die Kiefer-, Stirn-, Keilbeinhöhlen und Siebbeinzellen gehören, zählen als luftgefüllte knöcherne Hohlräume zu den geschlossenen Körperhöhlen. (vgl. Abb. 5.4). Die Nebenhöhlen stehen durch tunnelartige Gänge mit dem Rachen in Verbindung. Beim Aufstieg kommt es hier, ähnlich wie beim Mittelohr, kaum zu Schwierigkeiten. Wenn die mit Schleimhaut ausgekleideten Zugänge zu den Nebenhöhlen jedoch verengt sind (anlagebedingt, Polypen, entzündliche Schleimhautschwellungen), kann es auch hier vor allem beim Abstieg zu einem mangelnden Druckausgleich kommen, der sich als dumpfes Druckgefühl im

Schädel, halb- oder doppelseitig bis hin zu stechenden Schmerzen im inneren Augenwinkelbereich äußert. Für eine Abhilfe gelten die gleichen Regeln wie bei der Barotitis media.

5.1.3 Die Zähne

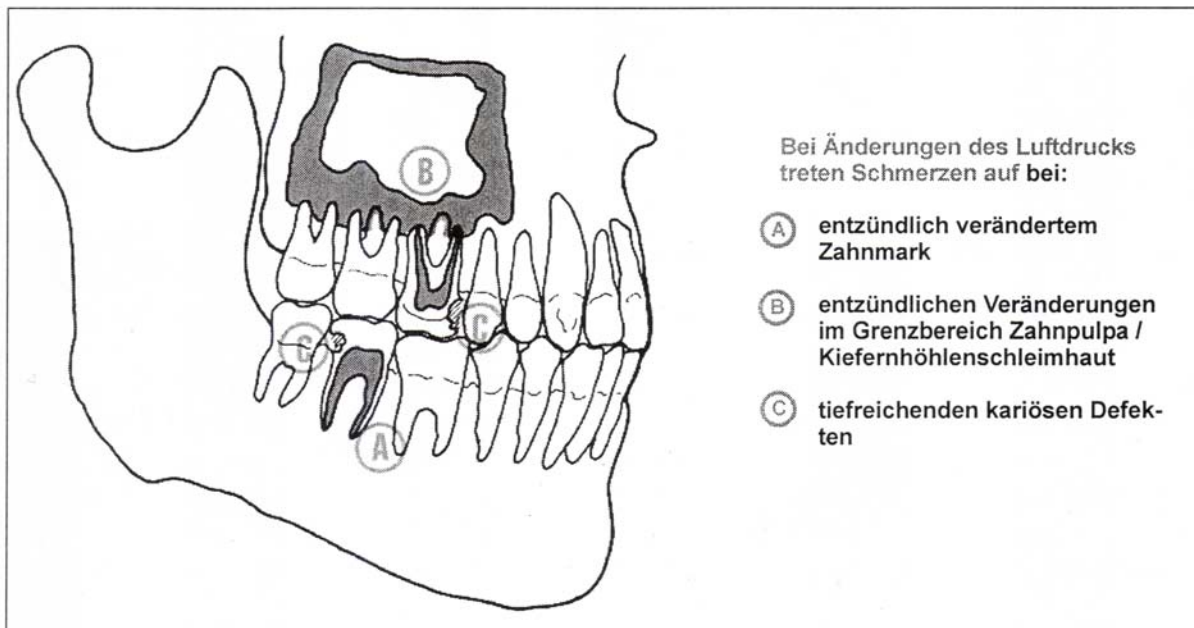


Abb. 5.5: Barodontalgie

Gesunde Zähne verursachen im Höhenwechsel keine Probleme. Entzündetes Zahnmark (Pulpa) hingegen kann sowohl beim Ab- wie auch beim Aufstieg erhebliche Schmerzen bereiten (Barodontalgie Abb. 5.5). Während früher tote, wurzelbehandelte Zähne als Hauptfaktor für das Auftreten von Barodontalgien angesehen wurden, sprechen jüngere Untersuchungen eher dafür, dass Zahnschmerzen unter Unterdruckbedingungen an solchen Zähnen auftreten, die ein vorgeschädigtes Markorgan (Pulpa) haben oder solchen mit tiefreichenden kariösen Defekten. Weitere Möglichkeiten der Entstehung von Zahnschmerzen ergeben sich wahrscheinlich beim gemeinsamen Vorhandensein von Entzündungsprozessen in den Kieferhöhlen und an den Zähnen im Oberkiefer. Während diese Schmerzen bevorzugt beim Sinkflug auftreten und nicht genau in einem Zahn zu lokalisieren sind, entstehen die zuerst beschriebenen Schmerzen beim Aufstieg in sehr unterschiedlicher Höhe.

5.1.4 Magen-Darm-Trakt

Auch der Magen-Darm-Trakt gehört zu den geschlossenen Körperhöhlen; im Gegensatz zu den knöchernen Nasennebenhöhlen ist er allerdings sehr elastisch. Eingeschlossene Gase (verschluckte Luft oder Kohlensäure aus sprudelnden Getränken im Magen, „Winde“ im Darmbereich) unterliegen den Gesetzmäßigkeiten nach BOYLE-MARIOTTE:

Beim Aufstieg erhöht sich das Volumen der eingeschlossenen Gase beträchtlich (siehe Abb. 5.6), umso mehr, als diese ja wasserdampfgesättigt sind (vgl. auch Kapitel 1).

Vor allem bei einem Aufstieg in größere Höhen (über 20.000 ft), bei dem das Volumen der eingeschlossenen Gase sich bereits mehr als verdoppelt hat, werden Magen- und Darmwände schmerzhaft überdehnt (Blähungsschmerz). Ein überdehnter Magen drückt auf das Zwerchfell, behindert die Atemtätigkeit; ja es kann sogar zu einer Komprimierung der großen Hohlvene kommen, die hinter dem Magenbereich verläuft (Beeinträchtigung des Kreislaufs).

Abhilfe schafft die Entlüftung des Magens („Rülpfen“) sowie des Darmes (Entweichen der „Winde“). Deshalb sollten vor Antritt eines Fluges keine kohlenensäurehaltigen Getränke und blähende Kost (rohe Zwiebel, Bohnen etc.) genossen werden. Wenn alles nichts hilft, bleibt nur noch der Abstieg in niedrigere Flughöhen (bzw. Erhöhung des Kabinendrucks), wodurch die Schmerzen nachlassen.

Zusammenfassung:

- Beschwerden treten erst in größeren Höhen auf
- Vermeidung von Blähbeschwerden durch Verzicht auf blähende Kost und kohlenensäurehaltige Getränke
- Abhilfe durch willkürliches Entlüften des Magen-Darm-Traktes
- Notmaßnahme: Höhenaufgabe.

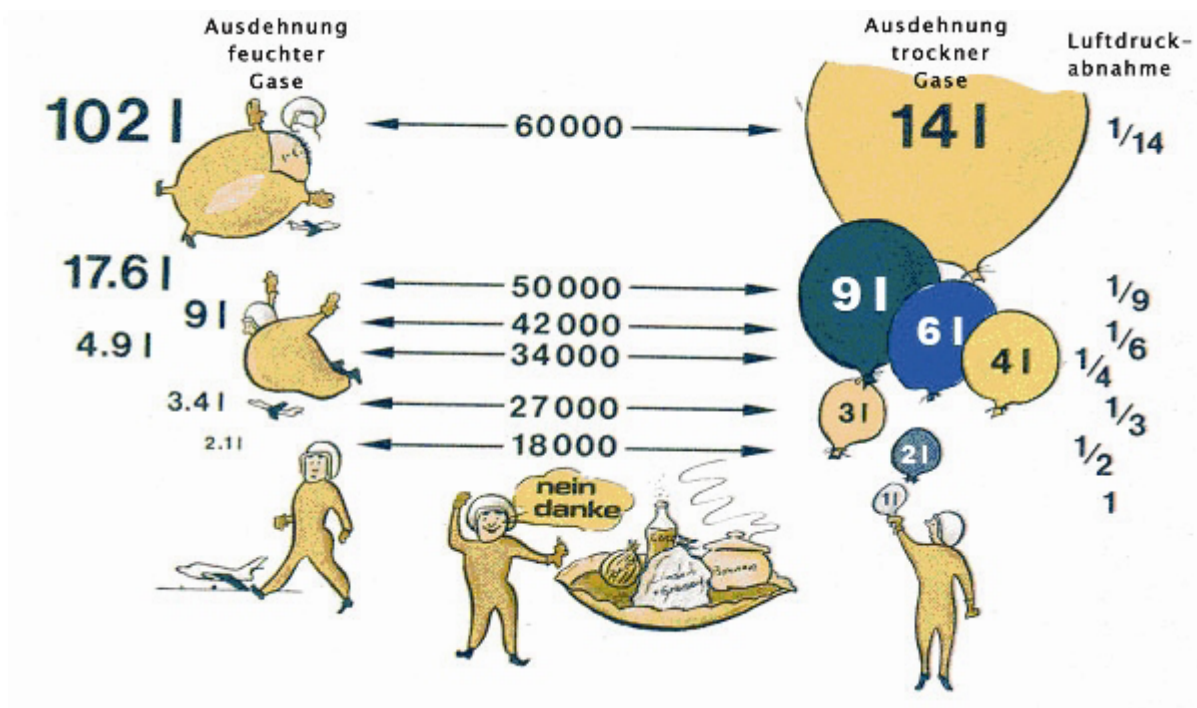


Abb. 5.6: Zur Ausdehnung von Gasen im Magen-Darm-Trakt

Für den Lufttransport Verwundeter und Kranker gilt: Bei Patienten kurz nach einer Bauchoperation bilden sich infolge der postoperativen Darmträgheit oft Gasansammlungen, deren Volumen bei fallendem Außendruck entsprechend dem BOYLE-MARIOTTE'schen Gasgesetz so zunimmt, dass es zu Nahtdehissenzen kommen kann. Deshalb ist hier der Lufttransport in nicht druckbelüfteten Luftfahrzeugen nicht angezeigt. Das gilt nicht für frische Verletzungen des Bauchraums, sofern die Bauchhöhle offen oder über Drainagen belüftet ist.

Entscheidend ist also stets die Überlegung, ob eingeschlossene Gase entweichen können, bzw. ob ein Druckausgleich möglich ist oder nicht.

5.1.5 Lunge

Die Lunge kann nur dann zu den geschlossenen Körperhöhlen gezählt werden, wenn die Stimmritze im Kehlkopf geschlossen ist. Damit erst wird ein Druckausgleich zwischen Lunge und Außenwelt verhindert. Bei einer Abnahme des Luftdruckes würde dann die eingeschlossene Luft zu einer Überblähung der Lungen führen. Für die Fliegerei ist das ohne praktische Bedeutung, weil der Luftdruck während des Steigfluges nur langsam abnimmt und die Stimmritze solange nicht geschlossen gehalten werden kann. Selbst bei einer rapiden De-

kompression der Flugzeugkabine wäre eine Lungenüberdehnung nur denkbar, wenn die rapide Dekompression zeitlich mit dem Schließen der Stimmritze zusammenfällt. Hinzu kommt der vergleichsweise kleine Druckabfall: Der rapide Kabinendruckverlust beginnt ja nicht in Bodenhöhe, sondern ab der jeweiligen Kabinenhöhe, also beispielsweise bei 8.000 ft. Bei einem Sprung in eine Flughöhe von etwa 24.000 ft (wie das jeder Flugzeugführer in der Unterdruckkammer trainiert) kommt es zu einem raschen Druckverlust von etwa 50 %, d. h. das Lungenvolumen nimmt maximal um das Doppelte zu.

Anders verhält sich das bei einem **Taucher**, der z. B. in einer Tiefe von 40 m in Panik gerät, mittels seiner Rettungsweste einen Notaufstieg an die Wasseroberfläche durchführt und dabei den Atem anhält (Stimmritze geschlossen), sei es aus der Paniksituation heraus oder im irrigen Glauben, beim Notaufstieg seinen Lungenluftvorrat halten zu müssen. Bei einer linearen Wasserdruckabnahme beträgt hier der rasche Druckverlust 80 %, d.h. das Lungenvolumen vergrößert sich um den Faktor 5! Dies führt dann zu einer massiven, meist tödlichen Überblähung der Lungen mit Rupturen des Lungengewebes.

Für den Lufttransport von Verwundeten und Kranken kommt einem Pneumothorax dann eine besondere Bedeutung zu, wenn die Pneu-Höhle nicht mit der Außenluft (z.B. durch einen Stichkanal oder eine Drainage der Brustwand) in Verbindung steht. Ein Druckausgleich ist dann nicht möglich. Die eingeschlossene Luft dehnt sich mit zunehmender Höhe aus und verschiebt im Sinne eines Spannungspneumothorax das Mediastinum zur gesunden Lungenseite.

In der FA InspSan B 45.01 Anlage 1 (4) wird hierzu ausgeführt :

„Patienten mit Gas in geschlossenen Körperhöhlen, z. B. bei Pneumothorax, Ileus oder akuter Sinusitis sowie Patienten in den ersten 10 postoperativen Tagen nach Bauch- / Brusthöhlenoperationen sind in nicht druckbelüfteten Luftfahrzeugen grundsätzlich nicht transportfähig.“

5.2 Auswirkungen nach dem Gasgesetz von HENRY

Der Abfall des Luftdruckes, der den Menschen umgibt, hat unter bestimmten Umständen aber noch eine andere Folge, die nach dem Gasgesetz von HENRY (vgl. auch Kapitel 1) erklärt werden kann:

5.2.1 Die Druckfallkrankheit

Die Druckfallkrankheit wird auch als Dekompressions-Krankheit oder „Decompression Sickness“ (DCS) bezeichnet

Dysbarismus ist der allgemeine Ausdruck für Erkrankung durch „falschen Luftdruck“. Einerseits steht er für die Druckfallkrankheit, andererseits für alle Erscheinungen, die mit dem Abfall des Luftdrucks verbunden sind. Wegen seiner unklaren Definition und wechselnden Verwendungen stiftet dieser Begriff nur Verwirrung, ist veraltet und **soll daher vermieden werden**.

Aeroembolismus (Gasblasen in Blutgefäßen) und **Aeroemphysem** (Gasblasen im Gewebe) können Folgen eines starken Druckabfalls sein, werden aber fälschlich mit der Druckfallkrankheit selbst gleichgesetzt. Als **Caissonkrankheit** wird die Druckfallkrankheit unter einer speziellen Arbeitsbedingung bezeichnet.

Die ersten Dekompressionserscheinungen bemerkte man Mitte des 19. Jahrhunderts bei Caissonarbeitern (Caisson, franz. = Kasten). So wurden die Senkkästen genannt, die man zu Erdarbeiten auf dem Meeresgrunde einsetzte. Diese Kästen, nach unten hin offen, wurden so unter Überdruck gehalten, dass kein Wasser von unten her eindringen und man im Trockenen arbeiten konnte. Nach dem Verlassen des Caisson klagten Arbeiter immer wieder über Krankheitserscheinungen, vornehmlich über Gelenkbeschwerden.

Auch heute noch werden Tiefbaustellen (z.B. im U-Bahn-, Tunnelbau) in einem Luftüberdruck gehalten, um das Eindringen von Grundwasser zu verhindern.

Der französische Physiologe Paul Bert hatte 1878 in seinem Buch „La pression barométrique“ die Ursachen der Erkrankung bereits klar als Auswirkung des im Körper gelösten Stickstoffs erkannt. Erst 1908 wurden die Verhütungsmöglichkeiten von Sir John Haldane erarbeitet und in seinem Buch „Respiration“ veröffentlicht.

Dekompressionserscheinungen können bei Tauchern wie auch bei Luftfahrzeugbesatzungen auftreten. Um die Gemeinsamkeit der beiden Erscheinungsformen herauszustellen, wurde im deutschsprachigen Raum die Bezeichnung „Druckfallkrankheit“ eingeführt.

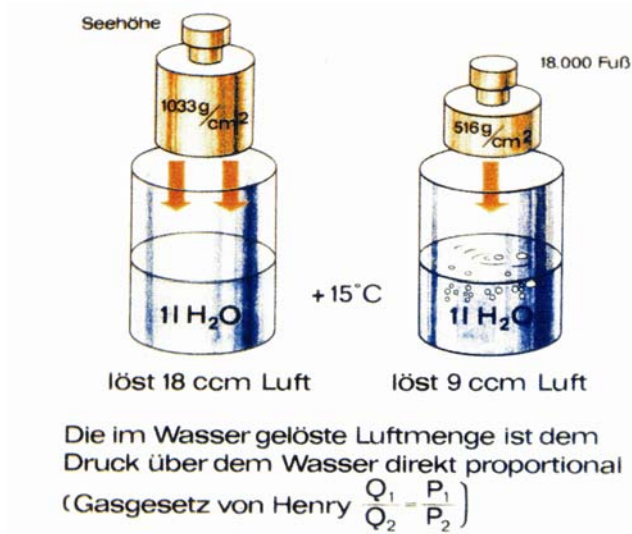


Abb. 5.7: Zur Lösung von Gasen aus Flüssigkeiten nach HENRY

Entstehung

Nach dem Gasgesetz von HENRY lösen sich Gase in Flüssigkeiten proportional zum über der Flüssigkeit herrschenden Druck (vgl. Abb. 5.7).

Auch die Lösung der Inertgase (Stickstoff und Edelgase) im Körper ist eine lineare Funktion des jeweiligen Partialdrucks. Sie hängt weiterhin ab von den spezifischen Absorptionskoeffizienten der Organe: Gewebe mit fettartigen Substanzen (Fett- und Nervengewebe) speichern Stickstoff besonders gut. Erfolgt nun eine langsame Drucksenkung, so kann das freiwerdende Gas über Blut und Lunge abdiffundieren. Bei einem

Drucksturz (Rapide Dekompression) sind die Körperflüssigkeiten jedoch plötzlich übersättigt, die Gase werden frei und perlen aus. In den Zellen, in den Zellzwischenräumen und in den Kapillaren bilden sich Blasen. Je nach Größe, Anzahl und Lage der Blasen kommt es zu Durchblutungsstörungen, Schmerzen und Zellschädigungen. Die Existenz dieser Gasblasen ist in den letzten Jahren in zahlreichen Untersuchungen an Mensch und Tier u.a. mit Hilfe der Ultraschall-Doppler-Sonographie nachgewiesen worden. Mit dieser Methode können Bläschen ab einer Größe von 40 bis 50 Mikrometer akustisch „hörbar“ gemacht werden, wenn sie sich in den Gefäßen bewegen. Die Abb. 5.8 zeigt die nach einem Drucksturz aufgetretenen Bläschen in kleinen Venen von Versuchstieren. Die Verlegung des Gefäßquerschnittes wird deutlich.

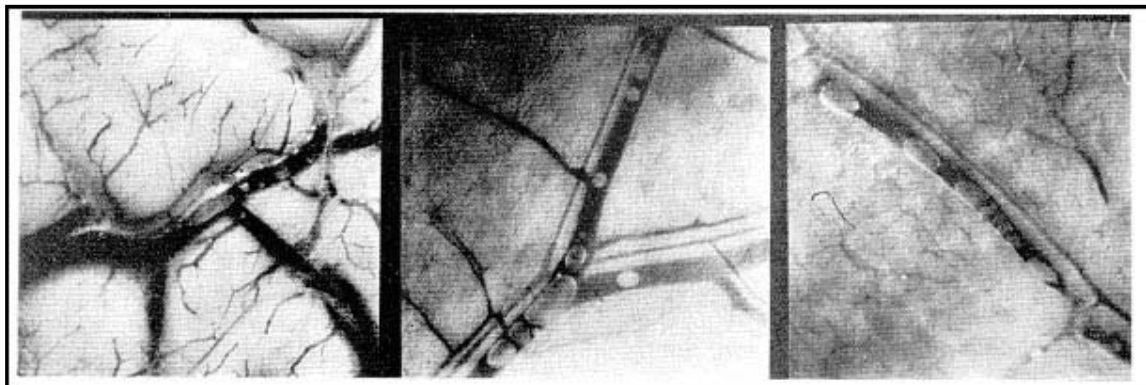


Abb. 5.8: Bläschenbildung in Blutgefäßen nach Drucksturz

Für das Entstehen einer Druckfallkrankheit sind nachfolgende Faktoren maßgeblich:

Steiggeschwindigkeit

(rate of onset), die Zeitspanne des Druckabfalls. Je kürzer sie ist, desto weniger Zeit hat der Organismus, den Stickstoffüberschuss über die Lunge abzuatmen und desto mehr besteht die Gefahr des gasförmigen Ausperlens. Im Flugzeug wird dieser Faktor durch die Größe

des Lecks in der Kabine bestimmt, beim Tauchen durch Auftauchgeschwindigkeit (deshalb sind feste Auftauchzeiten vorgeschrieben!).

Größenordnung des Druckfalls

Der Umfang des Druckabfalls, der in der Lage ist, Krankheitszeichen auszulösen, liegt bei etwa **50 % des Ausgangsdrucks**, gelegentlich auch darunter.

Das bedeutet also Gefahr der Auslösung von Druckfallsymptomen bei einem Drucksturz von Meereshöhe auf 18.000 ft oder bei einer Rapiden Dekompression von einer Kabinenhöhe von 7.000 ft auf eine Flughöhe von 24.000 ft oder höher. Auch ein Taucher, der aus der Tiefe von 40 m (bei Pressluftatmung und N₂-Sättigung des Körpers) rasch auf 15 m aufsteigt, gibt 50 % seines Ausgangsdruckes auf.

Druckstürze größeren Umfangs sind entsprechend gefährlicher.

Apnoetaucher, die innerhalb kürzester Zeit bis auf Tiefen von 90 m ab- und wieder auftauchen, sind nicht druckfallkrankheitsgefährdet, weil sie bei der kurzen Tauchzeit nicht atmen und sich so eine dem hohen Druck entsprechende N₂-Menge nicht im Körper lösen kann.

Körperliche Aktivität

verursacht durch die vermehrte Durchblutung eine schnellere Sättigung des Gewebes mit N₂. Sie begünstigt aber auch das N₂-Ausperlen nach einem Drucksturz. Wer eine Druckfallerkrankung erlitten hat oder aufgrund der Situation mit (oft verzögert einsetzenden) Symptomen rechnen muss, sollte sich daher möglichst wenig bewegen.

Konstitution

Fettgewebe bindet Stickstoff fünffach stärker als Wasser. Folglich stellt das Körperfett Übergewichtiger geradezu ein Stickstoffreservoir dar. Die Diffusion von N₂ aus Fettpolstern erfolgt langsamer (späte Symptome!) als aus wässrigen Körperflüssigkeiten. Mit zunehmendem Alter steigt die Anfälligkeit, frühere Verletzungen und Narben begünstigen die lokale Blasenbildung.

5.2.1.1 Symptome der Druckfallkrankheit

In Abhängigkeit von den vorgenannten Faktoren, der Größe und Lokalisation der N₂-Bläschen kommt es zu vier Hauptsymptomgruppen:

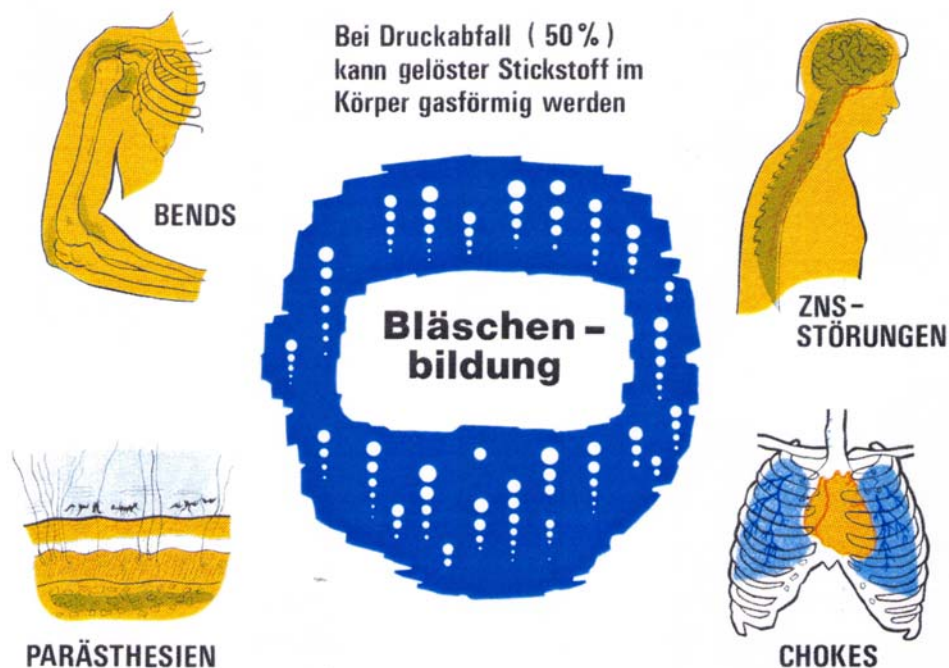


Abb. 5.9: Symptome der Druckfallkrankheit

Paraesthesien

stellen eine milde Form der Dekompressions-Krankheit dar. Es handelt sich um einen lokalen („Taucherflöhe“) oder auch generalisierten („Ameisenlaufen“) Juckreiz, der bisweilen mit livider Hautverfärbung an den juckenden Stellen verbunden ist. Kleine punktförmige, flohstichartige Blutungen (Petechien) sind ernstzunehmende Zeichen. Die Ursache liegt in den Gasbläschen im Unterhautfettgewebe. Durch Kratzen werden die Bläschen nur verteilt und die vom Juckreiz befallene Fläche vergrößert sich.

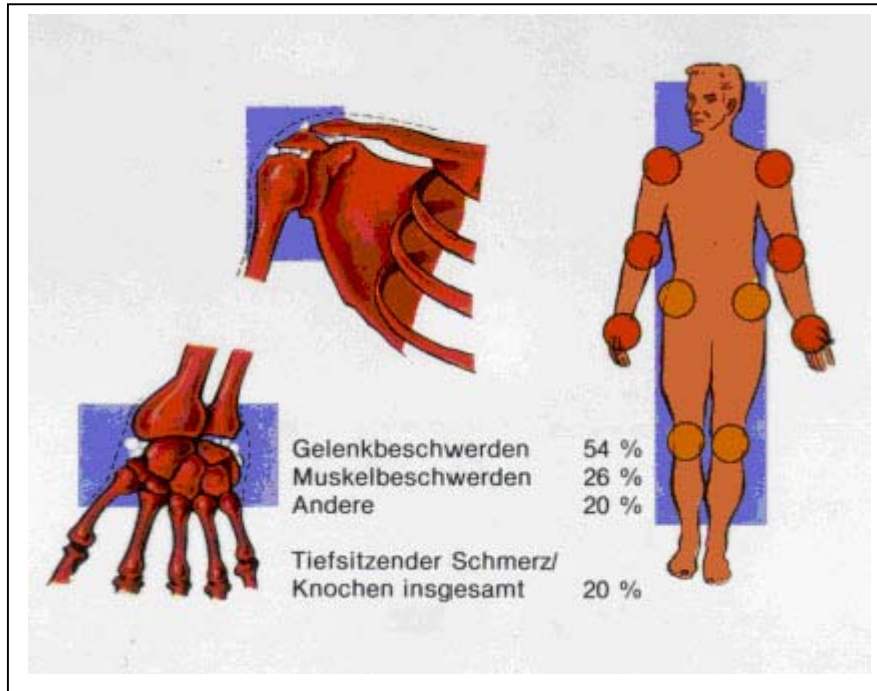


Abb. 5.10: Lokalisation der Bends

ke sowie Hüft- und Fußgelenke in fallender Häufigkeit (vgl. Abb. 5.10).

Zur Unterscheidung von Gelenkbeschwerden aus anderen Ursachen wird das Anlegen und Aufblasen einer Blutdruckmanschette empfohlen. Handelt es sich um Bends, bessern sich die Beschwerden merklich. Beim Auftreten von Bends sind Körperbewegungen (z.B. im Flugzeug) möglichst einzuschränken, um die Symptomatik nicht weiter zu verschlimmern und eine völlige schmerzhaft bedingte Gebrauchsunfähigkeit zu vermeiden.

Chokes (engl.: to choke = ersticken)

Stickstoffembolien im Lungengefäßnetz verursachen brennende Schmerzen hinter dem Brustbein, insbesondere bei tiefer Einatmung, häufig verbunden mit Reizhusten und Erstickenanfällen, gefolgt von allgemeinen Kollapszeichen (kalter Schweiß, Blässe, Schwindel).

Schock

Ein Kreislaufschock oder ein neurozirkulatorischer Schock kann nach einem Drucksturz jederzeit im Gefolge der genannten Symptome oder auch ohne diese auftreten. Besonders gefürchtet ist der Spätschock, der erst nach einem symptomfreien Intervall (nach 2 bis 12 Stunden) auftritt. Hier ist für eine Diagnose die Anamnese wichtig!

Bends (engl. to bend = beugen)

Zu den am häufigsten auftretenden Symptomen gehören Schmerzen in Gelenken und Muskeln. Sie beginnen oft mit einem tauben Gefühl. Innerhalb einer Stunde entwickeln sich dumpfe, manchmal auch pochende Schmerzen. Die Bezeichnung „Bends“ deutet auf die Schonhaltung der Gelenke in Beugestellung hin.

Betroffen sind die am meisten bewegten Gelenke, also Schulter-, Ellbogen-, Handgelen-

Neurologische (ZNS-)Störungen

Je nach Größe und Sitz der Bläschen kommt es auch zu Störungen und Ausfällen im Hirn- und peripheren Nervenbereich. Verhältnismäßig häufig werden Kopfschmerzen, Seh- und Hörstörungen, Ohrensausen und Muskelzittern beobachtet. Gasblasen im Rückenmark führen je nach Sitz zu schlaffen ein- oder doppelseitigen Lähmungen bis zum Vollbild einer Querschnittslähmung einschließlich Blasen- und Darminkontinenz.

Schwere Verlauf des möglichen Erkrankungsbildes ist Grund dafür, dass jede Form der Druckfallkrankung möglichst schnell in die Behandlung eines erfahrenen Flieger- oder Taucherarztes mit der Möglichkeit einer Rekompessionsbehandlung (s. u.) gehört. Das gilt auch für leichte (anfängliche) Symptome, wenn die Anamnese eine Druckfallkrankheit nicht ausschließt vor allem im Hinblick auf einen möglicherweise protrahierten Verlauf!

Besonderheiten beim Fliegen nach Tauchen

Der moderne Flugtourismus hat es mit sich gebracht, dass immer mehr Urlauber am Ferienort auch Unterwassersport betreiben, in größere Wassertiefen abtauchen, durch eine fehlende oder mangelhafte Ausbildung die erforderlichen Auftauchzeiten aber nicht genau einhalten und sich somit der Gefahr einer Druckfallkrankheit aussetzen. Wurde kurz vor dem Abflug noch ein Tauchgang unternommen, so wird leider oft genug beobachtet, dass sich erst im Flugzeug (Kabinenhöhe 8.000ft !) die ersten Symptome einer Druckfallkrankheit einstellen bzw. leichte Symptome, die vor Antritt des Fluges übersehen wurden, in schwere Symptome übergehen. Beim Tauchen geht in Abhängigkeit von Tauchzeit und -tiefe immer mehr gasförmiger Stickstoff aus der Atemluft in Lösung. Der Zeitbedarf, diesen Stickstoff beim Auftauchen wieder durch Diffusion über die Lunge abzuatmen, ist in der Regel deutlich größer als die Zeit, die der Taucher benötigt, zur Wasseroberfläche zu schwimmen. Beim Auftauchen sind daher, sofern es sich nicht um sog. „Nullzeittauchgänge" handelt, bestimmte Dekompressionspausen (Tauchtabellen) vorgeschrieben.

Beispiel:

Nach einem Tauchgang von 25 Min. in 36 m muss die erste Auftauchphase in 6 m für 3 Min. und eine weitere in 3 m für 6 Min. eingelegt werden, um eine Dekompressionskrankheit zu vermeiden.

Tauchtabellen (z.B. „Deko-Tabellen für Taucher", Albert-Müller-Verlag, Zürich, 1984) enthalten zusätzlich die Mindestzeiten, die nach einem bestimmten Tauchgang und dem Antritt eines Fluges (Kabinenhöhe 8.000 ft) eingehalten werden müssen.

Für Luftfahrzeugbesatzungen der Bw ist das Verhalten nach Aufenthalt im Über- bzw. Unterdruckbereich in der BesAnGenArztLw 707/5096, Ziff. 314 ff geregelt.

Vorbeugung und Behandlung

Eine gute und intensive Unterrichtung über die physiologischen Zusammenhänge, die zur Dekompressions-Krankheit führen können, über deren Vermeidung und Therapie ist sicherlich die beste Vorbeugemaßnahme.

Bei einer rapiden Dekompression im Flug sind folgende Maßnahmen zu ergreifen, um einer drohenden Druckfallkrankheit vorzubeugen:

- **Sofortige Höhengabe**
mindestens in die Flughöhe, die vorher der Kabinenhöhe entsprach.
- **Atmung von 100 % O₂**
Der Partialdruck von N₂ in der Atemluft wird damit null, die Diffusion von N₂ über die Lunge beschleunigt.
- **Landung auf dem nächsterreichbaren Platz**
- **Aufsuchen des Fliegerarztes.**

Zur Vermeidung einer Druckfallkrankheit bei routinemäßigen Aufstiegen in große Höhen wie auch bei rapiden Dekompressionen, wie das beispielsweise in der U-Kammer am FIMedInstLw durchgeführt wird, wird eine halbstündige Voratemzeit mit reinem Sauerstoff vorgeschaltet. Während dieser Zeit diffundiert der Stickstoff, der der Einatemluft fehlt, infolge der Konzentrationsdifferenz über die Lunge in die Ausatemluft ab und wird somit aus dem Körper entfernt.

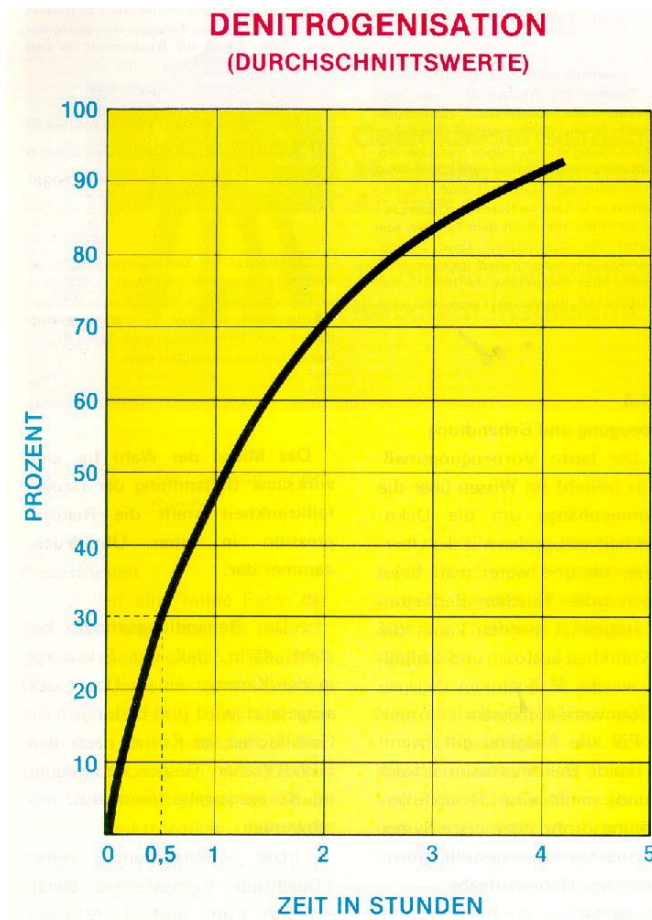


Abb. 5.11: Verlauf der Denitrogenisation

Das Abatmen von gelöstem Stickstoff durch Atmen von reinem Sauerstoff nennt man **Denitrogenisation**.

Der Verlauf der Denitrogenisation ist in *Abb. 5.11* dargestellt. Innerhalb von 30 min. sind bereits etwa 30 % des im Körper gelösten N₂ abgeatmet, wodurch die Gefahr des Auftretens von Symptomen einer Dekompressionskrankheit wesentlich vermindert wird.

Das Mittel der Wahl für eine wirksame Behandlung der Druckfallkrankheit stellt die Rekompensation in einer Überdruckkammer dar.

Das Behandlungsprinzip besteht darin, dass der Erkrankte in der Kammer einem Überdruck ausgesetzt wird und dadurch freie Gasbläschen im Körper nach dem HENRY'schen Gesetz sich wieder im Körpergewebe lösen, d.h. verschwinden.

Die Behandlung selbst (Tauchtiefe, Verweilzeiten, Wechsel von Luft- und O₂-Atmung) soll hier nicht im einzelnen beschrieben werden. Sie richtet sich nach der Schwere der Symptomatik und kennt keinen prinzipiellen Unterschied zwischen einer Dekompressions-Erkrankung im Flugzeug oder im Wasser, bei einem Piloten oder Taucher.

Wichtig für den Fliegerarzt ist zu wissen, wenn ein Pilot ihn mit der Anamnese einer rapiden Dekompression oder gar mit ersten Symptomen einer Druckfallerkrankung aufsucht:

- Die Ausbildung der Symptome kann schleichend ablaufen bis zum Spätschock noch nach 12 Stunden. Eine stationäre Beobachtung von einem Tag ist daher geboten. Nur leichte Symptome verschwinden rasch.
- Bei bestehender oder auftretender Symptomatik muss der Fliegerarzt die Rufnummer der nächstgelegenen stationären Überdruckkammer kennen und ggf. den Transport des Patienten dorthin veranlassen.
- Für den Transport selbst ist der Lufttransport nur dann angezeigt, wenn eine Druckkabine zur Verfügung steht, die in der Lage ist, eine Höhe zu halten kann, die nicht mehr als 3.000 ft über der Höhe des Startplatzes liegt.

5.3 Druckkammern mit gesicherter 24-Stunden-Bereitschaft nach GETÜM e.V. (Stand 09.07.2004)

1. Halle

Vorwarnzeit 30 Minuten
Druckkammer Universitätsklinik Halle
Anästhesiologie und operative Intensivmedizin
Dryanderstr. 4-7
D-06110 Halle
Notruf: +49 (0)345 5574350
Tel.: +49 (0)345 557 43 50
Fax: +49 (0)345 557 43 52
Email: hbo@medizin.uni-halle.de

2. Berlin

Vorwarnzeit 30 Minuten
Sektion für hyperbare Sauerstofftherapie und Tauchmedizin
im Klinikum Friedrichshain
Matthiasstrasse 7
D-10249 Berlin
Notruf: +49 (0)30 42211502
Tel.: +49 (0)30 421 08 750
Fax: +49 (0)30 421 08 760
Email: druckkammer@khf.de

3. Kronshagen/Kiel

Vorwarnzeit 30 Minuten
Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine
Druckkammeranlage Hydra 2000
Kopperpähler Allee 120
D-24119 Kronshagen (bei Kiel)
Notruf: +49 (0)431 540 90
Tel.: +49 (0)431 54 09 17 82
Fax: +49 (0)431 54 09 15 50

4. Bremen

Vorwarnzeit max. 30 Minuten
ZETÜM - Zentrum für Tauch- und Überdruckmedizin
Ermlandstr. 55
D-28777 Bremen
Notruf: +49 (0)171 782 25 97
Tel.: +49 (0)421 600 75 77
Fax: +49 (0)421 600 75 79
Email: hbobremen@aol.com
Web: <http://www.hbo-bremen.de/>

5. Hannover

Vorwarnzeit 45 Minuten
Druckkammerzentrum Hannover
Lister Krankenhaus
Lister Kirchweg 43
D-30163 Hannover
Notruf: +49 (0)511 19222 (Rettungsleitstelle)
Tel.: +49 (0)511 965 61 0
Fax: +49 (0)511 965 61 11
Email: info@druckkammer-zentrum.de

6. Minden

Vorwarnzeit 30 Minuten
Medicox Hyperbares Sauerstoff-Therapie-Zentrum
Gustav-Adolf-Str. 1a
D-32423 Minden
Notruf: +49 (0)171 450 84 03
Tel.: +49 (0)571 82 84 90
Fax: +49 (0)571 82 84 929
Email: medicox@t-online.de

7. Bielefeld

Vorwarnzeit 30 Minuten
Druckkammerzentrum Bielefeld
Heidsieker Heide 114
D-33739 Bielefeld
Notruf: +49 (0)5206 83 63
(automatische Rufumleitung)
Notruf: +49 (0)160 155 91 81 oder
+49 (0)177 258 20 91
Tel.: +49 (0)5206 83 63
Fax: +49 (0)5206 84 99
Email: hbo@hbo-bielefeld.de

8. Düsseldorf

Vorwarnzeit 60 Minuten
Sauerstoff-Therapiezentrum Düsseldorf
ORL-Vitamed GmbH & Co KG
Hansaallee 30
D-40547 Düsseldorf
Notruf: +49 (0)179 641 76 57
Tel.: +49 (0)211 570 583
Fax: +49 (0)211 570 584
Email: hbo@duesseldorf.de

9. Duisburg

Vorwarnzeit 20 Minuten
Katholisches Klinikum Duisburg
St. Joseph-Hospital Laar
Ahrstr. 100
D-47139 Duisburg
Notruf: +49 (0)203 800 10
Tel.: +49 (0)203 800 16 20
Fax: +49 (0)203 800 16 66
Email: hyperbare.med.du@cityweb.de

10. Münster

Praxis für Hyperbarmedizin
Warendorfer Str. 27
D-48145 Münster
Notruf: +49 (0)172 260 71 19
Tel.: +49 (0)251 13 29 30
Tel.: +49 (0)251 13 29 32
Email: dr.rossbach@hbo-muenster.de
Web: <http://www.hbo-muenster.de/>

11. Aachen

Vorwarnzeit 30 Minuten
HBO-Zentrum Euregio Aachen
(Nähe Universitätsklinik)
Kackertstr. 11
D-52072 Aachen

Notruf: +49 (0)180 523 42 34

Tel.: +49 (0)241 840 44

Tel.: +49 (0)241 879 34 94

Email: hbo-aachen@t-online.de

Web: <http://www.hbo-aachen.de/>

12. Mainz

Vorwarnzeit 60 Minuten
Universitätsklinik Mainz
Klinik für Anästhesiologie
Langenbeckstr. 1
D-55131 Mainz

Notruf: +49 (0)6131 170

Tel.: +49 (0)6131 17 73 66

Fax: +49 (0)6131 17 26 28

13. Frankfurt

Ohne Vorwarnzeit
Branddirektion Frankfurt
Mobile Behandlungsdruckkammer
Feuer- und Rettungswache 2
Franziusstr. 8
D-60314 Frankfurt/Main

Notruf: +49 (0)69 21 27 21 70

Tel.: +49 (0)69 21 27 22 70

Fax: +49 (0)69 21 27 23 98

Jürgen Prehl (Wasserrettungsdienst, Adresse
s.o., Tel. +49 (0)69 21 27 22 71

Email: juergen.prehl.amt37@stadt-frankfurt.de

14. Stuttgart

Vorwarnzeit 30 Minuten
HBO-Zentrum Stuttgart
König-Karl-Str. 66
D-70372 Stuttgart

Notruf: +49 (0)711 19222 (Rettungsleitstelle)

Tel.: +49 (0)711 509 44 53

Fax: +49 (0)711 95 46 17 10 (Praxis)

Email: cc.anaesth.fritz@t-online.de

15. Stuttgart

Vorwarnzeit 30 Minuten
DCS 1 Druckkammer-Centrum-Stuttgart
Heilbronner Str. 300
D-70469 Stuttgart

Notruf: +49 (0)711 19222 (Rettungsleitstelle)

Tel.: +49 (0)711 85 10 32

Fax: +49 (0)711 85 10 37

Email: info@dcs1-stuttgart.de

Web: <http://www.dcs1-stuttgart.de/>

16. Freiburg

Vorwarnzeit 60 Minuten
Druckkammerzentrum Freiburg GmbH
am St. Josefkrankenhaus
Habsburger Str. 116
D-79104 Freiburg

Notruf: +49 (0)170 202 61 11

Tel.: +49 (0)761 38 20 18

Fax: +49 (0)761 38 20 19

Email: info@hbo-freiburg.de

Web: <http://www.hbo-freiburg.de/>

17. München

Vorwarnzeit 30 Minuten
Hyperbares Sauerstoff-Zentrum GmbH
Karlst. 42
D-80333 München

Notruf: +49 (0)171 355 65 87

Tel.: +49 (0)89 54 82 31 22

Fax: +49 (0)89 54 82 31 50

Email: hbozentrum@aol.com

Web: <http://www.hbozentrum.de/>

18. München

Vorwarnzeit 20 Minuten
Druckkammer Feuerwache 5
Branddirektion München
Anzinger Str. 41
D-81671 München

**Notruf: +49 (0)89 40 66 55 (Rettungsleitstelle
Feuerwache)**

Tel.: +49 (0)89 40 66 55 (Rettungsleitstelle Feu-
erwache)

Tel.: +49 (0)89 23 53 005 (Druckkammer - nicht
immer besetzt, daher Feuerwache)

Fax: +49 (0)89 23 53 35 98 (Druckkammer)

19. Murnau

Vorwarnzeit 20 Minuten
Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Murnau
Prof.-Küntscher-Str. 8
D-82418 Murnau

Notruf: +49 (0)8841 48 26 86

Tel.: +49 (0)8841 48 29 02

Tel.: +49 (0)8841 48 22 30

Fax: +49 (0)8841 48 22 66

Email: kemmer@bgu-murnau.de

20. Ulm

HBO-Zentrum Ulm GmbH
Tagesklinik Söflingen
Magirusstr. 35/4
D-89077 Ulm

Notruf: +49 (0)731 932 9320

Tel.: +49 (0)731 932 9320

Fax: +49 (0)731 932 9321

Email: tagesklinik-soeflingen@t-online.de

21. Ulm

Bundeswehrkrankenhaus Ulm
Abt. X - Anästhesiologie und Intensivmedizin
Oberer Eselsberg 40
D-89081 Ulm

Notruf: +49 (0)731 17 10 20 55

Tel.: +49 (0)731 17 10 20 54

Tel.: +49 (0)731 17 10 0

22. Traunstein

Vorwarnzeit 20 Minuten

Druckkammerzentrum Traunstein

Cuno-Niggel-Str. 3
D-83278 Traunstein

Notruf: +49 (0)861 192 22 (Rettungsleitstelle)

Tel.: +49 (0)861 159 67

Tel.: +49 (0)861 70 50

Fax: +49 (0)861 158 89

Email: hbo-traunstein@t-online.de

Web: <http://www.druckkammerzentrum-traunstein.de/>

5.4 Verwendete und weiterführende Literatur

Besondere Anweisung des Generalarztes der Luftwaffe für den fliegerischen Dienst in der Bundeswehr 707/5096, BesAnGenArztLw 707/5096. Köln, 1997

Bühlmann, A. A. Tauchmedizin. 4. Aufl. Springer, Berlin, 1995

Frey, G. et al. Hyperbare Oxygenation. *Anästhesist* 47 (4), 269-289, 1998

Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin e.V. Homepage www.getuem.org, Druckkammerverzeichnis

Heimbach, R. D., Sheffield, P. J. Decompression sickness and pulmonary overpressure accidents. In: DeHart, R. L. (ed). *Fundamentals of aerospace medicine, Sect 2: physiology in the flight environment*, Chapter 7, 2. ed., Williams and Wilkins, Baltimore, 1996

Lippmann J., Brugg S. *Handbuch Tauchunfälle*. dt. Bearbeitung Brelowski, D., Hahn, M., 2. Ausgabe, Delius Klasing, 1995

Macmillan, A. J. F. The effects of pressure change on body cavities containing gas. In: Ernsting, J., Nicholson, A. N., Rainford, D. J. (eds). *Aviation medicine, part 1: aviation physiology and aircrew systems*, Chapter 2, 3. ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000

Matthys, H., *Medizinische Tauchfibel*, Springer-Verlag, Berlin, 1983

Oriani, G., Marroni, A., Wattel, F. (eds) *Handbook on hyperbaric medicine*. Springer, Berlin, 1996

Padi Open Water Diver Manual. Hsg. Richardson, D., Intern. Padi, Inc., 1990

Plafki, C., Peters, P., Almeling, M., Welslau, W., Busch, R. Complications and side effects of hyperbaric oxygen therapy. *Aviat Space Environ Med* 71 (2), 119-124, 2000

Stibbe, A., *Sporttauchen*. 7. Auflage, Nagelschmid Verlag, Stuttgart, 1994

Wendling, J., Ehm, O., Ehram, R., Knessl, P., Nussberger, P., *Tauchtauglichkeit Manual*. 2. Auflage, Druckerei Schüler, Biel, 2001

6 Beschleunigungen und ihre Wirkungen

Die Leistungsfähigkeit moderner Kampfflugzeuge hat mittlerweile ein Ausmaß erreicht, das bis an die Grenzen der psychophysischen Belastbarkeit des Menschen geht, sie sogar unter Umständen überschreitet. Neuartige Werkstoffe, Herstellungstechniken und erhöhte Triebwerksleistungen machen heute Flugzeuge möglich, deren Beschleunigungsauswirkungen die Leistungsfähigkeit der fliegenden Besatzungen nachhaltig beeinträchtigen können. Deshalb ist ein gründliches Verständnis der Auswirkung dieser Beschleunigungen sowohl für Flugzeugbesatzungen (dieser „high performance aircraft“) als auch für flugmedizinisch tätige Ärzte/Personal heute wichtiger denn je. In diesem Zusammenhang ist zunächst die Erläuterung einiger physikalischer Gesetzmäßigkeiten erforderlich.

6.1 Definition der Beschleunigung

Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, wenn die Summe der auf ihn einwirkenden Kräfte gleich Null ist. Solche gleichförmigen Bewegungen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie mit gleichbleibender Geschwindigkeit und ohne Richtungsänderung ablaufen. Der Mensch kann sie, sofern er durch eine äußere Hülle (Kapsel, Kabine etc.) gegenüber Umgebungsbedingungen geschützt ist, ohne schädigende Folgen für seinen Organismus tolerieren, wenn sie auch noch so hoch sind. Sie werden sogar häufig nicht einmal wahrgenommen: Man denke z.B. nur daran, dass sich der Mensch ständig mit einer konstanten Geschwindigkeit von 30 km/s auf der Erdumlaufbahn um die Sonne bewegt. Beschleunigungen oder Verzögerungen (Entschleunigungen) liegen dann vor, wenn Änderungen der Geschwindigkeit eines bewegten Körpers, Änderungen der Bewegungsrichtung oder beides gleichzeitig auftreten. Diese Änderungen werden vom menschlichen Körper registriert und haben Auswirkungen auf den lebendigen Organismus.

Die Geschwindigkeit selbst ist ein **Vektor**, also eine Größe, die durch Betrag und Richtung gekennzeichnet ist. Sie errechnet sich aus dem Quotienten von zurückgelegtem Weg (s) pro Zeit (t); es gilt:

$$v = \frac{s}{t}$$

Die Dimension ist (m/s).

Die Beschleunigung ist die Änderung des Geschwindigkeitsvektors (v) pro Zeiteinheit (t) und damit ebenfalls ein Vektor, der sich aus der Formel

$$a = \frac{v}{t}$$

herleitet.

Ihre Dimension ist demnach (m/s²).

Die Kraft (F), mit der ein Körper beschleunigt wird, ist das Produkt der Masse des Körpers (m) multipliziert mit der Beschleunigung (a). Es gilt also:

$$F = m \cdot a$$

Die Dimension der beschleunigenden Kraft ist kg · m / sec² und wird in Newton (N) angegeben.

In der Fliegerei hat es sich eingebürgert, die Beschleunigungskraft (genauer gesagt: die ihr entgegenwirkende Trägheitskraft) nicht als F in Newton anzugeben, sondern in einem Vielfachen der Erdbeschleunigung, die auf der Erdoberfläche (genau: in Meereshöhe) identisch ist

mit der Gewichtskraft G (= dem Gewicht) eines Körpers, das ihn zum Erdmittelpunkt hin mit der Erdbeschleunigung (g) = $9,81 \text{ m/s}^2$ anzieht. Es gilt die Formel:

$$G = m \cdot g$$

Die Dimension ist dieselbe, wie bei jeder mit der Beschleunigung a wirksamen Kraft. Sie ist das Produkt aus der Masse eines Körpers und der auf ihn einwirkenden Beschleunigung.

Bei konstanter Masse eines Körpers wird demnach die auf ihn einwirkende Beschleunigung zum Maßstab seines Gewichtes: Dieses ändert sich dann proportional zur Größe der Beschleunigung. Deshalb wird die Masse eines beispielsweise 80 kg schweren Menschen bei der Einwirkung einer beschleunigenden Kraft vom 3-fachen der Erdbeschleunigung (also $3g$) - analog der Formel Gewichtskraft = Masse mal Beschleunigung - auf das dreifache Gewicht, also auf 2400 N , bei $5g$ auf 4000 N , erhöht. Derselbe Mensch würde auf dem Mond, dessen Massenbeschleunigung nur etwa $1/6$ der Erdbeschleunigung beträgt, nur noch 133 N wiegen.

Beachte: Newton (N) ist die korrekte Dimension des Gewichtes, das jedoch heute fälschlicherweise noch häufig in kg angegeben wird; dabei ist $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$. Die unterschiedliche Beschleunigung, die ein Körper auf der Erde oder auf dem Mond im freien Fall erfährt, resultiert aus der unterschiedlichen Masse von Erde und Mond, denn die Anziehungskraft, die auf einen Körper anderer Masse ausgeübt wird, ist direkt proportional zum Produkt beider Massen und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes der Massenmittelpunkte zueinander (Massenwirkungsgesetz).

Jeder Körper (Masse) setzt einer Bewegungsänderung durch eine beschleunigende Kraft einen Widerstand entgegen, die Trägheitskraft oder Massenträgheit, die nach dem Gesetz von „actio = reactio“ mit demselben Betrag genau in die entgegengesetzte Richtung der Beschleunigungskraft wirkt und demnach auch ein Vektor ist. Sie wird in der Fliegerei mit „G“ bezeichnet. Diese Trägheitskraft wird im Falle einer kreisförmigen Bewegung (der bewegte Körper wird zum Kreismittelpunkt mit der Zentripetalkraft hin beschleunigt) als Zentrifugalkraft oder Fliehkraft bezeichnet. Leider wird sie häufig in der Umgangssprache mit dem Begriff „Beschleunigung“ belegt (wenngleich sie dieser entgegenwirkt), was zu Verwirrungen führen kann. Die (patho-)physiologischen Wirkungen jeder Beschleunigung erfolgen nicht in Richtung der beschleunigten Kraft, sondern aufgrund der Massenträgheit genau in der entgegengesetzten Richtung.

Zusammenfassung:

Beschleunigungen kommen zustande, wenn

- eine bestehende Geschwindigkeit oder ein Ruhezustand verändert wird;
- eine Änderung der Bewegungsrichtung bei gleichbleibender Geschwindigkeit erfolgt;
- oder sich beide Faktoren gleichzeitig ändern.

6.2 Arten der Beschleunigung

Aus den dargestellten Geschwindigkeits- und/oder Richtungsänderungen bei Bewegungsabläufen (bewegter Körper) sind 3 bzw. 4 Arten von Beschleunigungen möglich:

6.2.1 Die lineare (geradlinige) Beschleunigung

d.h. die Änderung der Geschwindigkeit (v) eines Körpers pro Zeiteinheit (t) bei gleichbleibender Bewegungsrichtung:

$$a = \frac{v}{t}$$

bzw.

$$a = \frac{v_1 - v_2}{t}$$

ausgedrückt in m/s^2 .

Beispiel:

Geschwindigkeitszunahme eines Flugzeuges durch Beschleunigung bei Erhöhung der Schubkraft (besonders bei der Benutzung des Nachbrenners).

6.2.2 Die radiale Beschleunigung

die auch als Zentripetal-Beschleunigung bezeichnet wird. Hier erfolgt allein eine Änderung der Bewegungsrichtung bei gleichbleibender Geschwindigkeit, wenn die Drehachse weit außerhalb des Körpers liegt. Der bewegte Körper beschreibt eine Kreisbahn und wird einer Beschleunigung unterworfen, die zum Drehmittelpunkt hin gerichtet ist. Die Trägheit des bewegten Körpers, die der Zentripetal-Beschleunigung entgegenwirkt (actio = reactio) und die der physiologischen Wirkung entspricht, ist die Fliehkraft (Zentrifugalkraft).

Solche Kreisbahnen können in jeder beliebigen Ebene des Raumes liegen. Der Wert der radialen Beschleunigung wird berechnet nach der Formel:

$$a_{\text{rad}} = \frac{v^2}{r} \text{ bzw. } a_{\text{rad}} = \omega^2 \cdot r$$

da $v = \omega \cdot r$

(v = lineare Geschwindigkeit des Körpers auf der Kreisbahn, ω = Winkelgeschwindigkeit des Körpers auf der Kreisbahn, r = Radius der Kreisbahn oder Kurve); wobei

$$\omega = \frac{v}{r}$$

Die entsprechende beschleunigende Kraft (Zentripetal- bzw. Zentrifugal-Kraft) errechnet sich dann als Produkt aus der Masse des bewegten Körpers (m) multipliziert mit seiner radialen Beschleunigung (a_{rad}).

$$F_z = \frac{m \cdot v^2}{r} = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

Beispiele:

Kurvenflug (Horizontalebene), Looping (Vertikalebene) oder auch gezogene Steilkurven (schräge Ebene).

6.2.3 Die rotatorische Beschleunigung

d.h. eine Änderung der Drehgeschwindigkeit (ω) eines Körpers pro Zeiteinheit (t), wenn die Drehachse im Körper oder in dessen unmittelbarer Nähe liegt.

Ihre physiologische Wirkung auf den menschlichen Organismus liegt weniger in der Fliehkraft, die dabei entsteht, sondern in der Erregung der Bogengänge des Innenohres mit den daraus resultierenden Bewegungseindrücken oder -illusionen, die im Kapitel 9 behandelt werden.

Der Wert der rotatorischen Beschleunigung wird berechnet nach der Formel:

$$a_{\text{rot}} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{t}$$

6.2.4 Die anguläre Beschleunigung

ist eine Sonderform der rotatorischen Beschleunigung, wobei die Drehachse weit außerhalb des Körpers liegt. Sie tritt auf bei einer Änderung der Winkelgeschwindigkeit mit der Zeit. Dies ist der Fall bei einer gleichzeitigen Änderung sowohl der Bewegungsrichtung, der Geschwindigkeit als auch der Winkelgeschwindigkeit. Die Winkelgeschwindigkeit (ω) eines bewegten Körpers auf einer Kurven- oder Kreisbahn errechnet sich bei gegebenem Radius aus dem Winkel (α), den er pro Zeiteinheit (t) überstreicht:

$$\omega = \frac{\alpha}{t}$$

wobei die Dimension nicht in m/s, sondern in rad/s angegeben wird. Die anguläre oder Winkelbeschleunigung (ϵ) errechnet sich aus der Winkelgeschwindigkeit pro Zeit und ist

$$\epsilon = \frac{\alpha}{t^2}$$

Beispiele:

Einleiten eines Kurvenfluges, beim Trudeln und bei Spiralfugmanövern (Schiebekurven).

6.3 Wirkrichtungen und Wirkachsen

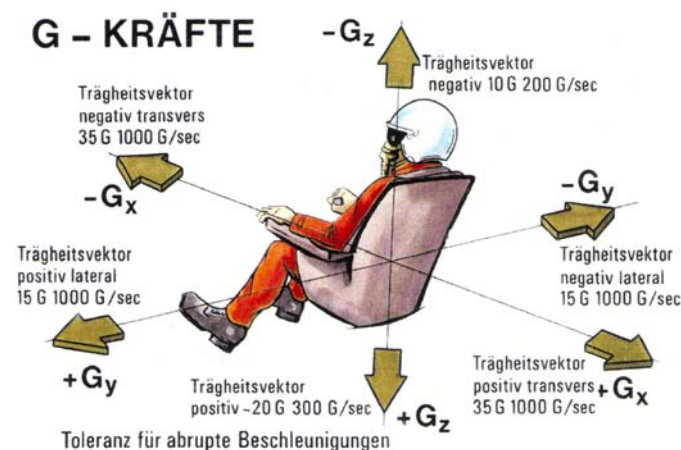


Abb. 6.1: Achsen der Fliehkraft im Menschen

Die Beschleunigung wird durch ihre Größe (Betrag) und ihre Richtung definiert: sie ist ein Vektor. Die verwendete beschreibende Nomenklatur zur Charakterisierung einer Beschleunigung beruht auf dem 1961 eingeführten Drei-Achsen-System (Abb. 6.1). Die physiologische bzw. pathophysiologische Wirkung der Beschleunigung lässt sich auf die trägheitsbedingte Verlagerung von Organen und Körperflüssigkeiten entgegen der einwirkenden Beschleunigungsrichtung zurückführen.

Als Bezugssystem kann deshalb das (unter der Einwirkung üblicher Fliehkkräfte im Flugdienst sich in seiner Lage nicht verändernde) Skelettsystem herangezogen werden:

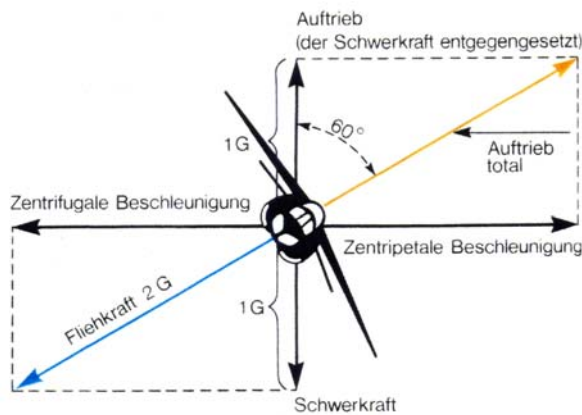
- Die **x-Achse** steht senkrecht auf der Wirbelsäule in sagittaler (vorwärts-rückwärts) Richtung.
- Die **y-Achse** steht ebenfalls senkrecht auf der Wirbelsäule in seitlicher Richtung (durch die Schultern von rechts nach links gehend).
- Die **z-Achse** verläuft parallel zur Wirbelsäule (Richtung Kopf-Fuß).

Es wird, wie bereits erwähnt, der Ausdruck „G“ benutzt, um die Trägheitswirkung in dem beschleunigten Körper zu beschreiben (die der eigentlichen Beschleunigung entgegenwirkt), es werden positive und negative Vorzeichen benutzt, um die Richtung des Trägheitsvektors zu beschreiben. Die Achsenbezeichnungen werden als Indizes angegeben.

6.3.1 Senkrechte Beschleunigungen

Positive G (+ G_z):

Positive Beschleunigungen entstehen, wenn der Körper kopfwärts entlang der Körperlängsachse (z-Achse) beschleunigt wird. Da die hierbei auftretende Fliehkraft (= Trägheit) entgegengesetzt, also in Fußrichtung wirkt, wird der Körper in den Sitz gedrückt und das Herz nach unten zum Zwerchfell hin verlagert.



Beispiele hierfür finden wir beim Abfangen aus dem Sturzflug und im engen Kurvenflug.

Abb. 6.2 zeigt die beim Kurvenflug auftretenden Vektoren, deren Addition die Resultierende ergibt. Im Bild ist ein Vektordiagramm dargestellt, deren Komponenten sich ergeben aus:

- der Schwerkraft,
- der entgegengesetzt wirkenden Auftriebskraft,
- dem zentripetalen Beschleunigungsvektor und
- dem ihm entgegengesetzt wirkenden zentrifugalen Vektor.

Abb. 6.2: Vektoraddition beim Kurvenflug

Negative G (- G_z):

Negative G_z entstehen, wenn der Körper entlang der z-Achse fußwärts beschleunigt wird. Die entgegengesetzt wirkende Trägheit hebt den Körper aus dem Sitz bzw. verlagert das Herz nach kopfwärts.

6.3.2 Sagittale oder Transverse Beschleunigungen

Solche Beschleunigungen bzw. die entgegengesetzt wirksame Trägheit wirken im rechten Winkel zur z-Achse entlang der x-Achse.

Vorwärtsbeschleunigung (+ G_x)

Sie wirkt von Rücken- in Brustrichtung. Die entsprechende Trägheit wirkt von Brust- in Rückenrichtung und bewirkt eine Verschiebung des Herzens nach hinten zur Wirbelsäule.

Beispiele:

Start eines Flugzeuges oder Katapultstart eines Flugzeuges vom Flugzeugträger.

Rückwärtsbeschleunigung (- G_x):

Sie wirkt entgegengesetzt zur Vorwärtsbeschleunigung, also in Brust-Rückenrichtung. Ihre physiologische Wirkung (Trägheit) zielt in die Gegenrichtung und bewirkt eine Verschiebung des Herzens nach vorne auf das Brustbein zu.

Beispiele:

Ausfahren der Sturzflugbremsen am Flugzeug oder Landung eines Flugzeuges mit Hakenfang (z.B. auf dem Flugzeugträger)

6.3.3 Laterale Beschleunigungen

Sie wirken auch im rechten Winkel zur Körperlängsachse (z-Achse), jedoch jeweils von Seite-zu-Seite (von Schulter-zu-Schulter) entlang der y-Achse.

Rechtilaterale Beschleunigungen (+ G_y):

Die Beschleunigung wirkt nach rechts seitlich entlang der durch die Schultern gehenden Nickachse. Die Trägheit wirkt entlang derselben Achse (y-Achse) nach links seitlich und bewirkt eine Verlagerung des Herzens nach links.

Linkslaterale Beschleunigungen (- G_y) :

Sie wirken nach links seitlich entlang der Nickachse (y-Achse) und die Trägheit entlang derselben Achse nach rechts seitlich und bewirkt eine Verlagerung des Herzens nach rechts.

Beispiele:

Derartige Beschleunigungen (Rechts- und/oder Links-Laterale) treten auf bei extremen Turbulenzen oder beim Trudeln oder bei geschobenen Rollen des Flugzeuges.

6.4 Weitere Wirkfaktoren

Neben Betrag und Richtung der Beschleunigung und ihrer physiologischen oder pathophysiologischen Wirkungen auf den Körper (aufgrund der Trägheit) sind weitere Wirkfaktoren von Bedeutung:

6.4.1 Die Dauer der Einwirkung (Wirkzeit)

Dementsprechend erfolgt eine Einteilung der Beschleunigung nach *Abb. 6.3*.

Beschleunigung	Dauer	Beispiel
abrupt [*]	0 - 2 s	Vibration, Stoß, Schleudersitzausschuss
kurz [*]	2-15 s	Flugmanöver, Karussell, Zentrifuge
lang	15-60 s	Start zum Weltraumflug
anhaltend	> 60 s	Erdanziehungskraft, Schwerelosigkeit beim Raumflug

^{*} In der Literatur wird von einigen Autoren die Grenze zwischen abrupter und kurzanhaltender Beschleunigung bei 0,2 s angegeben.

Abb. 6.3: Wirkzeiten der Beschleunigung

6.4.2 Die Geschwindigkeit, mit der die Beschleunigung zunimmt (Beschleunigungszuwachsrate)

Unter der Einwirkung von G_z kommt es zu einer Blutvolumenverschiebung von den oberen zu den unteren Körperpartien in Abhängigkeit vom Betrag der G_z-Kräfte, ihrer Einwirkzeit und der Beschleunigungszuwachsrate sowie der Effizienz der durchgeführten Anti-G-Manöver (dazu später noch Genaueres). Die Beschleunigungszuwachsrate (G-rate of onset, Dimension: G/s) spielt bei dieser Blutverschiebung, ihrem Ausmaß und der Schnelligkeit, mit der dieser Vorgang erfolgt, eine große Rolle. Insbesondere wird dadurch die absolute G-Toleranz eines Menschen in dem Sinne beeinflusst, dass diese bei einer hohen G-rate of onset geringer wird, als sie sonst bei diesem Individuum normalerweise ist.

Dies liegt daran, dass es aufgrund der fliehkraftbedingten Blutverschiebung entlang der Körperlängsachse von kopf- nach fußwärts (G_z) zunächst einmal zu einem Blutdruckabfall mit kompensatorischer Pulsfrequenzverschiebung kommt. Nach einer kurzen Zeitspanne von etwa 10 bis 15 s jedoch kommt es trotz gleichbleibender Einwirkung von G_z wieder zu einem Anstieg des Blutdruckes bei dem Individuum aufgrund der jetzt einsetzenden kardiovaskulären Reflexe, wie es in *Abb. 6.4* dargestellt ist.

Dadurch erhöht sich dann die G-Toleranz des Individuums wieder und die Wahrscheinlichkeit, in eine fliehkraftinduzierte Bewusstlosigkeit (Loss of Consciousness, LOC) hineinzurutschen, wird wieder geringer.

Bei hohen G-rates of onset ist deshalb aufgrund dieses Phänomens (niedrigere G-Toleranz während der ersten 10 bis 15 s vor dem Wirksamwerden des kardiovaskulären Reflexes) die Wahrscheinlichkeit für den Piloten, in eine LOC hineinzugeraten, besonders groß.

Die Abb. 6.5 zeigt, dass die höchsten G-Toleranz-Werte nur dann erreicht werden, wenn die Fliehkraft schnell entsteht, also eine hohe G-rate of onset vorliegt. Allerdings muss dann die Zeit dieser hohen +G_z-Belastung relativ kurz sein, damit nicht die Ischämiezeit (Zeit der Minderdurchblutung) des Gehirns (durch G-induzierte Blutvolumenverschiebung in Richtung der Füße) überschritten wird, da es sonst zur Bewusstlosigkeit (Loss of Consciousness) kommt.

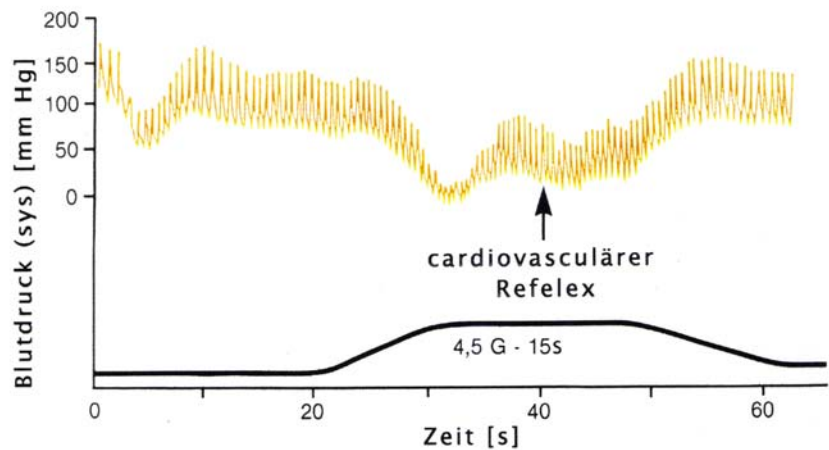


Abb. 6.4: Wirksamwerden der kardiovaskulären Reflexe 10 bis 15 Sekunden nach +G_z-Exposition

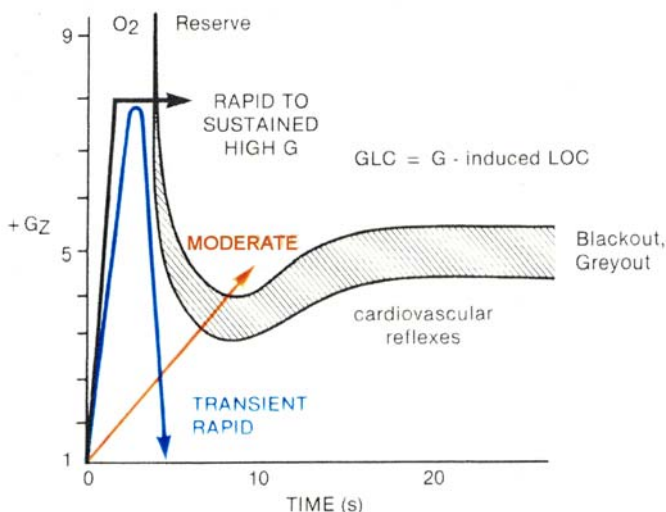


Abb. 6.5: Der Effekt der G-rate of onset auf die G-Toleranz des Menschen

erreicht werden, dass hier die kardiovaskulären Reflexe bereits wirksam werden und zu einer Erhöhung der G-Toleranz des Individuums beitragen können, so dass der Eintritt der Loss of Consciousness hier später (bzw. erst bei höheren Absolutwerten für +G_z) ausgelöst wird.

6.4.3 Die Dauer des Maximums oder der Maxima der Fliehkraft-Einwirkung

ist von großer Bedeutung, was die physiologische Wirkung auf den Menschen und dessen Toleranz gegenüber diesen G-Kräften anbelangt: Sehr kurzdauernde +G_z-Spitzenwerte werden leichter vertragen und auch bei gehäuftem Auftreten leichter toleriert als längerdauernde +G_z-Spitzenwerte.

Bei langsamer G-rate of onset von beispielsweise 0,5 G/s liegt die absolute G-Toleranz-Grenze wesentlich niedriger und wird später (nach längerer Einwirkzeit der G-Kräfte) erreicht, jedoch noch vor dem Wirksamwerden der kardiovaskulären Reflexe, so dass diese nicht mehr zu einer Erhöhung der G-Toleranz beitragen können und deshalb hier bei mäßig hohen +G_z-Werten ein Loss of Consciousness bei den Probanden ausgelöst wird. Ist die G-rate of onset gering, beispielsweise 0,2 G/s, wird die absolute Toleranzgrenze gegenüber +G_z-Belastungen wieder höher, da diese so spät erreicht werden, dass hier die kardiovaskulären Reflexe bereits wirksam werden und zu einer Erhöhung der G-Toleranz beitragen können, so dass der Eintritt der Loss of Consciousness hier später (bzw. erst bei höheren Absolutwerten für +G_z) ausgelöst wird.

6.4.4 Die exponierte Fläche des beschleunigten Körpers

ist ebenfalls von Bedeutung im Hinblick auf den absoluten G_z -Toleranz-Wert: Je kleiner die Einwirkfläche für G-Kräfte auf einen bewegten Körper ist, desto größer ist ihre Wirkung auf diesen Körper.

Diese Wirkfaktoren beeinflussen in unterschiedlich starkem Maße die positive G_z -Toleranz des Menschen. Somit ist die persönliche G-Toleranz kein festliegender Wert, sondern ergibt sich aus der Berücksichtigung aller zuvor genannten Faktoren

Hinzu kommen noch Faktoren, die nicht direkt von den einwirkenden Beschleunigungskräften abhängen. Es sind dies die unterschiedlichen

- Umgebungsbedingungen (Luftdruck, O_2 -Druck, Temperatur etc.),
- Tageszeiten und/oder Tagesformen (Biorhythmus, Adaptation etc.),
- Erfahrungen mit G-Kräften (Erste oder wiederholte Exposition),
- persönlichen Motivationen (Absichten, Ziele, Zwänge etc.),
- emotionalen Faktoren (Angst, Vertrauen, Erwartung, Bereitschaft),
- Körperlagen (Neigungswinkel der Rückenlehne des Sitzes),
- Konstitutionsfaktoren (Alter, Größe, Gewicht, Trainingszustand)

6.5 Wirkungen von Beschleunigungen auf den menschlichen Organismus

Vorbemerkung:

In diesem Kapitel werden die nur sehr kurzzeitig (für Sekundenbruchteile) wirksamen, aber teilweise sehr hohen Beschleunigungen, die sogen. „stoßartigen G" nicht behandelt (siehe dazu 6.4). Sie treten abrupt auf und verschwinden sofort wieder (wie bei Vibrationen, Stoßeinwirkungen, Schleudersitzausschüssen etc.), wobei Frakturen an Wirbelkörpern oder Einrisse/Abrisse an Wirbelkörperkanten entstehen können. Sie stellen also eher ein mechanisches und weniger ein physiologisches Problem dar, da hierbei die Reißfestigkeit der verschiedenen Körperorgangewebe oder die Sollbruchgrenze der Knochen überschritten werden kann. Es werden hier vielmehr physiologische Veränderungen aufgrund der Beschleunigungswirkung auf den Menschen beschrieben, die bei längerer Einwirkzeit höherer G-Kräfte zu funktionellen und/oder organischen Veränderungen im menschlichen Organismus führen können.

6.5.1 Wirkungen positiver Beschleunigungen (+ G_z)

Längerdauernde, entlang der Körperlängsachse von kopf- nach fußwärts gerichtete Beschleunigungskräfte (+ G_z genauer: Trägheitskräfte) haben je nach Stärke unterschiedliche Auswirkungen auf verschiedene Körperfunktionen (Abb. 6.6).

Allgemeine Symptome

Ab + 3 G_z kommt es zu einer Einschränkung der Beweglichkeit der Arme und Beine, es besteht das Gefühl, die Wangen würden nach unten gezogen.

Ab + 5 G_z oder mehr treten Probleme mit dem Offenhalten der Augen auf, da der Lidhebermuskel die hierfür nötige Kraft nicht mehr ganz aufbringt.

Bei noch höheren + G_z Belastungen kann es auch zu einer Beeinträchtigung der Atembewegung kommen, da die Rippen- und Zwerchfellatmung durch die fliehkraftbedingte Verschiebung von Lungenabschnitten eingeschränkt wird. Es kommt zu einem Zwerchfelltiefstand mit Verschiebung der Atemruhelage und Abnahme der Lungen-Compliance. Außerdem vermag die Intercostalmuskulatur den „schwerer" gewordenen Thorax nicht mehr zu heben.

Schlecht angepasste oder ungenügend befestigte Atemmasken, Brillen oder Kontaktlinsen können nach unten rutschen.

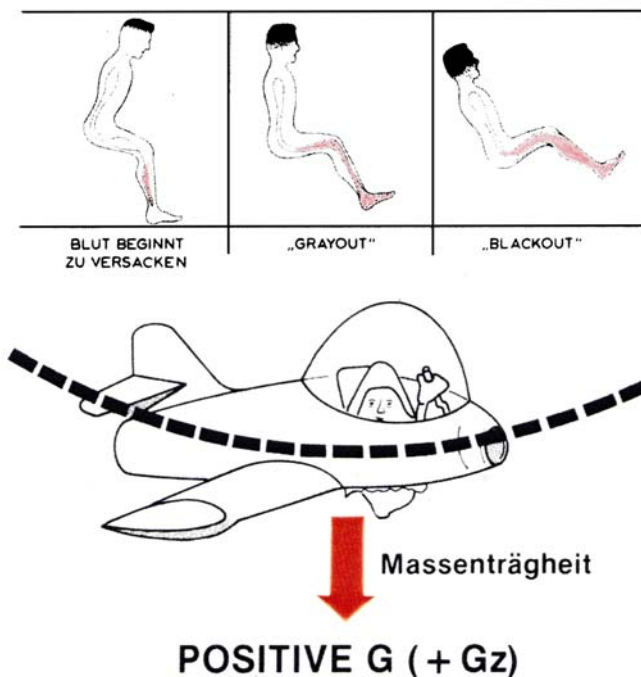


Abb. 6.6: Die Wirkungen positiver Beschleunigung in der Körperlängsachse (+ G_z)

entgegenbringen. Es wird in Abhängigkeit von Betrag, Einwirkzeit und Zuwachsrates der + G_z -Kräfte mehr oder minder rasch in die unteren Körperpartien verschoben, es „versackt“. Der im Gefäßsystem herrschende hydrostatische Blutdruck wird dadurch im Kopfbereich vermindert und im Fußbereich vermehrt. Die unter + G_z -Einwirkung geänderten hydrostatischen Druckverhältnisse verursachen Symptome, die aus der fliehkraftbedingten Zunahme der Hubhöhe für das Herz zum Gehirn resultiert, mit der Folge einer entsprechenden Minderdurchblutung des Gehirns und der Netzhaut des Auges, was sich in unterschiedlichen Sehstörungen manifestiert (s.u.). Bei Normalbedingungen (1 G) und einem normalen Herz-Augen-Abstand beträgt die Hubhöhe für das Herz 30 cm. Wirken jedoch beispielsweise +6 G_z auf den Menschen ein, so wird die Hubhöhe für das Herz auf 180 cm erhöht, wie in Abb. 6.7 zu sehen ist. Dagegen erhöht sich durch entsprechende Zunahme des hydrostatischen Druckes unter + G_z -Einwirkung unterhalb der Herzebene das Blutvolumen der unteren Körperpartien. Beim aufrecht stehenden Menschen mit einem arteriellen Mitteldruck von etwa 100 mmHg ergibt sich ein in Kopfhöhe herrschender arterieller Blutdruck von 75 bis 80 mmHg (bei +1 G_z an der Erdoberfläche). Beim liegenden Menschen dagegen ist der mittlere arterielle Blutdruck in allen Körperabschnitten gleich groß (vgl. Abb. 6.8).

Unter der Einwirkung von Fliehkräften entlang der Körperlängsachse (in craniocaudaler Richtung) nimmt der Blutdruck in Kopfhöhe je nach + G_z -Betrag mehr oder weniger ab und in der Fußregion entsprechend zu: Bei Einwirkung von +5 G_z bedeutet dies bei einem normalen arteriellen Blutdruck in Kopfhöhe von 80 mmHg (bei +1 G_z), dass dieser nun dort auf 0 mmHg abgenommen, während die Fußregion eine Blutdruckzunahme auf 370 mmHg erfahren hat. Bei einem praktisch fehlenden arteriellen Blutdruck in der Kopf-Hirn-Region kommt der Perfusionsdruck dort zum Erliegen. Es tritt eine anämische Hypoxie im Gehirn auf, (Bewusstlosigkeit (LOC)).

Der Mensch wird je nach Stärke der + G_z -Kräfte mehr oder weniger eine Zunahme seines Körpergewichtes (um ein Vielfaches) erleben und entsprechend stark in den Sitz gedrückt.

Veränderungen am Knochensystem treten jedoch bei den im normalen Flugbetrieb vorkommenden + G_z -Belastungen oder solchen, die bei üblichem Betrieb von Human-Zentrifugen erzeugt werden, beim gesunden Menschen nicht auf.

Veränderungen am Kreislaufsystem

Während der Bewegungs- und Stützapparat des Körpers unter dem Einfluss der + G_z -Belastung schwerer (bzw. in den Sitz) gedrückt wird, kann das Blut als flüssiges Organ keinen Widerstand

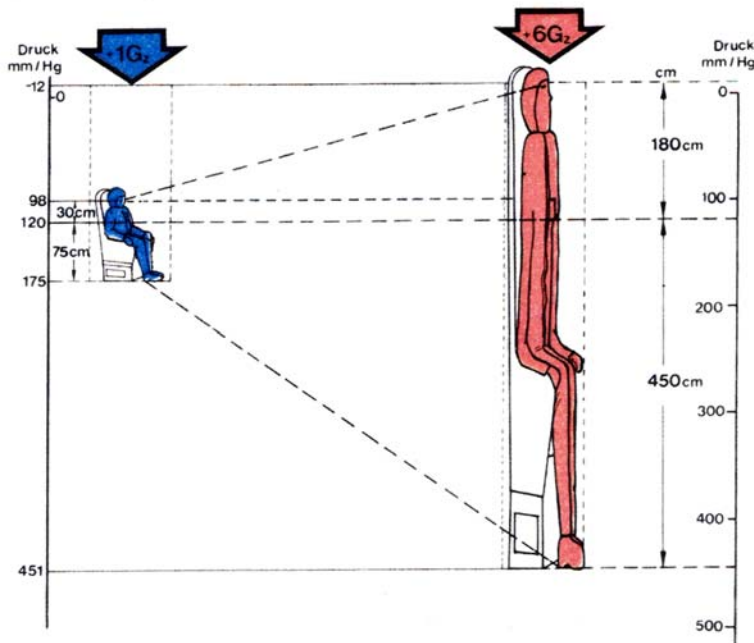


Abb. 6.7: Änderung des hydrostatischen Drucks

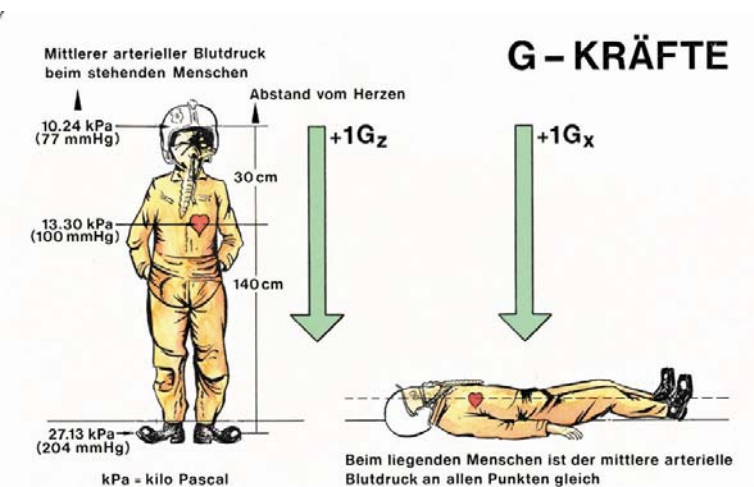


Abb. 6.8: Blutdruck bei Erdbeschleunigung (+ 1 G_z) im Stehen und Liegen

Während des Fluges muss dieser Zustand möglichst vermieden werden. Vor Eintritt der Bewusstlosigkeit wird der Pilot jedoch durch typische Sehstörungen gewarnt: Zunächst kommt es zum „Tunnel-Sehen“, zum „Greyout“, dann zum „Blackout“, d.h. zum völligen Verlust des Sehvermögens (s.u.). Die Verlagerung des Blutes in die unteren Körperpartien unter + G_z-Einwirkung ist begleitet von einem verminderten venösen Rückstrom zum Herzen. Dies bewirkt einen Abfall des Herzschlag-Volumens und damit des arteriellen Blutdruckes, was reflektorisch zu einer Erhöhung der Herzfrequenz führt (Abb. 6.9). Dieser „schockartige“ Zustand des Herz-Kreislauf-Systems erklärt die kreislaufbedingten Symptome, die unter + G_z-Belastungen auftreten.

Veränderungen am Herzen

In Abhängigkeit von Stärke und Einwirkzeit der Fliehkräfte (+ G_z) kommt es zu einem Zwerchfelltieftstand mit Aufrichten der Herzachse und Ausziehung des Herzens nach unten (Längsdeformierung des Herzmuskels). Dies führt zu EKG-Veränderungen: Der Lagetyp wandelt sich (beispielsweise von einem Indifferenz- oder Semihorizontaltyp zu einem Steiltyp).

Neben Änderungen der Herzachse werden auch Änderungen der Erregungsbildung und -ausbreitung beobachtet. Dabei sind vereinzelte Extrasystolen vornehmlich ventriculären Ursprungs als normale Reaktion eines völlig gesunden Herzens auf solche Beschleunigungskräfte anzusehen. Bei herzgesunden US-Piloten sind einzelne Extrasystolen in mehr als 30 % der Zentrifugenfahrten mit +8 G_z beschrieben worden.

Die Grenze zwischen normaler und pathologischer Reaktion des Herzens ist in dieser Ausnahmesituation der hohen Beschleunigungseinwirkung auf den menschlichen Körper nur schwer zu ziehen.

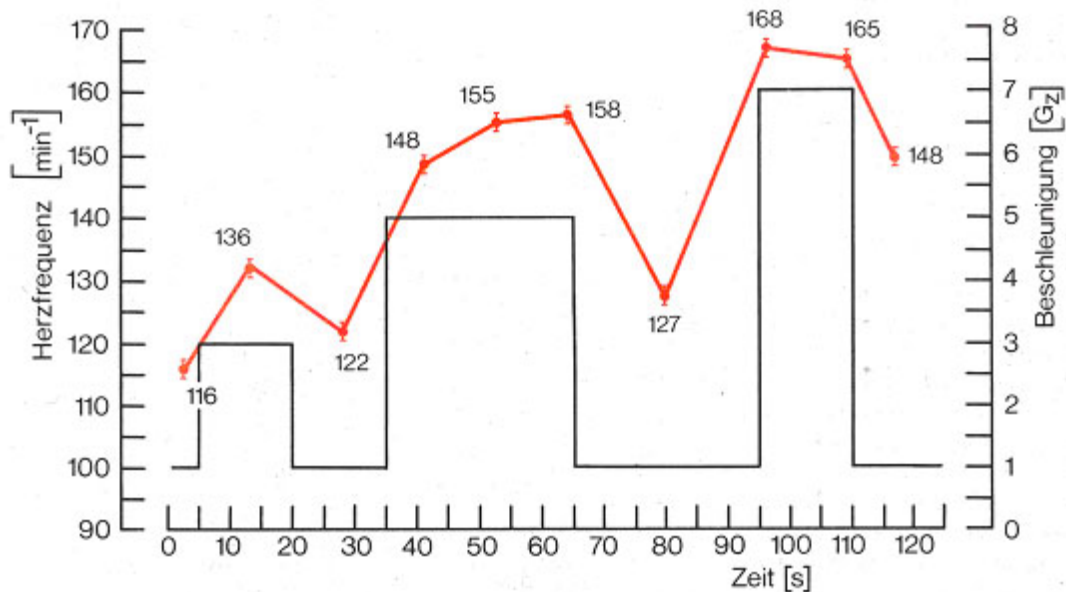


Abb. 6.9: Herzfrequenzanstieg bei zunehmender Fliehkraft (+ G_z): Ergebnisse eines Experiments in einer Beschleunigungsanlage (Zentrifuge)

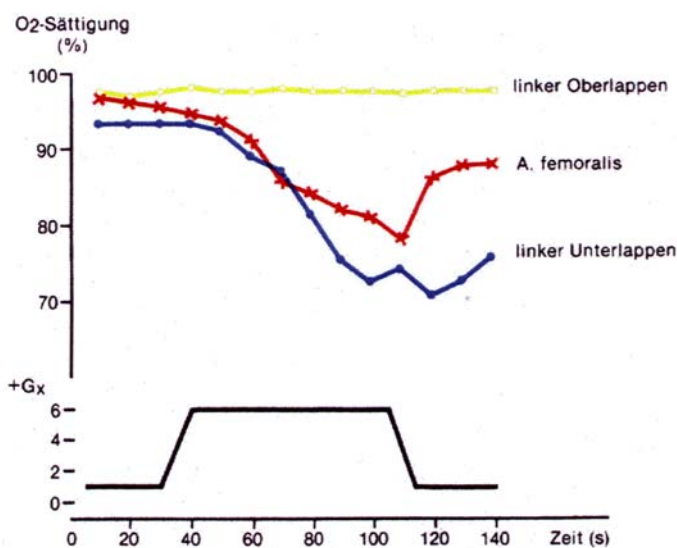


Abb. 6.10: Sauerstoffsättigung des Blutes unter +G_x Einwirkung (beim Hund)

Veränderungen an der Lunge

In Abhängigkeit vom Ausmaß der + G_z-Belastung kommt es zu einer Ventilations-Perfusions-Störung der Lunge, wobei die unteren Lungenabschnitte vermehrt durchblutet, aber vermindert belüftet und die oberen Lungenabschnitte zwar normal belüftet, aber vermindert durchblutet werden. Wie in Abb. 6.10 dargestellt, tritt als Folge einer längerdauernden stärkeren + G_z-Einwirkung ein Abfall der Sauerstoffsättigung des arteriellen Blutes ein, insbesondere in den Gefäßen der unteren Lungenpartien (beim Hund im Zentrifugenexperiment nachgewiesen).

Veränderungen der Gehirndurchblutung

Bei längerdauernder Einwirkung von stärkeren + G_z-Belastungen kommt es neben einer hypoxischen Hypoxie (aufgrund der Ventilations-Perfusionsstörung der Lunge) zu einer hypovolämischen Hypoxie (durch + G_z-bedingte Blutvolumenverschiebung von kopf- nach fußwärts mit Abnahme des hydrostatischen Druckes in der Kopf-Hirn-Region) des Gehirns: Es entsteht hier eine (gewisse) Ischämie. Dies führt zu einer Verminderung des Perfusionsdruckes im Gehirn (stagnierende Hypoxie). Außerdem kommt es zu einem + G_z-abhängigen

Abfall des venösen Druckes in Kopfhöhe, so dass auf der venösen Seite das Blut aus dem Schädel „gesaugt“ wird (sog. „Siphoneffekt“). Deshalb kommt es sowohl beim ungeschützten Versuchstier als auch beim Menschen bei etwa +5 G_z zu messbaren Durchblutungsverminderungen des Gehirns mit entsprechenden cerebralen Ausfallerscheinungen, die sich zunächst einmal in unterschiedlich stark ausgeprägten Sehstörungen äußern, wie sie in Abb. 6.11 dargestellt sind: Verlust des peripheren Gesichtsfeldes (Peripheral Light Loss, PLL), Röhrensehen, Tunnel Vision, Grau-Sehen (Greyout), Schwarz-Sehen (Blackout) und schließlich Bewusstlosigkeit (Loss of Consciousness, LOC).

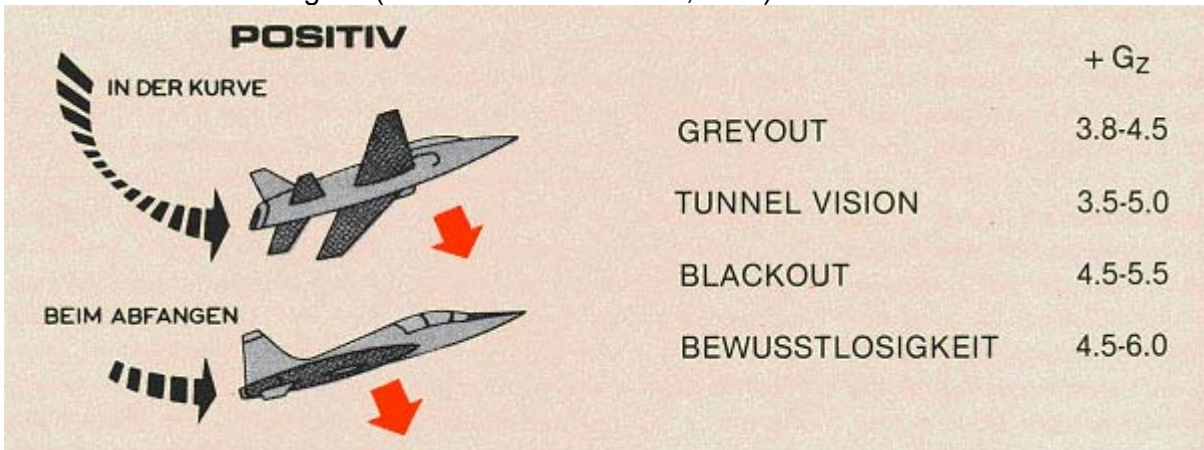


Abb. 6.11: Toleranzgrenzen und Ausfallerscheinungen des Menschen bei + G_z-Einwirkungen

Visuelle Symptome

Zwischen +3,8 bis +4,5 G_z kommt es als fliehkraftspezifisches Symptom der Hirnleistungsminderung zu einer Beeinträchtigung der Sehleistung: Es tritt zunächst der sog. „Greyout“ auf, d.h., es kommt zu einem Verlust des Farbsehvermögens bzw. zu einer Trübung der Sehkraft, weil bei dieser Beschleunigungseinwirkung durch eintretende Minderdurchblutung der Augen die für das Farbsehen verantwortlichen Zäpfchen der Retina ausfallen. Außerdem kommt es zu einer Einschränkung des peripheren Gesichtsfeldes, welches schließlich ganz verschwindet und sich als Röhrensehen oder „Tunnel Vision“ zwischen +3,5 bis +5,0 G_z manifestiert. Zwischen +4,5 bis +5,5 G_z geht - je nach konstitutionsbedingter, individueller G-Toleranz das Sehvermögen vollständig verloren: Es kommt zum Schwarz-Sehen oder „Blackout“, wobei das Bewusstsein des Individuums noch erhalten ist und der Betroffene beispielsweise noch hören oder Antworten geben kann, da der noch vorhandene Blutdruck mit etwa 20 mmHg gerade noch zur Aufrechterhaltung der Gehirnfunktion ausreicht, eine Durchblutung der Netzhaut aber aufgrund des bestehenden, annähernd konstanten Augeninnendruckes (von normalerweise 15 bis 20 mmHg) nicht mehr möglich ist. Dadurch kommt es zur Mangel durchblutung der Netzhaut mit Sauerstoffmangel, so dass ihre Funktion (besonders die der Stäbchen, die für die Wahrnehmung von Hell-Dunkel-Unterschieden verantwortlich sind) ausfällt. Abb. 6.12 erläutert die Verhältnisse.

Für kurze Zeit (etwa 5 bis 6 s) jedoch können selbst hohe + G_z-Belastungen ohne Beeinträchtigung des Sehvermögens aufgrund der sogenannten „Sauerstoffreserve“ der Netzhaut und des Gehirns ertragen werden (siehe dazu auch Abb. 6.5).

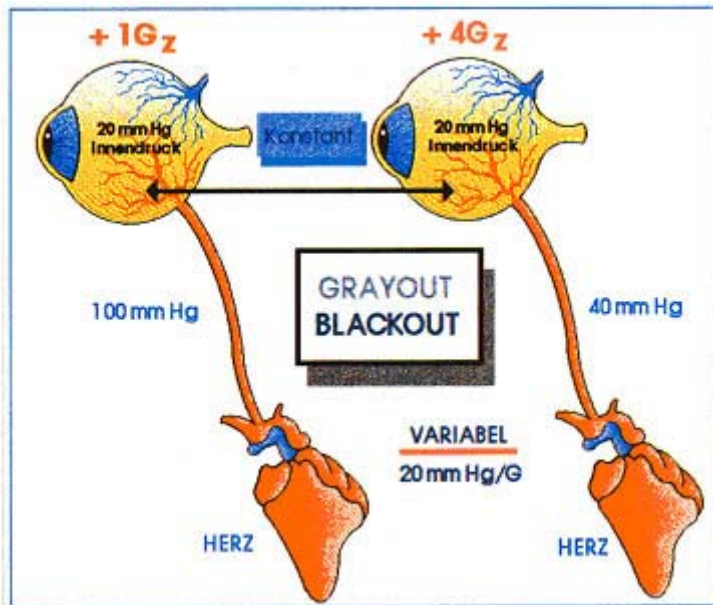


Abb. 6.12: Arterieller Blutdruck oberhalb der Herzebene bei 1 G_z und + 4 G_z: Abnahme von etwa 100 mmHg auf 40 mmHg, während der Augeninnendruck auch unter Fliehkrafteinwirkung annähernd konstant bei 20mmHg bleibt

Bewusstlosigkeit (Loss of Consciousness, LOC)

Bei weiterer Zunahme der Fliehkkräfte kommt es dann - zeitlich oft nicht immer deutlich abgesetzt und mit großer individueller Schwankungsbreite zwischen +4,5 bis +6,0 G_z zur Bewusstlosigkeit (Loss of Consciousness, LOC). Dabei spielt die Beschleunigungszunachsrate (G-rate of onset) eine große Rolle (siehe dazu auch Abschnitt 6.4 und Abb. 6.5).

Zeitlich früher und damit als „letzte Warnung“ vor Eintritt der Bewusstlosigkeit reagiert jedoch das menschliche Auge mit Greyout, Tunnel Vision oder totalem Sehverlust (Blackout).

Deshalb ist es unerlässlich, dass

beim Auftreten von Sehstörungen bereits bei der fliehkraftbedingten Einengung des Gesichtsfeldes die + G_z-Belastung durch den Exponierten (Piloten oder Probanden in der Zentrifuge) sofort vermindert wird oder entsprechende Gegenmaßnahmen zur Erhöhung der G-Toleranz eingeleitet werden (siehe dazu auch 6.8.3). Zu beachten ist jedoch dabei, dass die G-Zuwachsraten bis zu +3 G_z/s der Bereich zwischen fliehkraftbedingten Sehstörungen und dem Eintritt der Bewusstlosigkeit individuell kurz ist und vom Exponierten nicht immer wahrgenommen wird.

Gefährlich sind sehr hohe G-Zuwachsraten von über +5 G_z/s, wie sie beispielsweise in modernen Kampfflugzeugen (wie F-15 oder F-16) auftreten können. Hier ist die Warnfunktion des Auges nicht mehr gegeben, die Bewusstlosigkeit tritt dann (ohne Vorsymptome) praktisch schlagartig ein.

Die Bewusstlosigkeit kann unterschiedlich lange dauern. Es vergehen jedoch 15 bis 60 s bis zur Wiederkehr des Bewusstseins und der Orientierung nach Beendigung der Beschleunigung.

Der Betroffene hat sein Zeit- und Raumgefühl verloren, die Kenntnisse der aktuellen Flugdaten fehlen ihm völlig. Die Unfallgefährdung ist demzufolge hier besonders groß. Darüber hinaus fehlt ihm die Erinnerung an den Bewußtseinsverlust oder dessen Eintritt (Amnesie), er muss sich deshalb vollständig neu orientieren. Während dieser Reorientierungsphase ist die Unfallgefahr insbesondere im Tiefflug oder nach Luftkampfmanövern - aufgrund geringer Flughöhe oder extremer Fluglage weiterhin sehr groß. So mancher tödliche Flugunfall hat hierin seine Ursache.

6.5.2 Wirkung negativer Beschleunigungen (- G_z)

Erfolgt die Einwirkung negativer Fliehkkräfte in der Körperlängsachse (- G_z), so wird Blut zum Kopf verschoben. Die Folge ist eine Blutüberfüllung des Gehirns und der Augen, da hier der hydrostatische Druck proportional zur Erhöhung des negativen G_z-Wertes (Betrag des Vektors) zunimmt. Außerdem wird unter dem Einfluss der negativen Beschleunigungskräfte der Flugzeuginsasse aus dem Sitz gehoben und in das Schultergurtzeug gedrückt.

Die Toleranz des Menschen gegenüber negativen G_z -Einwirkungen ist gering, wesentlich geringer als gegenüber positiven G_z -Einwirkungen. Sie liegt maximal bei $-3 G_z$ und dies für maximal 5 s, weil die Reißfestigkeit der Hirngefäße geringer ist als die des übrigen Körpers. Deshalb kommt es u.a. (auch bei langjähriger Hypertonie) eher zur Ruptur einer Hirnarterie (Apoplex) als irgend einer anderen Körperarterie, sofern hier kein Aneurysma vorliegt.

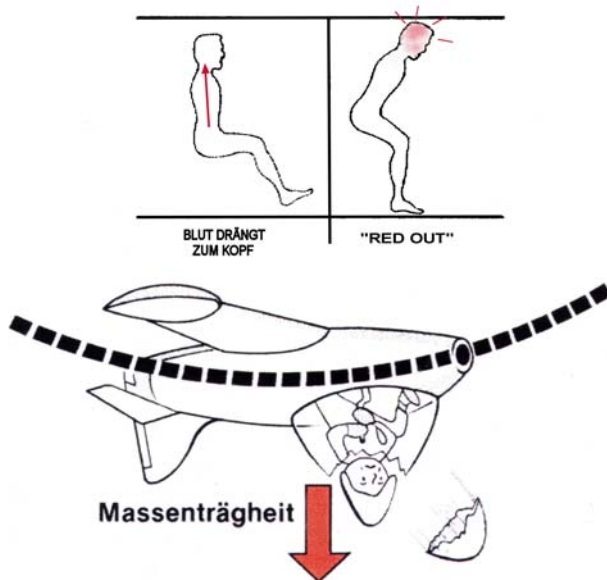


Abb. 6.13: Wirkungen negativer Beschleunigungen ($-G_z$)

Das Risiko einer solchen Ruptur ist durch die Blutüberfüllung im Kopf/Hirn-Bereich erhöht. Es kommt hierbei auch zu Sehstörungen, dem sog. Rotsehen oder „Redout“ (vgl. Abb. 6.13). Dies wird dadurch ausgelöst, dass das muskellose Unterlid durch die Fliehkraft nach oben geschoben wird und das Auge verschließt. Es handelt sich also hierbei nicht um ein physiologisches Rotsehen, das unter der Einwirkung negativer Fliehkkräfte durch Veränderungen im Auge oder Zentralnervensystem zustande käme, sondern um ein Phänomen, das rein mechanisch zustande kommt durch das nach oben geschobene Unterlid, welches den Blick durch einen Rotschleier verlegt.

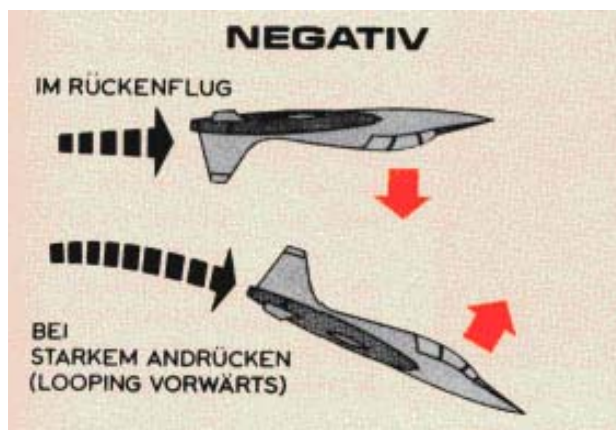


Abb. 6.14: Auftreten negativer Beschleunigungen und ihre Toleranzgrenzen bzw. Ausfallerscheinungen beim Menschen

Obere Toleranzgrenze - 3 g für 5 s (REDOUT)

Bei höheren Belastungen Dauerschäden

Negative G's können beispielsweise auftreten beim Rückenflug oder beim Looping vorwärts durch starkes Andrücken (vgl. Abb. 6.14).

6.5.3 Wirkung transverser Beschleunigungen ($+ G_x / - G_x$)

Der menschliche Körper besitzt gegenüber transversen Beschleunigungen die größte Toleranz, weil die Einwirkrichtung dieser positiven G_x bzw. negativen G_x -Kräfte im rechten Winkel zur Körperlängsachse und damit zur Hubachse des Herzens verläuft (vgl. Abb. 6.15). Da-

durch können kaum hydrostatische Wirkungen transverser G's auf Blutvolumen und Blutdruck entstehen. Deshalb bleibt die Gesamtblutmenge des Gehirns praktisch konstant; es ändert sich dabei die Hirndurchblutung lediglich durch lokale Blutumverteilung innerhalb dieses Organs selbst. Dies geschieht durch Blutverschiebung von frontalen Hirnregionen nach occipital unter positivem G_x -Einfluss bzw. von occipitalen Hirnarealen nach frontal unter negativem G_x -Einfluss.

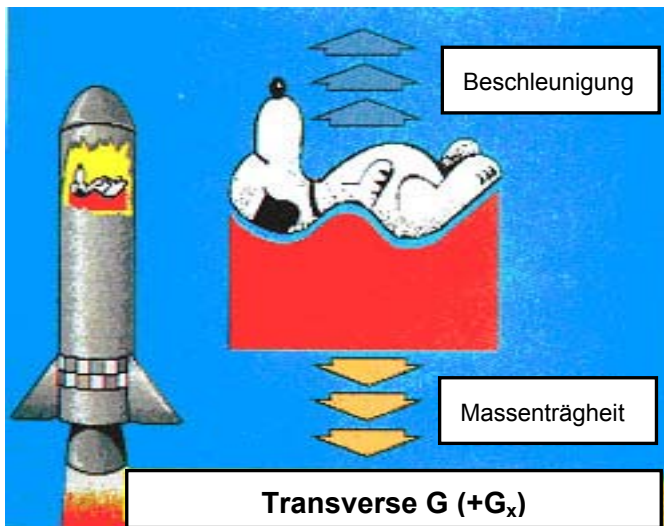


Abb. 6.15: Wirkungen transverser Beschleunigungen ($+G_x$ bzw. $-G_x$)

Durch transverse G's ($+G_x$) wird vielmehr ein zunehmender Zug auf die Augen ausgelöst, eventuell um ein Mehrfaches ihres Eigengewichtes, und zwar in occipitale Richtung (aufgrund ihrer Massenträgheit nach dem Gesetz: „actio gleich reactio“).

Deshalb kommt es bei über $+12 G_x$ zu Störungen der Sehleistung und übermäßigem Tränenfluss.

Mit Zunahme der transversen Beschleunigung wird auch die Atmung schwieriger, weil der Brustkorb zunehmend in der Ausatemposition fixiert wird bzw. weil die $+G_x$ -Kräfte aufgrund der Massenträgheit des Körpers den Atemexkursionen des Brustkorbes

beim Einatem-Vorgang entgegenwirken und somit die Atmung behindern bzw. einschränken.

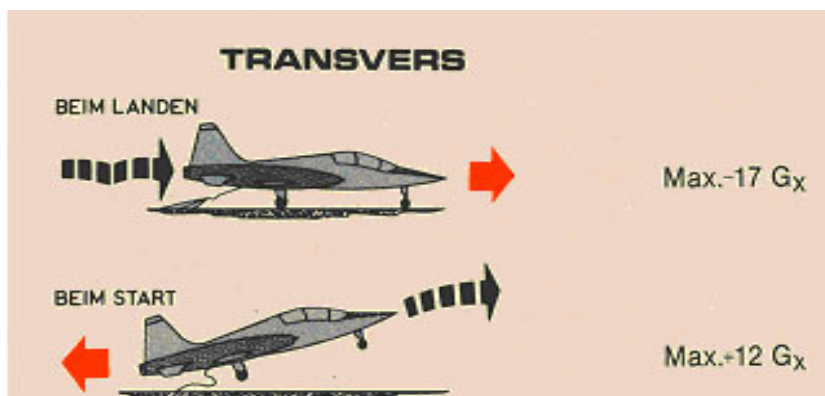


Abb. 6.16: Toleranzgrenzen des Menschen gegenüber transversen Beschleunigungen ($+G_x/-G_x$)

Deshalb ist eine Kompensation durch forcierte Zwerchfellatmung erforderlich. Diese wiederum lässt sich effektiver in Rückenlage als in Bauchlage durchführen. Aus diesem Grunde besteht in Bauchlage eine geringere Toleranz gegenüber transversen Beschleunigungen ($+G_x$) als in Rückenlage.

Beim Fliegen (in sitzender Position des Piloten) sind jedoch keine „normalen“ Flugzustände vorstellbar, bei denen die Toleranzgrenzen des Menschen überschritten werden könnten (vgl. Abb. 6.16). Dies gilt auch für links- und rechtslaterale G's ($+G_y/-G_y$), die deshalb hier nicht näher erläutert werden sollen.

6.6 Maßnahmen zur Erhöhung der positiven G_z -Toleranz

Ziel aller Maßnahmen zur Erhöhung der G-Toleranz gegenüber positiven Beschleunigungen in der Körperlängsachse ($+G_z$) muss es sein, den fliehkraftbedingten Abfall des Blutdrucks in Augenhöhe in Grenzen zu halten, um einen Minimalkreislauf für Gehirn und Netzhaut zu gewährleisten. Es bieten sich dabei technische und persönlich durchzuführende Maßnahmen an, die auch kombiniert angewandt werden können:



- Anti-G-Hose
- Überdruckbeatmung
- Änderung der Körperlage
- Anti-G-Manöver
- Zentrifugentraining und Indoktrination.

6.6.1 Technische Maßnahmen zur Erhöhung der positiven G_z -Toleranz

Die Anti-G-Hose

Sie besteht aus 5 miteinander verbundenen Luftkammern aus Gummi, die mit fester Außenwand manschettenartig aufgebaut sind (vergleichbar mit einer Blutdruckmanschette). Sie wird am Unterbauch sowie an beiden Unter- und Oberschenkeln angelegt. Über einen Gummischlauch werden diese Kammern an das Druckluftsystem des Flugzeuges angeschlossen und ab + 2 G_z automatisch in Abhängigkeit von der G-Belastung aufgeblasen. Dieser erhöhte Außendruck, der über die Muskulatur und das Bindegewebe auf die Gefäße wirkt, verringert ein Versacken des Blutes unter positiver G_z -Einwirkung in die unteren Körperpartien. Außerdem wird dadurch der venöse Rückstrom zum Herzen verbessert und damit das Schlagvolumen angehoben. Schließlich wird durch die Anti-G-Hose ein + G_z -bedingtes Absinken des Zwerchfells vermindert, was eine Verbesserung der Atmung bedeutet.

Die + G_z -Toleranz des Menschen wird durch die Anti-G-Hose um 1 bis 1,5 G_z erhöht. Diese Wirkung wird jedoch nur erreicht bei einer individuell optimal angepassten Anti-G-Hose.

Abb. 6.17: Trageweise einer Anti-G-Hose

Die Überdruckbeatmung (Positive Pressure Breathing, PPB)

Durch Überdruckbeatmung wird der Druck im Thorax erhöht, wodurch sich das Zwerchfell absenkt und damit der Druck im Bauchraum ansteigt. Das führt zu einem verstärkten Abstrom des venösen Blutes in Richtung Herz, da die Venenklappen einen Rückstrom in die Peripherie verhindern. Auf diese Weise erhöht sich das Blutvolumen im Herzen, der Füllungsdruck und damit das Schlagvolumen des Herzens nehmen zu. Dadurch kommt es zu einem Anstieg des arteriellen Blutdrucks und somit zu einer besseren Hirndurchblutung. Erhöhung der G-Toleranz von + 0,5 bis 1,0 G_z ist die Folge. Darüber hinaus werden die beschriebenen G_z -abhängigen Ventilations- und Perfusionsstörungen der Lunge gemindert. Bei einer Überdruckbeatmung von mehr als 30 mmHg muss jedoch mit einer Druckjacke (die vom Prinzip her wiederum wie die Anti-G-Hose aufgebaut ist) von außen auf den Brustkorb ein Gegendruck ausgeübt werden. Diese Methode ist jedoch derzeit noch in der Erprobungsphase.

Änderung der Körperlage zur Verminderung des Abstandes Herz-Augen

Eine Verkürzung des Abstandes zwischen Herz und Auge (Hubhöhe des Herzens) vermindert den unter positiven G_z -Einwirkung bestehenden hydrostatischen Druckgradienten entlang der Körperlängsachse. Dies lässt sich durch geneigte oder mehrfach verstellbare Sitzpositionen erreichen (tilt-back-seat, vgl. Abb. 6.18).

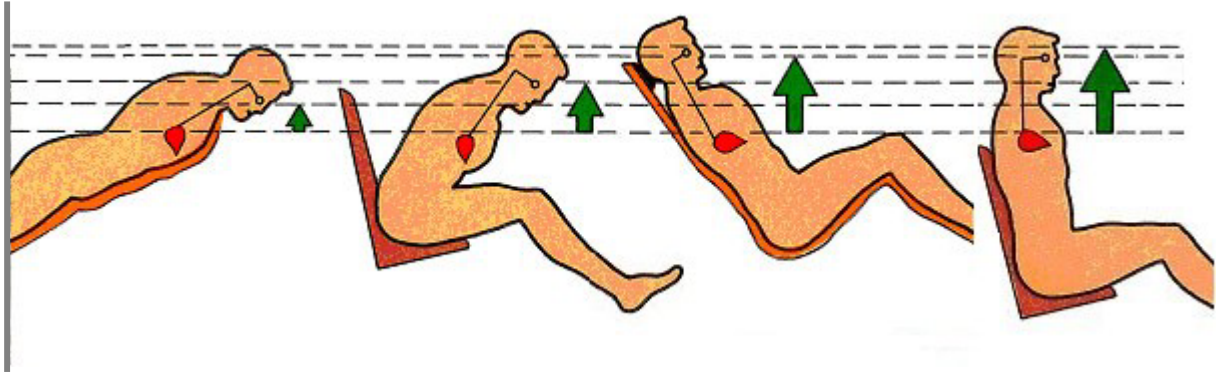


Abb. 6.18: Erhöhung der + G_z -Toleranz durch Verminderung des Herz-Augen-Abstandes

Ein Teil der Fliehkräfte wird aus der z-Achse in die x-Achse verschoben und damit teilweise in transverse G_s umgewandelt.

Durch die so erfolgte Aufteilung in 2 Wirkrichtungen wird die G -Toleranz eines Individuums insgesamt erhöht, jedoch nicht die G_z -Toleranz als solche, sie bleibt der limitierende Faktor! Dies wurde beim Start der Astronauten und bei ihrem Wiedereintritt in die Erdatmosphäre angewandt, wo diese mit ihrer Körperlängsachse in bezug auf die Fahrtrichtung einen 90° -Winkel einnahmen, also auf dem Rücken lagen.

Für Flugzeuge ist eine derartige Rückenlage jedoch nicht praktikabel, denn den Vorteilen einer erhöhten + G_z -Toleranz steht eine erschwerte Sicht aus dem Cockpit und auf die fest installierten Cockpitinstrumente entgegen.

Aber auch durch Vor- und Zurückbeugen des Oberkörpers kann - durch Verringerung des Herz-Augen-Abstandes um nur 10 cm eine Verminderung der Hubhöhe für das Herz und damit eine Erhöhung der + G_z -Toleranz um fast 1 G erreicht werden.

Allerdings konnten bisher Sitze mit größerem Neigungswinkel der Rückenlehne (über 45° nach hinten), die eine deutliche Erhöhung der + G_z -Toleranz bringen würden, in Flugzeuge auch wegen noch ungelöster Probleme beim Notausstieg nicht eingebaut werden.

6.6.2 Persönliche Maßnahmen zur Erhöhung der positiven G_z -Toleranz

Anti-G-Manöver (L1- und M1-Methode)

Zunächst wird nach raschem Aus- und Einatmen für etwa 3 s die Atemluft gegen die geschlossene Stimmritze gepresst (L1-Manöver) bei gleichzeitiger starker bzw. maximaler Anspannung der Muskulatur der Ober- und Unterschenkel, der Ober- und Unterarme sowie des Thorax- und Bauchraumes. Danach erfolgt wieder ein rasches Aus- und Einatmen (forciert!) mit anschließender Pressatmung (Druckatmung). Dieser Zyklus wird so intensiv und so lange wie möglich wiederholt, wobei eine permanente Anspannung der Muskulatur (auch während der Atemphase) notwendig ist, da diese als sogen. „Gefäßkorsett“ zusätzlich hilft. Beim ebenfalls noch häufig ausgeführten M1-Manöver wird die eingeatmete Luft gegen die teilweise geöffnete Stimmritze gepresst, so dass ein Grunzton erzeugt wird.

Diese Atemtechniken sind jedoch sehr anstrengend und können deshalb nur für relativ kurze Zeit (nicht länger als 30 bis 45 s) effizient durchgeführt werden, da es sonst zur Erschöpfung des Probanden kommt. Bei richtiger Durchführung dieser Techniken lässt sich eine durchschnittliche Erhöhung der G-Toleranz von + 1,5 bis + 2,5 G_z erreichen.

Zentrifugen-Training und Indoktrination:

Es besteht Übereinstimmung darüber, dass die G_z-Toleranz des Menschen durch Training mittels wiederholter positiver G_z-Exposition in einer Humanzentrifuge sowie durch gezielte Kräftigung der für die effiziente Durchführung von Anti-G-Manövern besonders beanspruchten Muskelgruppen (des Thorax- und Bauchraumes sowie der proximalen Extremitätenabschnitte) erhöht werden kann (vgl. Abb. 6.19).

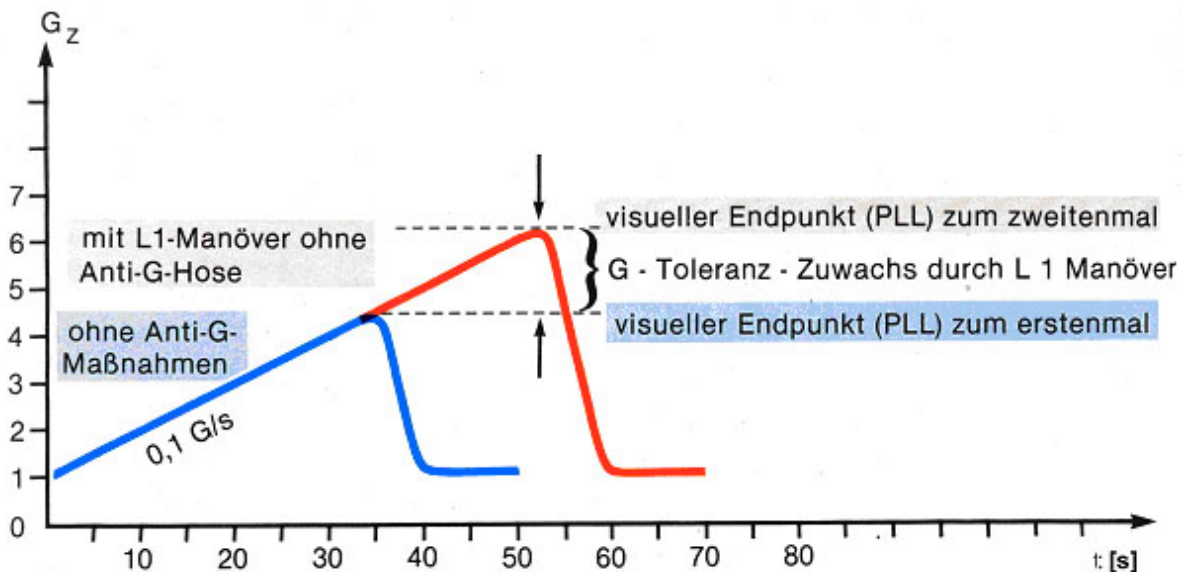


Abb. 6.19: G_z-Toleranz

Von Flugzeugführern ist auch bekannt, dass sie nach längerer Zeit ohne Flugdienst (Urlaub, Lehrgänge etc.) erst einige Flüge mit höherer G-Belastung absolvieren müssen, um ihre frühere G-Toleranz wieder zu erreichen.

Auch Untersuchungen mit Probanden in Humanzentrifugen haben ergeben, dass es nach wiederholter, längerdauernder G-Belastung (beispielsweise + 7 G_z für 15 s nach der STANAG 3827) an mehreren aufeinanderfolgenden Tagen zu einer Steigerung der + G_z-Toleranz des Menschen kommt.

Dabei ist jedoch noch unklar, ob es sich bei diesem Phänomen ursächlich um eine Umstellung der Kreislaufregulation im Sinne eines Trainingseffektes mit einer Steigerung der Leistungsfähigkeit des cardiopulmonalen Systems handelt, oder ob lediglich die persönliche Ausführung der Anti-G-Manöver effizienter erfolgt im Sinne einer Indoktrination.

Eine Studie über den Einfluss von körperlichem Training auf die G-Toleranz hat ergeben, dass Ausdauer-(lauf)-Training alleine zu keiner Erhöhung der G-Toleranz im Vergleich zur nichttrainierten Kontrollgruppe führte, während Krafttraining (Muskeltraining an Kraftmaschinen oder mit Gewichten) eine merkliche Verbesserung der G-Toleranz bewirkte. Dieser Befund spricht gegen die Vorstellung, dass es beim „G-Training“ zu einer Umstellung des Kreislaufregulationssystems kommt und unterstützt die Ansicht, dass ein G-Training nur in einer Form erfolgversprechend ist, die darauf abhebt, die Ausführung der Anti-G-Manöver durch ein Training der entsprechenden Muskelgruppen effizienter zu gestalten.

6.7 Grundlagen der Bewegungslehre

Bewegung

Bewegung = Translation + Rotation

Translation

Der Ortsvektor \vec{x} beschreibt Ort und Richtung eines Objektes.

Ändert sich der Weg mit der Zeit, so taucht eine zweite vektorielle Größe auf, die Geschwindigkeit

$$\vec{v} = \frac{\vec{x}_2 - \vec{x}_1}{\Delta t}$$

Geschwindigkeit

Hierbei ist \vec{x}_1 der Ortsvektor zum Objekt zum Zeitpunkt t_1 , \vec{x}_2 zum Zeitpunkt t_2 und Δt die verstrichene Zeit ($t_2 - t_1$).

Ist nicht eine im Zeitraum Δt existierende Durchschnittsgeschwindigkeit, sondern die Geschwindigkeit zu einem definierten Zeitpunkt gesucht, so wird das Differential gebildet:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{x}}{dt} = \dot{\vec{x}}$$

Die Geschwindigkeit ist die erste Ableitung des Weges nach der Zeit.

Ändert sich die Geschwindigkeit $\dot{\vec{v}}$ mit der Zeit, so redet man von einer Beschleunigung.

Die Durchschnittsbeschleunigung in einem Zeitraum Δt ergibt sich analog *Abb. 6.1* zu

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t}$$

Beschleunigung

wobei \vec{v}_1 der Anfangs-, \vec{v}_2 der Endgeschwindigkeit und Δt der verstrichenen Zeit entspricht.

Die Beschleunigung zu einem Zeitpunkt ergibt sich aus Differentiation der Geschwindigkeit nach der Zeit:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \dot{\vec{v}} = \ddot{\vec{x}}$$

Bei zeitlicher Änderung der Beschleunigung kann schließlich noch der Stoß

$$\vec{j} = \frac{\vec{a}_2 - \vec{a}_1}{\Delta t}$$

Stoß

berechnet werden. Durch Differentiation der Beschleunigung nach der Zeit erhält man hier:

$$\vec{j} = \frac{d\vec{a}}{dt} = \dot{\vec{a}} = \ddot{\vec{v}} = \ddot{\vec{x}}$$

Rotation

Entsprechend der Verschiebung \vec{x} eines Objektes existiert auch eine Verdrehung θ . Diese gibt die Differenz zu einer Nulllage an.

Ändert sich der Winkel mit der Zeit Δt , so spricht man von einer Drehbewegung mit der Winkelgeschwindigkeit

$$\varpi = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\Delta t}$$

Winkelgeschwindigkeit

wobei θ_1 die Ausgangs-, θ_2 die Endwinkelverschiebung und Δt die verstrichene Zeit darstellt.

Als Differential entsteht:

$$\varpi = \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta}$$

Eine zeitliche Änderung der Winkelgeschwindigkeit wird als Winkelbeschleunigung

$$\alpha = \frac{\varpi_2 - \varpi_1}{\Delta t}$$

Winkelbeschleunigung

mit ϖ_1 als Ausgangs-, ϖ_2 als Endwinkelgeschwindigkeit und Δt als verstrichener Zeit bezeichnet.

Differentielle Schreibweise ergibt hier:

$$\alpha = \frac{d\varpi}{dt} = \dot{\varpi} = \ddot{\theta}$$

Eine zeitliche Änderung der Winkelbeschleunigung kann schließlich berechnet werden gemäß:

$$\gamma = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\Delta t}$$

Zeitliche Änderung der Winkelbeschleunigung

bzw. in differentieller Schreibweise:

$$\gamma = \frac{d\alpha}{dt} = \dot{\alpha} = \ddot{\varpi} = \ddot{\ddot{\theta}}$$

Die folgende Tabelle fasst die beschriebenen Größen der Bewegungslehre nebst ihrer SI-Einheiten zusammen:

Bewegungsparameter	Linearbewegung		Drehbewegung	
	Symbol	Einheit	Symbol	Einheit
Weg	s	m	θ	$^\circ$
Geschwindigkeit	$v, \frac{ds}{dt}$	$\frac{m}{s}$	$\varpi, \frac{d\theta}{dt}$	$\frac{^\circ}{s}$
Beschleunigung	$a, \frac{dv}{dt}, \frac{d^2s}{dt^2}$	$\frac{m}{s^2}$	$\alpha, \frac{d\varpi}{dt}, \frac{d^2\theta}{dt^2}$	$\frac{^\circ}{s^2}$
Stoß	$j, \frac{da}{dt}, \frac{d^2v}{dt^2}, \frac{d^3s}{dt^3}$	$\frac{m}{s^3}$	$\gamma, \frac{d\alpha}{dt}, \frac{d^2\varpi}{dt^2}, \frac{d^3\theta}{dt^3}$	$\frac{^\circ}{s^3}$

Abb. 6.20: Zusammenfassung der Größen der Bewegungslehre

Kräfte und Momente

Die in Kapitel 1.1 beschriebenen Bewegungsarten sind aus physiologischer Sicht alleine wenig interessant. Erst die aus ihnen resultierenden bzw. sie erzeugenden Kräfte und Momente haben Einfluss auf die physiologischen Mechanismen im menschlichen Körper. Nach Newton's Grundgesetz der Mechanik ist die Kraft proportional der Masse und der Beschleunigung:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Newton'sches Grundgesetz der Mechanik

Dies bedeutet, dass zur Beschleunigung eines Körpers der Masse m mit der Beschleunigung \vec{a} die Kraft \vec{F} aufgewendet werden muss. Da aber nach dem Grundsatz actio = reactio jede Kraft eine Gegenkraft bewirkt, wirkt auf einen beschleunigten Körper eine der Beschleunigung entgegengesetzte Kraft. Dieser Effekt tritt z.B. bei Beschleunigung eines Automobils auf, wobei den Insassen eine Kraft entgegen der Beschleunigungsrichtung nach hinten in den Sitz presst.

Für die Rotation gelten vergleichbare Zusammenhänge. Hier ist als Ursache für eine Bewegung jedoch keine Kraft, sondern ein Moment verantwortlich. Dieses ist proportional zu der Winkelbeschleunigung sowie zum Trägheitsmoment.

$$M = J \cdot \alpha$$

Winkelbeschleunigung

Dies bedeutet, dass zur Winkelbeschleunigung eines Körpers mit dem Trägheitsmoment J mit der Winkelbeschleunigung α das Moment M aufgewendet werden muss.

6.8 Verwendete und weiterführende Literatur

Breuer, H. dtv-Atlas zur Physik, Bd 1. (dtv: 3226), 6. Aufl. München , 2000

Breuer, H. dtv-Atlas zur Physik, Bd 2. (dtv: 3227) 5. Aufl. Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 2000

DeHart, R.L. (ed) Fundamentals of aerospace medicine, 2. ed. Williams and Wilkins, Baltimore, 1996

Ernsting, J., Nicholson, A. N., Rainford, D. J. (eds) Aviation medicine, repr., 3. ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000

High G physiological protection training. AGARD, Neuilly-sur-Seine, (AGARDograph, No 322), 1990

Papenfuß, W. Luftfahrtmedizin. Brandenburgisches Verlagshaus, Berlin, 1990

Principles of biodynamics. AGARD, Neuilly-sur-Seine, (AGARDograph, No 150), 1971

Gerthsen, C. Gerthsen Physik, 21. Aufl. Springer, Berlin, 2001

Whinnery, J. E. +Gz-induced loss of consciousness. Aviat Space Environ Med 58 (5), 468-472, 1987

Whinnery, J. E. Incapacitation time for +Gz-induced loss of consciousness. Aviat Space Environ Med 50 (1), 83-85, 1979

Whinnery, J. E. Loss of consciousness during air combat maneuvering. Aerospace Safety 34 (11), 1978

7 RETTUNGSSYSTEME

7.1 Geschichtlicher Überblick

Beginnend im 1. Weltkrieg bis zum Ende des 2. Weltkrieges war der Fallschirm das übliche Rettungssystem in Kampfflugzeugen. Im Luftnotfall musste sich der Pilot losschnallen, wenn vorhanden, das Kabinendach entfernen, aus eigenen Kräften das Flugzeug verlassen und dann manuell den Fallschirm öffnen. Während des 2. Weltkrieges stellte sich heraus, dass es den Piloten nicht immer möglich war, das Flugzeug zu verlassen. Gründe dafür waren:

1. Die Einsatzfluggeschwindigkeiten und damit der dabei auftretende Staudruck waren stark gestiegen.
2. Das Kabinendach ließ sich nicht schnell genug entfernen.
3. Durch instabiles Verhalten des Flugzeugs hervorgerufene Beschleunigungskräfte machten einen Ausstieg ohne Unterstützung unmöglich.
4. Der Flugzeugführer kollidierte beim Ausstieg mit dem Leitwerk des Flugzeugs.

Beim Notausstieg in großen Höhen traten zusätzliche Gefahren auf durch Sauerstoffmangel, niedrige Temperaturen, Druckfallkrankheit und durch, die Belastungsgrenzen des Menschen übersteigende, hohe Beschleunigungskräfte, hervorgerufen durch zu frühe Entfaltung des Rettungsfallschirms. Die Verluste an Piloten stiegen und machten Abhilfe nötig. Zu Beginn des 2. Weltkrieges begannen deutsche Ingenieure mit der Entwicklung von Schleudersitzen, die es dem Piloten ermöglichen sollten, das Flugzeug in allen Situationen sicher zu verlassen.

Beim Antrieb dieser Sitze wurde mit verschiedenen Konzepten experimentiert:

- Hydraulikdruck
- Druckluft
- Vorgespannte Federn
- Pyrotechnische Treibladungen

Die ersten Schleudersitze waren, mit heutigen Maßstäben gemessen, primitiv. Nach Verlassen des Flugzeugs musste sich der Pilot selbst vom Sitz trennen und dann mit dem Aufziehseil den Rettungsfallschirm öffnen. Es fehlte eine Versorgung des Piloten mit Atemsauerstoff beim Rettungsaustritt in großen Höhen. Außerdem waren für eine sichere Rettung eine Mindestflughöhe und eine Mindestfluggeschwindigkeit Voraussetzung. Der erste dokumentierte, erfolgreiche Notausstieg mit einem Schleudersitz erfolgte am 13.01.1943 aus einem Flugzeug des Typs He 280 V1. Das erste Kampfflugzeug, das serienmäßig mit Schleudersitzen ausgerüstet wurde, war der Typ He 219 (UHU), dessen Sitze durch Druckluft angetrieben wurden. Bis Ende des 2. Weltkrieges verzeichnete die deutsche Luftwaffe ca. 60 erfolgreiche Rettungsaustritte aus Kampfflugzeugen. Die Entwicklung nach dem 2. Weltkrieg verlief rasant. Strahlgetriebene Kampfflugzeuge für hohe Geschwindigkeiten und große Flughöhen wurden entwickelt. - Einsätze unter extremen Tiefflugbedingungen bei gleichzeitig hohen Geschwindigkeiten erwiesen sich als notwendig. Basierend auf deutschen Kenntnissen wurde die Entwicklung von Schleudersitzen vorangetrieben. Hier ist u. a. die britische Firma „Martin-Baker“ zu erwähnen, mit deren Rettungssystemen heute alle Kampfflugzeuge der deutschen Bundeswehr ausgerüstet sind. Die heute verwendeten Schleudersitze sind so genannte „0/0-Sitze“. Das bedeutet, dass der Pilot das am Boden stehende Flugzeug (Höhe = 0 ft / Geschwindigkeit = 0 Kt) verlassen kann und sicher gerettet wird, wenn das Rettungssystem fehlerfrei funktioniert. Nach dem Aktivieren des Schleudersitzes werden alle weiteren Phasen des Rettungsablaufs automatisch eingeleitet und ausgeführt.



Abb. 7.1: Schematischer Ablauf eines Rettungsausstiegs

Die Entwicklung ist heute noch nicht an ihrem Ende angelangt. Neue Technologien für die einzelnen Rettungssystem-Komponenten sind im Versuchsstadium, um die Rettung des Piloten unter noch ungünstigeren Flugbedingungen sicherzustellen. Schutz vor Verletzungen durch extreme Staudrücke bei sehr hohen Flugeschwindigkeiten, Stabilisierung des Sitzes nach Verlassen des Flugzeugs bis hin zur Steuerung der (bisher ballistischen) Flugbahn durch ein eigenständiges Raketenantriebssystem mit Geschwindigkeits- und Lagesensoren und Mikrocomputer seien hier als Zielvorgaben genannt.

7.2 Grundsätzliche Aufgaben eines Schleudersitz-Rettungssystems

Das Rettungssystem (Schleudersitz) in einem Kampfflugzeug soll es der Besatzung ermöglichen, im Notfall in möglichst allen Flugsituationen das Luftfahrzeug sicher zu verlassen und möglichst unverletzt zu überleben (siehe 7.3.3.).

Forderungen an die Funktion eines Rettungssystems:

- schnell (d. h. ohne unerwünschte Zeitverzögerungen)
- sicher (d. h. mit hoher technischer Zuverlässigkeit)
- in jeder Fluglage
- in jeder Flughöhe (0 bis H_{max})
- bei jeder Geschwindigkeit (0 bis v_{max})
- unterhalb der Belastungsgrenzen des menschlichen Körpers

Schleudersitze werden üblicherweise pyrotechnisch durch Kartuschen und einen Zusatz-Raketentreibsatz angetrieben, der den Sitz je nach Sitztyp und Fluglage bei der Aktivierung aus dem Flugzeug und von diesem weg in die Höhe katapultiert (moderne Sitze ca. 30 m, ältere bis zu 100 m). Dabei wirken durch den Raketenschub für Bruchteile von Sekunden Beschleunigungskräfte von 12 bis 23 G_z * auf den Piloten. Im folgenden Rettungsverlauf können durch Staudruck und Fallschirmöffnung Bremskräfte in ähnlicher Größenordnung auf den Piloten wirken.

* Anmerkung: Heute wird die biomechanische Belastung der Wirbelsäule des Piloten nicht mehr in „ G_z “, der Beschleunigungsbelastung in z-Achse, ausgedrückt, sondern durch den „Dynamic Response Index (DRI)“, der davon ausgeht, dass sich die Wirbelsäule des Menschen in Längsachse wie ein gedämpftes Feder/Masse-System verhält, das kurzzeitige Beschleunigungsspitzen durch seine Federeigenschaften abbaut, während Beschleunigungen von längerer Dauer ihre volle Wirkung auf die Wirbelsäule ausüben. Eine kurze Beschleunigung von wenigen Millisekunden Dauer hat danach wesentlich geringere schädliche Auswirkungen auf die Wirbelsäule als eine lang anhaltende Beschleunigung von derselben nominalen Höhe. Der DRI wird errechnet aus dem Stauchweg, den die Wirbelsäule aufgrund der Beschleunigungswirkung zusammengedrückt (verkürzt) wird. Nach heutigem Kenntnisstand wird bei einem DRI = 18 mit der Wahrscheinlichkeit von 5 % für eine Wirbelsäulenverletzung gerechnet. Eine Erweiterung des einachsigen DRI-Modells (z-Achse) auf alle 3 Achsen (x, y, z) führte zum Faktor „Multi-axial Dynamic Response Criteria (MDRC)“, der die mechanische Belastung

und das zu erwartende Verletzungsrisiko des menschlichen Körpers bewertet, wenn gleichzeitig in allen 3 Achsen dynamische Beschleunigungskräfte auf den Körper einwirken.

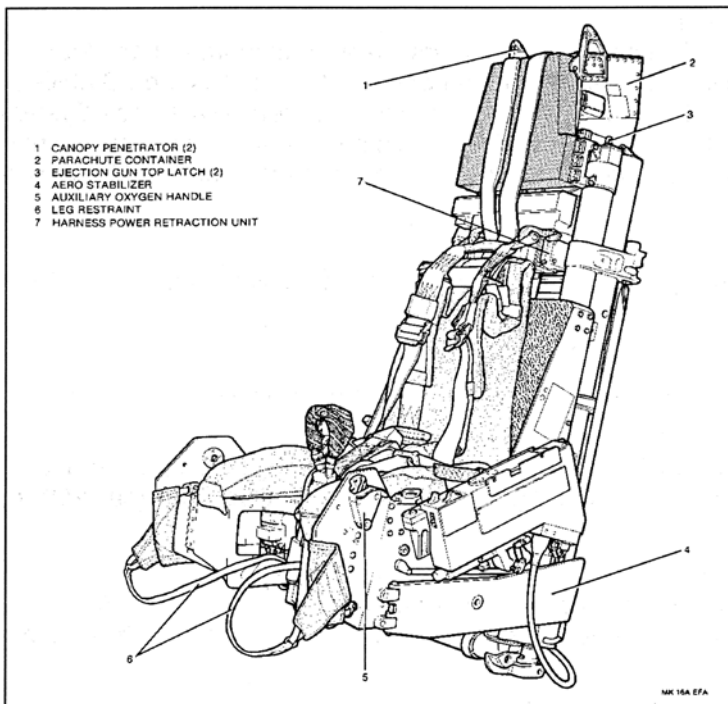
Bevor der Sitz das Flugzeug verlassen kann, muss das Kabinendach („Canopy“) entfernt werden. Das geschieht heute automatisch nach der Aktivierung des Rettungssystems.

Derzeit übliche Verfahren dafür sind:

- Absprennen des gesamten Kabinendachs mit Glas und Rahmen
- Durchbrechen des Kabinendachglases mit Hilfe von Kabinendachbrechern
- Anbrechen des Kabinendachglases durch pyrotechnische Systeme („Fragilisation“)

7.3 Das Schleudersitz-System

Ein Schleudersitzsystem umfasst alle Komponenten, die vom Zeitpunkt der Aktivierung bis zur Landung auf dem Boden oder im Wasser für eine sichere Rettung des Piloten durch eine



automatisch ablaufende Folge von einzelnen Systemfunktionen erforderlich sind. Diese Komponenten sind im Sitz selbst untergebracht. Sie sollen nachfolgend beschrieben und ihre Funktionen erläutert werden. Trotz konstruktionsbedingter Unterschiede zwischen einzelnen Fabrikaten ähneln sich Funktion und Leistung der einzelnen Systemkomponenten sehr.

7.3.1 Systemkomponenten

In Abb. 7.2 wird der Schleudersitz Martin-Baker MK 16 des Waffensystems EF 2000 vorgestellt. Das System setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

Abb. 7.2: Schleudersitz „Martin-Baker MK-16“

- **Sitzwanne**
In ihr sind Notsauerstoffsystem und Überlebensausrüstung untergebracht. Weiterhin sind an der Sitzwanne die Hebel zur Aktivierung verschiedener, im Sitz untergebrachter Untersysteme zu finden.
- **Auslösegriff**
Durch Betätigung des Auslösegriffs wird das Rettungssystem aktiviert und damit der vollautomatische Ablauf des gesamten Rettungsvorgangs eingeleitet.
- **Körperrückholssystem**
Es zieht mit Hilfe eines pyrotechnisch angetriebenen Systems den Oberkörper des Piloten an die Sitzlehne zurück und fixiert ihn dort in aufrechter Körperhaltung.
- **Beinrückholssystem**
Es sorgt dafür, dass mit der Aufwärtsbewegung des Sitzes die Unterschenkel des Piloten an die Sitzwanne gezogen und dort fixiert werden. Dadurch wird, besonders bei hohen Geschwindigkeiten, die Gefahr von Beinverletzungen durch Umherschlagen („Flailing“) verringert.

- **Armfesselsystem** („Arm Restraint System“)

Die Schleudersitze einiger moderner Kampfflugzeuge verfügen über ein System, das die Unterarme des Piloten mit der Sitzbewegung an den Sitz fesselt, um die Gefahr von Schleuderverletzungen („Flailing“) zu verringern.
- **Kabinendach-Abwurfsystem** („Canopy Jettison System“)

Es hat die Aufgabe, vor Bewegungsbeginn des Sitzes das Kabinendach zu entfernen (siehe 7.2.).
- **Ausschussfolgesystem** bei mehrsitzigen Lfz

Es steuert bei mehrsitzigen Lfz die Ausschusssequenz der einzelnen Sitze. Bei zweisitzigen Lfz wird immer zuerst der hintere Sitz gezündet.
- **Stabilisierungssystem** des Sitzes

Im Flugzeug wird der Sitz durch Katapult und Führungsschienen geführt, danach kann er durch ein Leinensystem, ein Raketensystem, im späteren Verlauf durch einen Stabilisierungsschirm („Drogue Chute“) stabilisiert werden. Ein anderes, sehr wirksames System arbeitet mit 2 kleinen Stabilisierungsschirmen, die in je einem Teleskop verstaut sind und beim Verlassen des Flugzeugs in Sekundenbruchteilen ausgestoßen und geöffnet werden.
- **Kartuschentreibsatz**

Er trennt den Sitz vom Flugzeug und sorgt für die Anfangsbeschleunigung des Sitzes zum Verlassen des Cockpits.
- **Raketentreibsatz**

Er treibt den Sitz je nach Sitztyp zwischen 30 m und 100 m über das Lfz.
- **Steuerschirm** („Drogue Chute“)

Er dient der Stabilisierung des Sitzes nach der Trennung vom Flugzeug und bremst ihn auf die höchstzulässige Öffnungsgeschwindigkeit des Rettungsfallschirms (ca. 250 kt) ab.
- **Mechanisches Auslösezeitwerk**

Es ist noch in Sitzen älterer Bauart zu finden und steuert hier den ordnungsgemäßen Ablauf des Rettungsvorgangs, beim Rettungsausstieg in großen Höhen unter Zuhilfenahme eines barometrischen Höhensensors.
- **Elektronisches Steuersystem** („Electronic Sequencer“)

Moderne Sitze haben anstelle des mechanischen Auslösezeitwerks, das die Fallschirmöffnung nur über eine fest eingestellte Zeitschaltung einleitet, ein elektronisches Steuersystem, den so genannten „Sequencer“, der die einzelnen Schritte in der Ausschussfolge entsprechend den Umgebungsbedingungen unterschiedlich steuert. Der „Sequencer“ ist ein Miniatur-Computer, der von sitzeigenen Sensoren Informationen über Flughöhe, Fluggeschwindigkeit, (bei neuesten Systemen auch Fluglage und Sinkgeschwindigkeit) erhält und nach deren Verarbeitung die einzelnen Schritte im Rettungsverlauf einleitet. Der Hauptvorteil des „Electronic Sequencer“ liegt in der Möglichkeit, mit unterschiedlichen, an die jeweilige Situation angepassten, Zeitverzögerungen zu arbeiten, was die Rettungsaussichten beträchtlich erhöht, ohne die mechanische Belastungsfähigkeit des Piloten und der Rettungssystem-Komponenten zu überschreiten.
- **Gurtzeug** („Harness“)

Das Gurtzeug hat die Aufgabe, den Piloten bei allen Flugmanövern am Sitz zu fixieren und sorgt beim Rettungsausstieg für die Verbindung zwischen Pilot und Fallschirm. Alle

bei der Bundeswehr eingeführten Kampfflugzeuge haben ein Gurtzeug mit Zentralschloss, das es dem Piloten ermöglicht, sich sehr schnell, mit wenigen Handgriffen vom Sitz zu trennen.

- **Bodensicherheitshebel** („Seat Safety Handle“) Er dient zum Sichern des Sitzes vor unbeabsichtigter Aktivierung, wenn das Flugzeug am Boden geparkt ist. Der Hebel blockiert den Auslösemechanismus des Sitzes, so dass kein Auslösegriff aus seiner Halterung gezogen werden kann. Bei Wartungs- oder Prüfungen am Sitz werden zusätzlich alle pyrotechnischen Komponenten durch eigene Sicherungsstifte gesichert, die den jeweiligen Zündmechanismus blockieren.
- **Schultergurt-Entriegelungshebel** („Go-Forward Lever“) Mit diesem Hebel kann der Pilot seine Schultergurte verriegeln und damit ein Herausziehen aus der augenblicklichen Position verhindern (z. B. vor einer Notlandung) und entriegeln zur Erhöhung seiner Körperbeweglichkeit.
- **Hand-Notauslösegriff** („Manual Override Handle“) Bei einer Fehlfunktion im Ausschussablauf des Sitzes kann sich der Pilot manuell vom Sitz trennen sowie den Rettungsschirm öffnen.
- **Sauerstoff-Notversorgung** („Emergency Oxygen Handle“) Eine Notsauerstoffflasche garantiert die O₂-Versorgung bei einem Ausstieg in großer Höhe. Sie wird automatisch aktiviert. Daneben kann die Notsauerstoffversorgung jederzeit durch den Piloten über einen Handgriff am Sitz aktiviert werden, z. B. wenn Probleme mit der Bord-Sauerstoffversorgung oder Hypoxieerscheinungen auftreten.
- **PEC-Teil** („Personal Equipment Connector“) Dieses stellt die Verbindung von Sauerstoffversorgung, Funkverbindung und Anti-G-System vom Flugzeug zum Piloten her. Es wird beim Rettungsausstieg mit Schnelltrennkupplungen automatisch getrennt.
- **Rettungsfallschirm** In den Schleudersitzen aller Kampfflugzeuge der Bundeswehr befindet sich der Rettungsschirm im oberen Teil des Sitzes, meist in der Kopfstütze. Mit dem Anschnallen ist die Verbindung des Piloten an den Rettungsfallschirm hergestellt. Rettungsschirme sind nicht ohne weiteres mit den Fallschirmen der Fallschirmspringer zu vergleichen, da sie speziell für das jeweilige Schleudersitzsystem entwickelt wurden und nur für Nottfälle vorgesehen sind. Aus technischen Gründen sind sie kleiner als diese, weshalb ihre Sinkgeschwindigkeit höher ist. Die Fallschirm- und Landung des Piloten ist somit relativ hart. Dieser Umstand erfordert ein periodisches Training der richtigen Fallschirm- und Landung. Auch für richtiges Verhalten danach und den Gebrauch der Überlebensausrüstung werden Speziallehrgänge durchgeführt.
- **Überlebensausrüstung** („Personal Survival Pack“) Sie befindet sich in der Sitzwanne und bleibt bei der Sitz/Mann-Trennung über eine Leine mit dem Piloten verbunden. Sie enthält das sich automatisch aufblasende Schlauchboot und die Notausrüstung (Notverpflegung, pyrotechnische und andere Signalmittel usw.).

7.3.2 Funktionsprinzip

In den nachfolgenden Darstellungen (Abb. 7.3. und 7.4) wird der Funktionsablauf eines Rettungsausstiegs nach Aktivierung eines Schleudersitzes dargestellt.

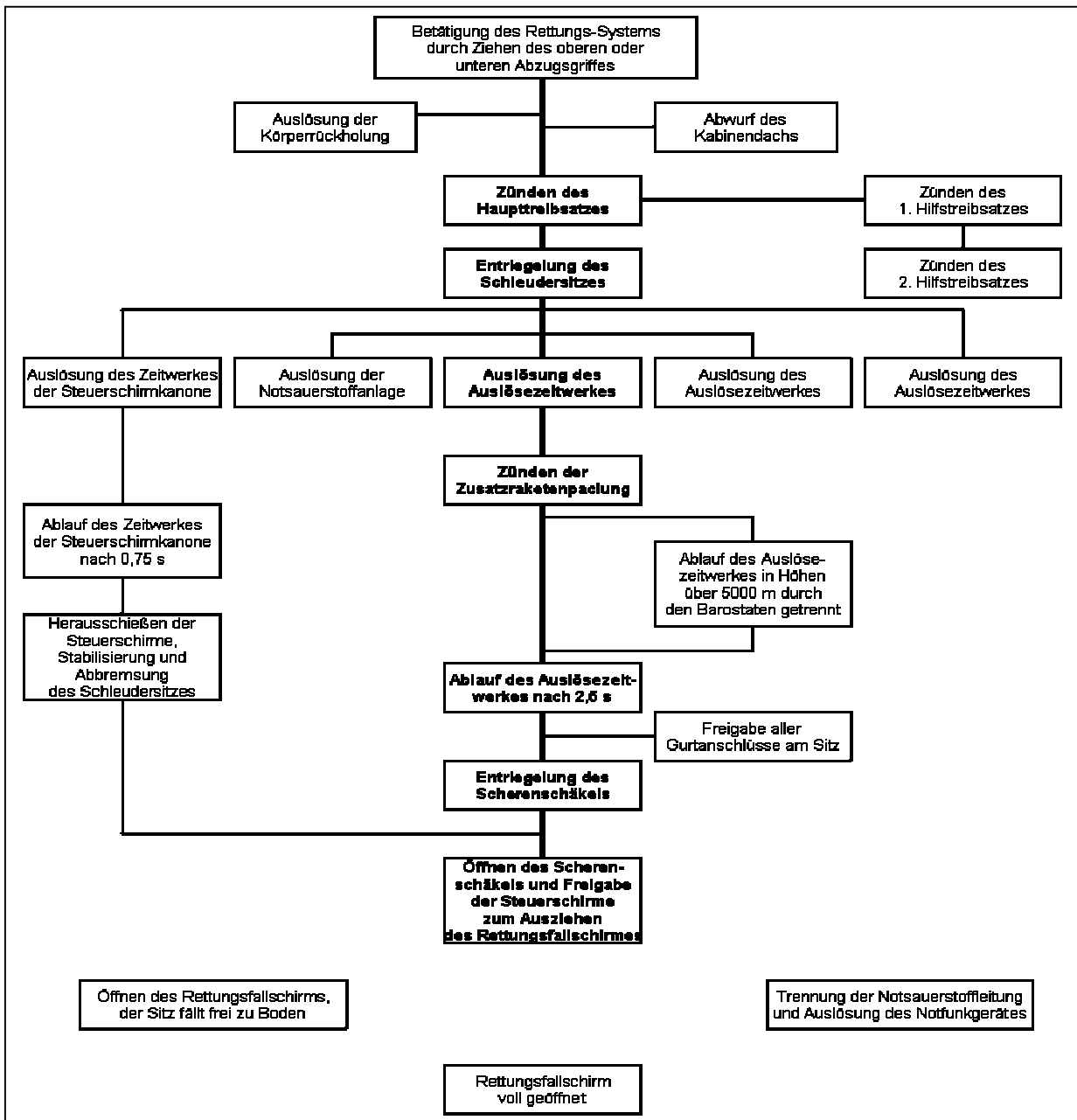


Abb. 7.3: Funktionsschema eines Rettungsausstiegs (Martin-Baker-Sitz)

MK F16F EJECTION SEQUENCE HIGH ALTITUDE MODE

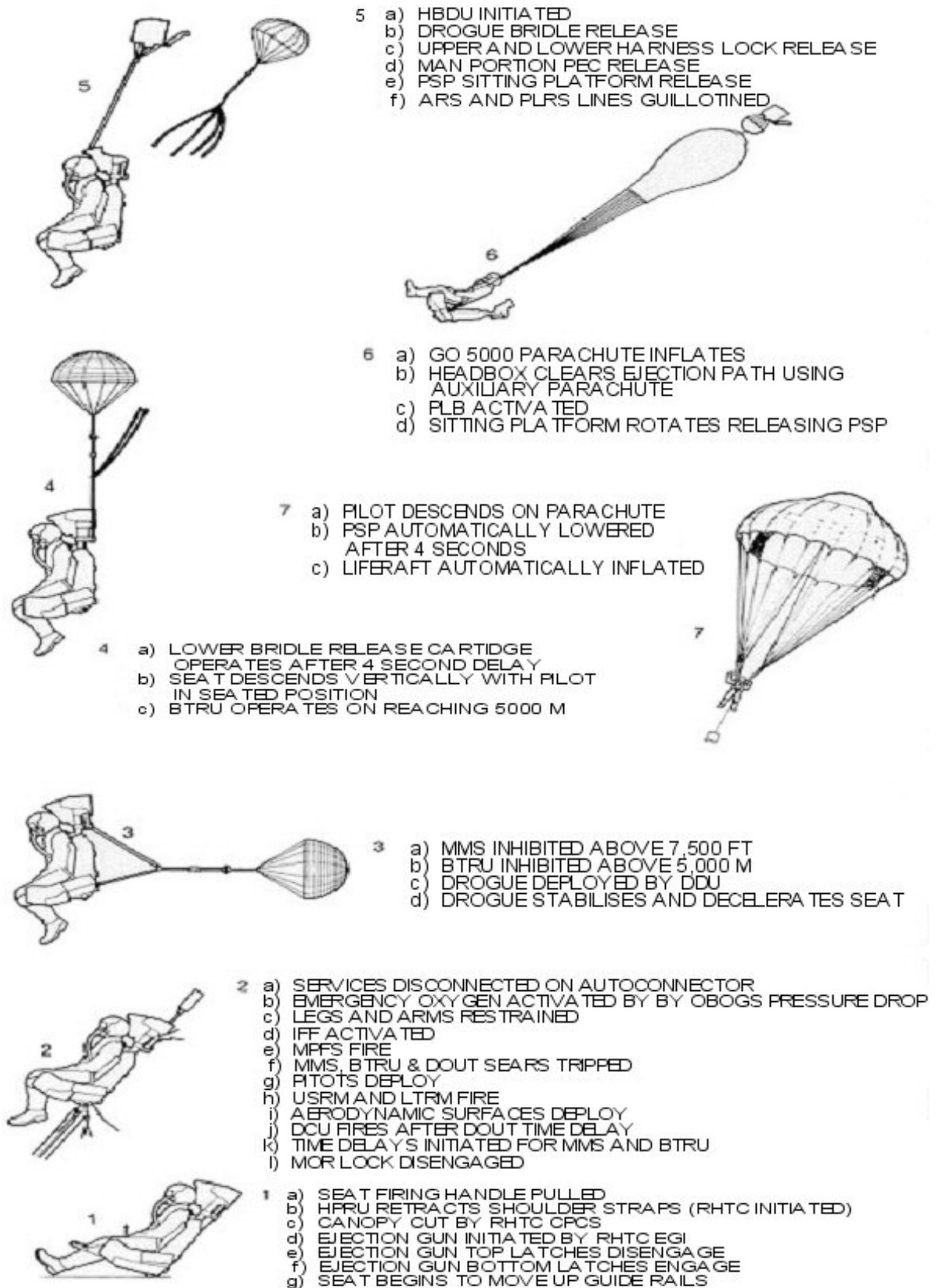


Abb. 7.4: Phasenablauf eines Rettungsausstiegs (Martin-Baker MK 16)

7.3.3 Leistungsgrenzen

Alle derzeit verwendeten Schleudersitzsysteme haben trotz der zuvor angesprochenen „0/0-Kapazität“ ihre Leistungsgrenzen. Folgende Faktoren begrenzen die Wirksamkeit jedes Systems:

- Technik (Rettungssystem)
- Psychologie (Besatzung)
- Physiologie (Besatzung)
- Flugparameter (Flughöhe und Fluggeschwindigkeit, Sinkgeschwindigkeit, Fluglage)
- Wetterverhältnisse (Hagelschlag, starke Winde usw.)

Analyse der o. g. Faktoren:

Technik:

Flugunfallstatistiken ist zu entnehmen, dass technisches Versagen bei Schleudersitzen äußerst selten ist. Die Sitze sind heute technisch ausgereift und zuverlässig, ihre Aktivierung ist einfach.

Psychologie:

Dieselben Statistiken zeigen, dass bei Abstürzen von Luftfahrzeugen in vielen Fällen gar kein Rettungsversuch eingeleitet wurde, bzw. die Aktivierung des Schleudersitzes zu spät, also außerhalb seines Leistungsbereichs, erfolgte. Bei der Antwort auf die Frage nach den Gründen ist man oft auf Vermutungen angewiesen. Im Folgenden seien einige mögliche Gründe genannt: In Not- und Stresssituationen, in denen der Pilot in sehr kurzer Zeit den aufgetretenen Luftnotfall analysieren und eine Entscheidung treffen muss, kann es zu Fehlentscheidungen kommen. Hier spielen die Überschätzung der eigenen Fähigkeiten sowie die Unterschätzung der Gefahrensituation („Situational Awareness“) eine wichtige Rolle. Der Flugzeugführer sollte also schon vor dem Flug auf jeden möglichen Notfall vorbereitet sein, um beim Eintritt desselben möglichst ohne Zeitverzug und richtig reagieren zu können.

Merke: Jeder Flug kann mit einem Rettungsausstieg enden!

Physiologie:

Der Belastbarkeit des menschlichen Körpers sind Grenzen gesetzt, die nicht überschritten werden dürfen. Ab Geschwindigkeiten von ca. 350 Kt bei Rettungsausstiegen nimmt das Verletzungsrisiko für den Piloten deutlich. Deshalb sollte vor dem Rettungsausstieg vom Piloten die Geschwindigkeit des Lfz nach Möglichkeit auf den sehr viel günstigeren Bereich unterhalb 300 Kt reduziert werden. Die Entwicklung geht jedoch dahin, Schleudersitze zu bauen, die durch aerodynamische Komponenten die auf den Piloten wirkenden Staudruckkräfte auf Werte unterhalb der physiologischen Belastungsgrenzen verringern. Dadurch erhöht sich die Fluggeschwindigkeit, bei der noch erfolgreiche Rettungsausstiege möglich sind.

Flugparameter:

Beim Rettungsausstieg in großer Höhe können Sauerstoffmangel, niedrige Temperaturen und der niedrige atmosphärische Druck dem menschlichen Körper zusetzen. Sauerstoffmangelproblemen wird durch eine Notsauerstoffversorgung im Sitz begegnet. Der Sitz fällt mit dem Piloten, stabilisiert durch einen, gegenüber dem Rettungsschirm sehr kleinen, Stabilisierungsschirm, rasch bis in eine Höhe, in der dem Piloten ein Überleben ohne zusätzliche Sauerstoffzufuhr möglich ist. Dann erst erfolgt, durch ein Signal des barometrischen Höhensensors eingeleitet, mit der Öffnung des Rettungsschirms die Sitz/Mann-Trennung und mit ihr die Trennung von der Notsauerstoffversorgung. Durch dieses Verfahren wird der Pilot gleichzeitig gegen die in großen Höhen herrschende Kälte geschützt. Der niedrige atmosphärische Druck hingegen kann die Druckfallkrankheit („Decompression Sickness“) verursachen. Ihre Symptome treten u. U. erst nach einiger Zeit auf, müssen dann jedoch sofort

behandelt werden (mögliche Gehirnschädigung) (siehe Kapitel 4.2. und 5.2). Die Fluglage hat ebenfalls auf den Erfolg eines Rettungsausstiegs großen Einfluss. So bringt z. B. ein Ausstieg mit 90 ° Querlage dem Piloten keinen Höhengewinn mehr. Hohe Sinkraten müssen frühzeitig erkannt werden, um die Rettung rechtzeitig einleiten zu können. Die besten Rettungsaussichten bestehen beim Ausstieg aus einem Lfz ohne Querlage und im Horizontalflug, noch besser in leichtem Steigflug. Mit zunehmender Höhe werden beim Rettungsausstieg zusätzliche Schutzmaßnahmen für den Piloten nötig, ohne die ein Überleben nicht möglich ist.

Wetterverhältnisse:

Auch meteorologische Faktoren stellen ein Risiko für einen sicheren Rettungsausstieg dar. Obwohl das Einfliegen in Gewitterfronten vermieden werden soll, lässt es sich nicht immer vermeiden. Bei einem Rettungsausstieg drohen dem Piloten auch bei korrekt funktionierendem Rettungssystem Gefahren durch Regen, Hagel, Blitzschlag, Kälte, sehr starke Turbulenzen, die zu Verletzungen oder sogar zum Tod führen können.

7.3.4 Rettungsausrüstung des Piloten

Neben der persönlichen Ausrüstung steht dem Kampfflugzeug-Piloten für besondere Einsatzfälle eine spezielle Überlebensausrüstung zur Verfügung, die Teil des Rettungssystems ist.

Persönliche Sonderausrüstung:

- Fliegerhelm
- Sauerstoff-Atemmaske
- Fliegerkombi, schwer brennbar
- Fliegerjacke
- Fliegerhandschuhe
- Unterwäsche (lang), schwer brennbar
- Fliegerstiefel, Sommer oder Winter
- Anti-G-Hose
- Druckweste

Sie unterstützt bei G-Belastung die Atmung der Besatzung moderner Hochleistungskampfflugzeuge durch Versorgung mit Atemgas unter zusätzlichem Druck, um deren physische Belastung und Ermüdung zu verringern.

Zur Überlebensausrüstung zählen:

- **Überlebensweste**
Sie dient bei Flügen über Land zur Aufnahme von Signalmitteln, Überlebensausrüstung und Notfunkgerät. Durch eine Leine ist mit ihr das Schlauchboot verbunden.
- **Fliegersonderbekleidung, Seenot**
Sie muss bei Flügen über See oder anderen großen Wasserflächen getragen werden, wenn die Wassertemperatur unter 15 °C liegt, und soll bei einer Fallschirm-landung im Wasser den Wärmeaustausch zwischen Körper und Wasser und damit eine Unterkühlung des Besatzungsmitglieds verzögern.

Sie setzt sich zusammen aus:

- Seenotanzug
- Thermoanzug
- **Fliegerschwimmweste** (ohnmachtsicher)
Sie wird bei Flügen über Wasser anstelle der Überlebensweste getragen und nimmt Signalmittel, Überlebensausrüstung und Notfunkgerät auf. Nach einer Wasserlandung hält sie den Luftfahrzeugführer über Wasser. Da sie bei Wasserberührung automatisch aufgeblasen wird und das Gesicht des Piloten über Wasser hält, bewahrt sie auch bewusste oder handlungsunfähige Piloten vor dem Ertrinken. Zusätzlich zur automatischen Fülleinrichtung verfügt sie über eine Vorrichtung zum Aufblasen mit dem Mund. Analog zur Überlebensweste verfügt sie über den Anschlussbeschlag für die Schlauchbootverbindungsleine.

7.4 Verwendete und weiterführende Literatur:

Payne, P. R. Spinal injury in the crash environment. In: Saczalski, K. (ed) Aircraft crashworthiness. Charlottesville, 1975

Brinkley, J. W. Acceleration exposure limits for escape advanced development. SAFE Journal 15 (2), 1985

8 Ophthalmologie

8.1 Einführung

Von allen Sinnesorganen, die der Mensch besitzt, ist das Auge für die Fliegerei das wichtigste. Es orientiert den Piloten über seine Lage zur Umgebung und im Raum, ermöglicht ihm die Navigation, das Erkennen von Hindernissen im Luftraum, das Erkennen und Abschätzen von Entfernungen, Höhen und Größen u.v.a. mehr. Diese visuellen Fähigkeiten garantieren dem Flugzeugführer jedoch nicht „von Hause aus“ deren optimale Nutzung. Er muss vielmehr die Grenzen seines Sehsinns kennen und auch, wie er diese durch Anwendung einer erlernbaren „Sehtechnik“ etwas hinausschieben kann.

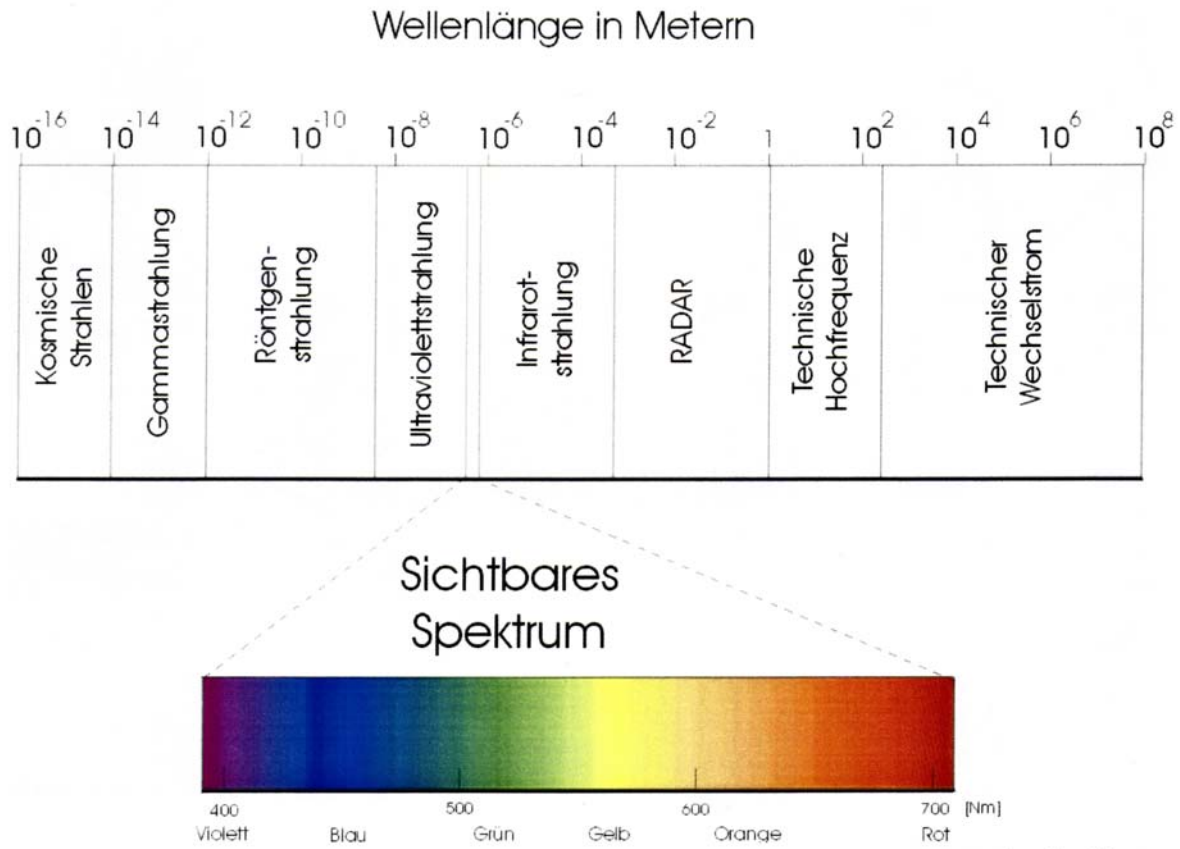


Abb. 8.1: Wellenlängenbereiche zu beiden Seiten des sichtbaren Spektrums (auch optisches Spektrum genannt): Ultrarot (früher Infrarot) und Ultraviolett. Die eine Grenze ist festgelegt durch den spektralen Empfindlichkeitsbereich des Auges, die andere durch Konvention.

Der Fliegerarzt soll neben dem anatomischen und dem pathophysiologischen Problembereich der Sehorgane auch etwas über den psychophysiologischen Aspekt des Sehvorgangs im Flugzeug wissen. Und dies nicht nur weil er in seiner Funktion in die Aufklärung des „Faktor Mensch“ bei Flugunfällen eingebunden ist. Gegebenheiten oder Veränderungen unserer Umwelt stellen für unsere Augen zunächst Reizmuster dar, die Empfindungen oder Eindrücke (z.B. der Helligkeit, Farbe, Bewegung) hervorrufen, welche dann erst im ZNS in sehr komplexer Weise zu einer „Wahrnehmung“ verarbeitet werden. Wir nehmen aber längst nicht alles wahr, was um uns herum geschieht. So ist unser Auge nur für die Aufnahme von elektromagnetischen Wellen im Bereich von ca. 400 - 700 nm (Abb. 8.1) entsprechend dem sichtbaren Bereich empfindlich. Infrarote oder ultraviolette Strahlen sehen wir (ohne technische Hilfsmittel) nicht. Ein Reiz muss auch einen bestimmten Schwellenwert überschreiten, um überhaupt eine Empfindung auszulösen.

Erfahrung, Wachheitsgrad und Aufmerksamkeitsverteilung sowie andere psychologische Variablen (Stress, Erregungsniveau etc.) spielen bei der optischen Wahrnehmung eine wichtige Rolle. Der Sehvorgang besteht also keineswegs nur aus einem physikalischen, d.h. optischen Vorgang, sondern aus einer Vielzahl biochemischer, psychophysiologischer Prozesse und Bedingungen, wobei die Reizverarbeitung im Gehirn (von dem das Auge entwicklungs-geschichtlich ein Bestandteil ist) eine zentrale Rolle spielt. Nur dieses Gesamtverständnis ermöglicht richtiges Handeln beim Fliegen, wenn Wahrnehmungsfehler oder Wahrnehmungstäuschungen auftreten.

8.2 Anatomie

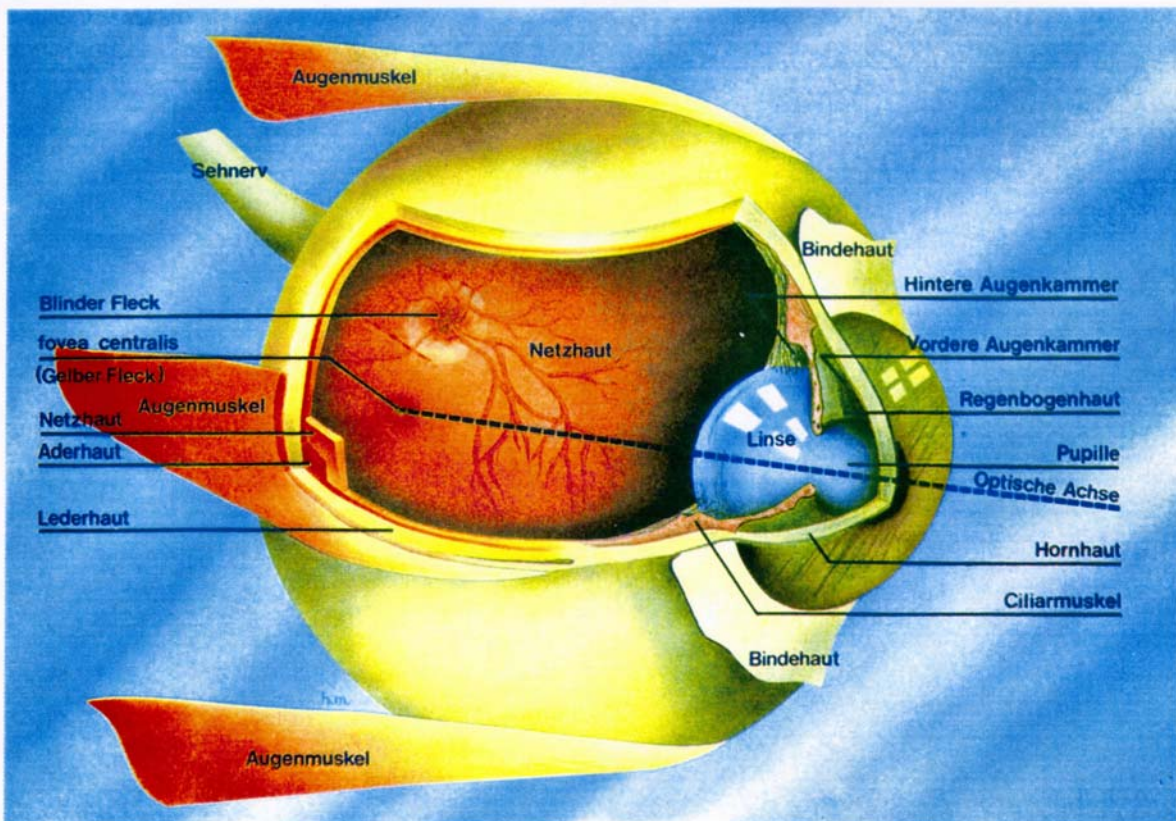


Abb. 8.2: Bau des Auges

Das Auge (Abb. 8.2) besteht aus drei Hüllen (Häuten), die den kugelförmigen Augapfel umschließen und aus drei Räumen, in die sich der Augapfel unterteilt. Jede Haut und jeder Raum hat jedoch eine sehr spezifische Funktion im Gesamtsystem:

Mehr als zwei Drittel des Augapfels füllt der Glaskörper aus. Er besteht aus einer gallertartigen Masse, die an der Netzhaut nur im Bereich des Sehnervenkopfes sowie peripher anheftet. Davor liegen, getrennt durch die Iris und verbunden durch die Pupille, die vordere und hintere Augenkammer. Beide sind mit dem Kammerwasser gefüllt. Der Augeninnendruck wird über Regulation von Produktion und Abfluss konstant gehalten, denn jede Druckerhöhung im Augeninnern schädigt langfristig die Sehnervenfasern, Photorezeptoren und Stoffwechselforgänge. Das Kammerwasser versorgt die Linse, die keine Gefäße und Nerven hat, mit Nährstoffen und Sauerstoff.

So wichtig wie die drei Räume des Auges sind auch die drei Häute, in die sich das Sinnesorgan unterteilt: Die Lederhaut (**Sklera**) ist die feste Hülle des Sinnesorgans. Sie fängt den

Innendruck auf und schützt den Augapfel vor Beschädigungen durch Stoß oder Schlag. Im vorderen Teil des Auges ist die klare und gefäßfreie Hornhaut (**Cornea**) einem Uhrglas vergleichbar in die Leder „eingelassen“. Die mittlere Augenhaut ist die mit Blutgefäßen gut durchzogene Aderhaut (**Choroidea**). Im vorderen Teil des Auges bildet sie die Regenbogenhaut (**Iris**), welche das kreisrunde Sehloch (**Pupille**) bildet. Die Menge des Lichteinfalls ergibt die Veränderung der sympathisch und parasymphatisch beeinflussten Pupillengröße. Neben der Engstellung bei hoher Lichtintensität und der Weitstellung bei geringer Beleuchtung reagiert die Pupille daher auch bei Schreck, Stress oder psychischer Erregung. Auch bei der Naheinstellungsreaktion beider Augen verengen sich die Pupillen reflektorisch. Die zirkulär angeordneten **Ciliarmuskeln** verändern gemeinsam mit dem Aufhängeapparat (Zonulafasern) die Form und damit die Brechkraft der **Linse**. So wird eine Entfernungseinstellung des Auges ermöglicht.

Die dritte Haut, die Netzhaut (**Retina**) kleidet das Auge von innen aus. Sie enthält die lichtempfindlichen Nervenzellen (**Photorezeptoren: Zapfen und Stäbchen**), von denen die Nervenfasern ausgehen, die am Sehnervenkopf (**Papille**), der den funktionell „Blinden Fleck“ bildet, aus dem Augapfel durch die Lederhaut austreten und im weiteren Verlauf den **N. opticus** bilden. Der Aufbau der Netzhaut ist äußerst kompliziert; sie setzt sich aus 9 Schichten zusammen (s. Abb. 8.3). Die lichtempfindlichen **Zapfen** (ca. **6 Mio**) und **Stäbchen** (ca. **120 Mio**) reichen mit ihren Enden in das ganz außen gelegene für Versorgung und Abtransport zuständige Pigmentepithel. Nach innen, zum Glaskörper hin folgen Zellen unterschiedlicher Funktion, die sich im weiteren Verlauf zu den ableitenden Nervenfasern vereinigen.

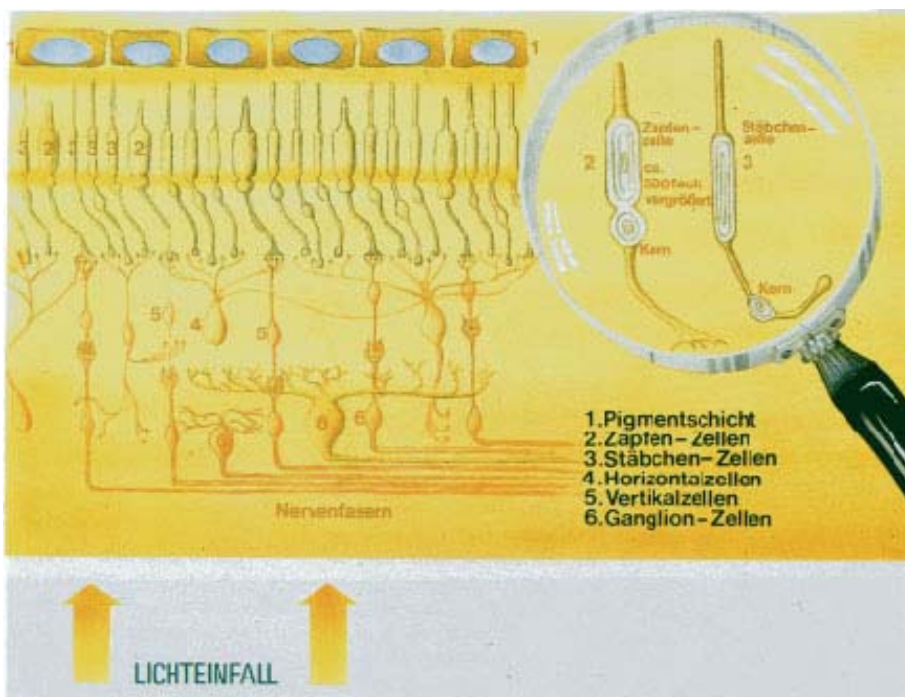


Abb. 8.3: Histologie und Funktion der Netzhautschichten

Das in das Auge eintretende Licht muss also erst die im physiologischen Zustand durchsichtige Schicht der Netzhaut passieren, bevor es die Sinneszellen erreicht (invertierter Aufbau). Im Mittelpunkt des Augenhintergrundes weist die Netzhaut eine geringe Einbuchtung auf, die **Fovea centralis** (= Zentralgrube) mit der sie umgebenden **Macula**, welche aufgrund ihrer hohen Anzahl an nur gering

lichtempfindlichen Zapfen die Stelle des schärfsten Sehens bei Tage ist. Hier wird der auf der „optischen Achse“ fixierte Gegenstand abgebildet.

Die Netzhautperipherie enthält vorwiegend weniger dicht liegende Stäbchen, nicht farbtäuglich, aber sehr lichtempfindlich. Mit ihrer Hilfe erfolgt das periphere Sehen und das (farblose) Dämmerungs- bzw. Nachtsehen (s. Hell-Dunkel-Anpassung). Dies erklärt den Ausspruch: „Bei Nacht sind alle Katzen grau.“ Die Lichtempfindlichkeit hängt von Sehfärbstoffen ab (z.B.

Rhodopsin), die in den lichtempfindlichen Zellen eingelagert sind. Fällt Licht auf die Retina, erfährt das Rhodopsin eine chemische Umwandlung; die Empfindlichkeit sinkt. Mit zunehmender Dunkelheit wird das Sehpurpur wieder aufgebaut, die Lichtempfindlichkeit steigt (Dunkeladaptation). Rhodopsin ist dem Vitamin A verwandt. So ist u.a. bei Vitamin A-Mangel die Dunkeladaptation vermindert. Im Extremfall spricht man von „Nachtblindheit“, welche im Gegensatz zu hereditären Formen beim reinen Vitamin A-Mangel reversibel ist.

8.3 Flugmedizinische Besonderheiten

8.3.1 Tagsehteknik – Scanning-Technik

Beim Tagsehen werden die optischen Achsen der Augen auf den zu betrachtenden Gegenstand gerichtet, es wird fixiert. Hierdurch erfolgt die Abbildung des Objektes immer im Zentrum der Netzhaut auf der Stelle des schärfsten Sehens. Das Objekt darf dabei nicht weiter als ca. fünf Grad außerhalb der Blickrichtung liegen. Nur innerhalb dieses Bereiches können Formen klar erkannt werden. Außerhalb davon werden überwiegend nur noch Bewegungen wahrgenommen (s. Abb. 8.4). Der maximal mögliche Visus 10° außerhalb der Fovea beträgt 0,1 (10%).

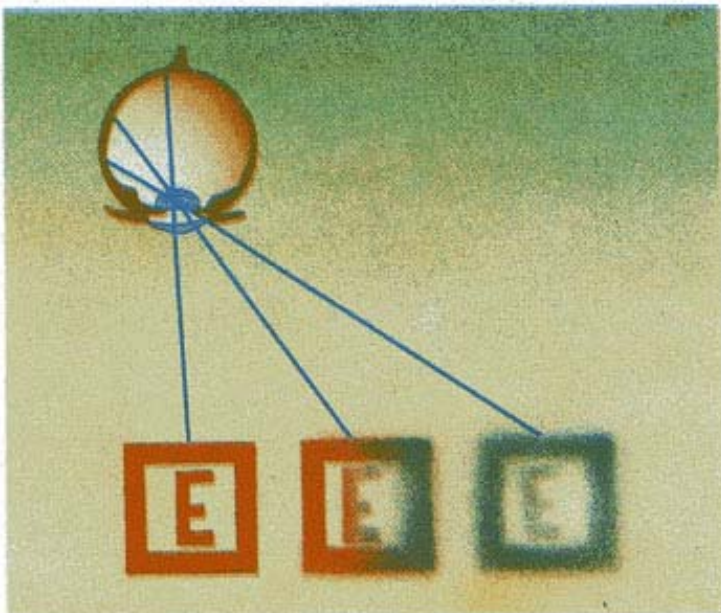


Abb. 8.4: Nur innerhalb dieses Bereiches können Formen klar erkannt werden. Außerhalb davon werden überwiegend nur noch Bewegungen wahrgenommen

Um z.B. den Himmel nach anderen Flugzeugen abzusuchen, müssen also jeweils im Abstand von höchstens fünf Grad sich überlappende Sektoren aneinandergereiht werden, wobei jeder Sektor für jeweils mindestens eine Sekunde fixiert werden muss. Beim Sichtflug sollte so wenig wie möglich in das Cockpit gesehen werden, weil sich das Auge dabei auf die dann veränderten Sehdistanzen einstellen (Akkommodation) muss und so zwangsläufig die Luftraumbeobachtung vernachlässigt und verzögert wird.

Eine optimale Tagsehteknik wird negativ beeinflusst durch

- Stress, d.h. zu hohe Arbeitsbelastung im Cockpit (mental workload) oder
- Ermüdung oder
- ein schlechtes Cockpit Layout oder
- physiologische Mängel (Sauerstoffmangel, Beschleunigungen etc.)

Wird diese **Scanning-Technik**, d.h. die bewusste Nutzung des zentralen Sehens, nicht angewendet, fixiert das Auge bei konturlosem Gesichtsfeld unbewusst knapp außerhalb der Grenze der Cockpitscheibe.

Jeder Flugschüler sieht zu Beginn seiner Ausbildung, weil er diese Technik noch nicht beherrscht, oder weil er durch die fliegerische Aufgabe zu sehr beansprucht ist, beim Absuchen des Luftraums bedeutend weniger Flugzeuge als sein Fluglehrer.

8.3.2 Nachtsehtechnik – Exzentrische Fixation

Bei Nacht hilft das Fixieren von sehr schwach beleuchteten Objekten wegen der fehlenden Zapfenfunktion wenig. Im Gegenteil: beim Versuch, diese zentral zu sehen, verschwinden diese erst recht. Im Dunkeln muss daher der Blick schweifen. Die Abbildung der Objekte muß auf der peripheren Netzhaut erfolgen, d.h. die Blickrichtung muss bewusst um etwa 10 - 15° am Objekt vorbeigeführt werden, um es (wieder) zu sehen. Diese Sehtechnik wird als **exzentrische Fixation** bezeichnet, bei der eine starre Blickrichtung vermieden werden muss.

8.3.3 Die Hell-Dunkel-Anpassung

Das Anpassungsvermögen des Auges an stark wechselnde Leuchtdichteverhältnisse der Umgebung (Adaptation) beruht auf besonderen photochemischen Eigenschaften des Sehpurpurs im Stäbchenapparat der Netzhaut und wird durch die Funktion der Pupille als Blende unterstützt. Die Anpassung an sehr helles Licht (Helladaptation) erfolgt nach anfänglicher Blendung (s.u.) ziemlich rasch und geht mit einer Herabsetzung der Lichtempfindlichkeit der Netzhaut einher. Die Gewöhnung an eine stark herabgesetzte Leuchtdichte (Dunkeladaptation) erfolgt langsamer und wird nur während der ersten Minuten durch Empfindlichkeitssteigerung der Zapfen der Netzhautmitte, danach ausschließlich durch den Stäbchenapparat der peripheren Abschnitte der Retina bewirkt, dessen Sehpurpur sich bei Dunkelheit allmählich regeneriert. Die Dunkeladaptation erfolgt innerhalb der ersten 15 Minuten ziemlich schnell und von da an nur noch langsam, um nach 45 bis 60

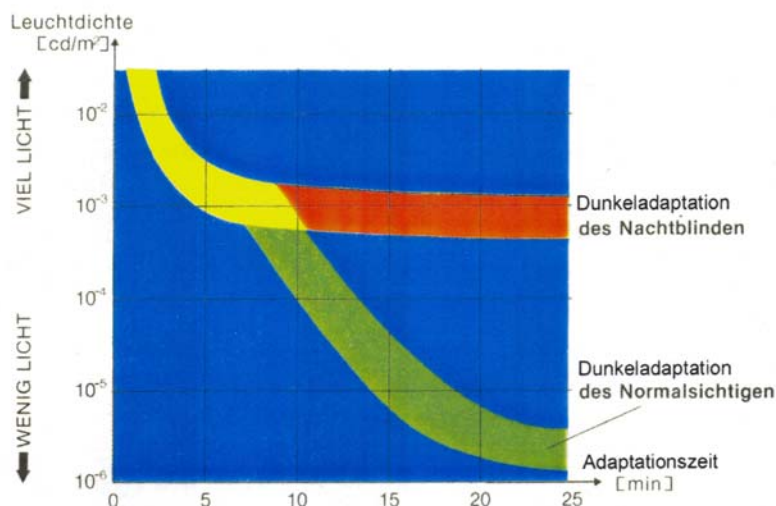


Abb. 8.5: Dunkeladaptation

Minuten ihr Maximum zu erreichen (Abb. 8.5). Das Dämmerungs- oder Stäbchensehen ist durch starke Herabsetzung der zentralen Sehschärfe und fehlendes Farbumterscheidungsvermögen gekennzeichnet.

8.3.4 Blendung

Betrifft ein dunkeladaptierter Mensch einen hellerleuchteten Raum so passt sich das Sehsystem innerhalb weniger Sekunden an die höhere Lichtdichte an. Geschieht dieser Vorgang der starken Belichtung der Netzhaut plötzlich spricht man von Blendung. Beim Dunkeladaptierten geht die Dunkeladaptation dabei schnell verloren. Sie muss in Abhängigkeit von Stärke und Dauer der Blendung wiederum langsam erworben werden. Die Dunkeladaptation geht aber für jedes Auge getrennt vor sich. So kann durch Schließen eines Auges wenigstens dieses Auge vor dem Verlust der Dunkeladaptation geschützt werden. Bei Blendungen

während des Fluges (Blitze bei Gewitter) sollte der Blick daher in das Cockpitinnere gerichtet bleiben und die Beleuchtung hochgedreht werden.

8.3.5 Sauerstoffmangel

Die Stäbchen sind gegenüber dem mit der Höhe zunehmenden Sauerstoffmangel ganz besonders empfindlich. Deshalb ist mit einer Beeinträchtigung des Nachtsehvermögens bereits in einer Kabinenhöhe von 5000 ft zu rechnen (Abb. 8.6), also erheblich vor Eintritt anderer Sauerstoffmangelercheinungen, wie z.B. der Auswirkung auf das Tagsehvermögen, in Form einer Sehunschärfe (grey out) und/oder der Einengung des Gesichtsfeldes („tunnel vision“).

Auch die Schadstoffe im Tabak besitzen einen lähmenden Einfluss auf Lichtempfindlichkeit und auf die Weiterleitung der von der Netzhaut kommenden Reize und damit eine das Nachtsehvermögen negativ beeinträchtigende Wirkung.

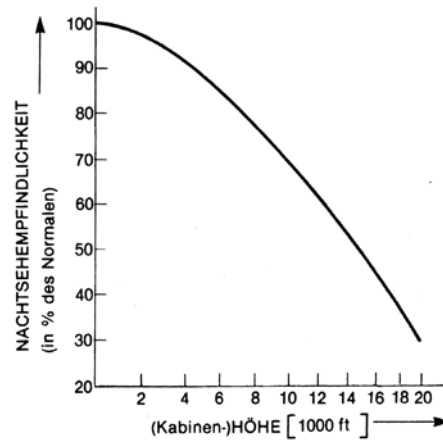


Abb. 8.6: Nachtsehempfindlichkeit bei zunehmender Höhe

8.3.6 Räumliches Sehen

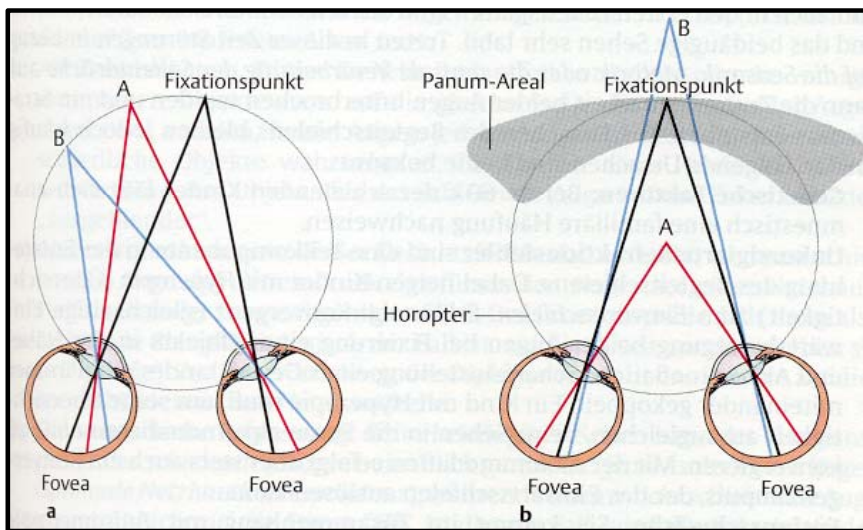


Abb. 8.7: a) Geometrischer Horopter b) Physiologischer Horopter

Der Mensch sieht binokular, d.h. beidäugig. Ein abwechselnd ein- oder beidäugig gesehener Gegenstand erscheint uns im Wesentlichen als derselbe, jedoch erhöht sich beim binokularen Sehen im Vergleich zum monokularen Sehen der räumliche Tiefeneindruck. Da die Augen etwa sechs bis sieben cm nebeneinander stehen, wird die Umgebung, die nicht

fixiert wird und außerhalb eines Kreises, dem sog. Horopterkreis (= Sehkreis) liegt, bei dem alle Punkte auf korrespondierenden, netzhautidentischen Arealen des anderen Auges abgebildet wird, auf nicht identischen Netzhautanteilen abgebildet (s. Abb. 8.7). Diese Gegebenheit ist die Grundlage des räumlichen Sehens und wird als Querdisparation bezeichnet. Die Tiefenwahrnehmung wird dabei umso schlechter, je weiter entfernt der beobachtete Gegenstand sich befindet. Die Grenze liegt unter 150 m und lässt sich nur durch eine Vergrößerung des Augenabstandes, z.B. durch Verwendung eines Feldstechers oder Scherenfernrohres auf mehrere hundert Meter hinauschieben. Dennoch können größere Entfernungen, wie z.B. beim Landeanflug oder bei der Luftraumbeobachtung gegeben, geschätzt werden. Wichtige Faktoren sind dabei:

8.3.6.1 Die scheinbare Objektgröße

Entfernte Gegenstände sehen kleiner aus als nahe. Man muss aber die tatsächliche Größe des Gegenstandes kennen, um ihn in eine Größenkategorie einordnen und identifizieren zu können. So kommen oft Irrtümer über die Größe eines entgegenkommenden Flugzeugs vor, wenn der Flugzeugtyp nicht ausgemacht werden kann oder verwechselt wird. Analog dazu treten Verschätzungen in der Entfernung auf. Dabei kommt es besonders auf den Blickwinkel an, in dem ein Gegenstand aufgefasst wird (Abb. 8.8 a/b).

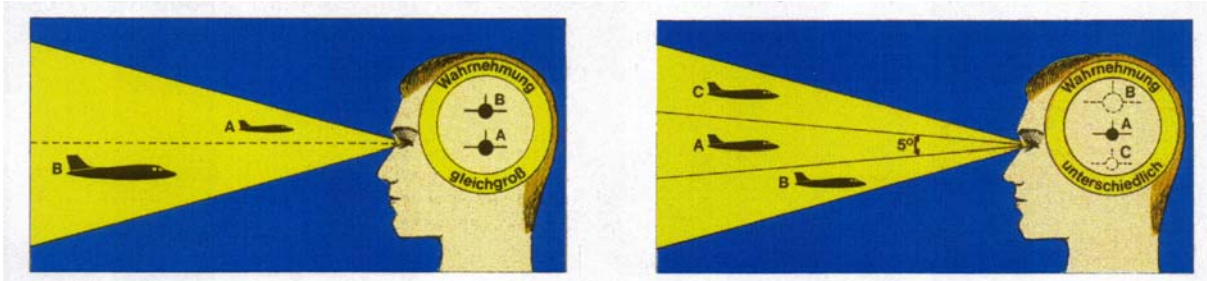


Abb. 8.8: Objekterfassung in Abhängigkeit vom Blickwinkel

Es kann sogar vorkommen, dass der Flugzeugführer eine Fliege hinter der Windschutzscheibe oder einen kleinen Fleck auf der Scheibe als weit entferntes Flugzeug ansieht.

8.3.6.2 Relative Bewegung

Unabhängig davon, ob man sich selbst bei feststehender Umgebung bewegt oder bei eigenem festen Standort sich Gegenstände der Umgebung bewegen, scheinen sich weiter entfernte Objekte langsamer zu bewegen als in der Nähe befindliche. Bei gleichzeitiger Bewegung (von Betrachter und Objekt) gibt es leicht Fehlschlüsse über Richtung und Größe der Bewegung.

8.3.6.3 Höhenlage

Nahe gelegene Gegenstände scheinen tiefer zu liegen bzw. sich zu befinden als entferntere.

8.3.6.4 Bekannte Objekte im Gesichtsfeld

Am besten lassen sich Entfernungen schätzen, wenn sich auf dem Flugweg Objekte befinden, die in ihrer Größe bekannt sind. Liegt ein konturloses Gesichtsfeld vor, wie beim Flug über See oder schneebedeckter Landschaft, schätzt man Entfernungen meist zu kurz ein („empty space myopia“). Das trifft auch für die Einschätzung der Objektgröße unter diesen Bedingungen zu. So erscheint z.B. der Mond hoch über uns (ohne Referenzen) kleiner als der Mond direkt über dem Horizont.

8.3.6.5 Licht und Schatten

Kontrastreiche Umgebung erleichtert das Erkennen der Lage im Raum.

8.3.6.6 Verdeckung

Ein Gegenstand, der einen anderen teilweise verdeckt, wird als näher erkannt.

8.3.6.7 Dunst und Nebel

Starker Dunst oder Nebel, sowie andere Sichteintrübungen durch Rauch oder sonstige Luftverunreinigungen führen dazu, dass Gegenstände entfernter erscheinen als sie tatsächlich sind. Dies kann zu einer gefährlichen Fehleinschätzung von Hindernisentfernungen führen. Umgekehrt scheinen bei sehr klarer Luft Objekte näher zu liegen als es tatsächlich der Fall ist. Das stellt zumeist keine Gefahr dar. Zusammenfassend sind für den Flugzeugführer Anflüge bei Nacht und unter Sichteintrübung in Verbindung mit fehlender oder unzureichender Landeilfeausstattung am kritischsten. Schätzfehler sind hier quasi „vorprogrammiert“.

8.3.7 Optische Täuschungen

Obwohl das Auge die verlässlichsten Informationen zur Orientierung über die Lage im Raum liefert, kann es bei fehlendem Bezugssystem, vor allem bei nicht mehr sichtbarem Horizont, Täuschungen unterworfen sein. Ob sich ein Flugzeugführer jedoch täuschen lässt, hängt vor allem von seiner Erfahrung (Elerntes, Erkanntes, Erlebtes) ab. Weil sich die Bedingungen in der Fliegerei ständig ändern (Flugplätze, Beleuchtung, Topographie, Wetter u.v.a.m.), muss der Pilot ständig lernbereit bleiben und nicht nur aus der eigenen, sondern gerade auch aus den Erfahrungen und Fehlern anderer lernen.

Häufig auftretende optische Täuschungen seien nachfolgend dargestellt:

8.3.7.1 Scheinhorizonte

Wird das Luftfahrzeug nach der fälschlicherweise als Horizont gedeuteten schrägen Wolken- grenze ausgerichtet, so entsteht der trügerische Eindruck einer Horizontallage, obwohl in Wirklichkeit eine Querlage vorliegt. Verläuft der Flugweg in Richtung auf eine aufsteigende oder abfallende Wolkenschicht, kann unbewusst ein Steig- oder Sinkflug eingeleitet werden.

8.3.7.2 Nicht abgrenzbarer Horizont

Bei Dämmerung und Dunkelheit ist oft die Abgrenzung des Horizontes zum Himmel nicht möglich. Dies ist sowohl über Land als auch über See der Fall, vor allem wenn ein bedeckter grauer Himmel sich wenig vom Land abhebt. Schon bei klarem Nachthimmel kommt es sehr leicht zu Verwechslungen von Lichtern mit Sternen. Der Flugzeugführer ist von einem dunklen Raum mit Lichtpunkten umgeben, die er nicht ohne weiteres zuordnen kann. Dabei kann eine Konfusion über die Lage im Raum entstehen.

8.3.7.3 Reflexionen

Erschwerend für die Lageorientierung wirken sich oft Lichtreflexe und Spiegelungen im Glas des Kabinendachs aus. Als Ursache dafür kommen Lichtquellen von außen, aber auch von innen (Instrumentenbeleuchtung) in Frage.

So können beim Flug in den Wolken oder im Nebel eingeschaltete Kollisionswarnlichter (blitzende Lichtquellen), wegen der Reflexionserscheinungen sogar eine räumliche Desorientierung auslösen. Reflexionen der Luft- oder Rotorschrauben führen manchmal - insbesondere bei längerer Fixierung - zu räumlicher Desorientierung oder gar Übelkeit. Diese Erscheinung nennt man auch „Flicker Vertigo“.

8.3.7.4 Autokinese

Wird ein einzelnes Licht im Dunkeln, also ohne weitere Bezugspunkte beobachtet oder fixiert, so scheint es sich zu bewegen, es wandert nach allen Richtungen scheinbar aus. Die Ursache dieses autokinetischen Phänomens ist nicht hinreichend bekannt. Man nimmt an, dass dabei wechselnde Vorspannungszustände der Augenmuskulatur eine große Rolle spielen. Die Gefahr einer Täuschung durch diese Erscheinung verringert sich mit zunehmender Helligkeit und Größe der Lichtquelle. Sind weitere Lichtquellen vorhanden, tritt der Effekt nicht ein. Eine wirksame Gegenmaßnahme ist es daher, Referenzpunkte, z.B. die Begrenzung der Cockpitscheibe zu suchen. Dadurch lässt sich eine Scheinbewegung leicht von einer tatsächlichen Bewegung unterscheiden.

8.3.7.5 Der Einfluss von Lichtintensität und Farbe

Veränderungen der Lichtintensität einer Lichtquelle (z.B. wenn Lichtquellen am Himmel oder am Boden durch Lufttrübungen in ihrer Helligkeit schwanken) werden fälschlich leicht als Bewegung der Lichtquelle interpretiert: Zunahme wird als Annäherung, Abnahme als eine sich entfernende Lichtquelle empfunden. Blaues Licht wird heller wahrgenommen als rotes Licht. Bei einfarbiger Raumbelichtung (z.B. in rotem Licht) werden Gegenstände der glei-

chen Farbe als heller und größer empfunden als Gegenstände anderer Farben. Zur Erhaltung der Dunkeladaptation wird häufig rotes Bordlicht und rote Instrumentenbeleuchtung verwendet.

8.3.8 Schätzfehler beim Landeanflug

Viele Flugunfälle und Flugzwischenfälle in der Allgemeinen Luftfahrt passieren im End- oder Landeanflug bzw. beim Ausrollen auf der Piste. Dabei spielen Schätzfehler bei der Höhenschätzung über Grund, der Entfernung von der Schwelle und der Näherungsgeschwindigkeit an den Boden (Sinkrate) eine bedeutende Rolle.

Die Abschätzung der Länge und Breite einer Landebahn hängt von der Entfernung und der Höhe ab, aus der sie gesehen wird. Beide Größen bestimmen den Sichtwinkel α in Abb. 8.9 der sich beim Anflug (bei Verringerung der Entfernung und Höhe) zunehmend verkleinert. Aus diesen Werten errechnet das ZNS des Piloten beim Anflug nach Sicht und aufgrund gespeicherter Erfahrungswerte z.B. die richtige Sinkrate. Dieses Schätzverfahren ist allerdings nur dann erfolgversprechend, wenn der Pilot die Abmessungen der gewählten Landebahn kennt.

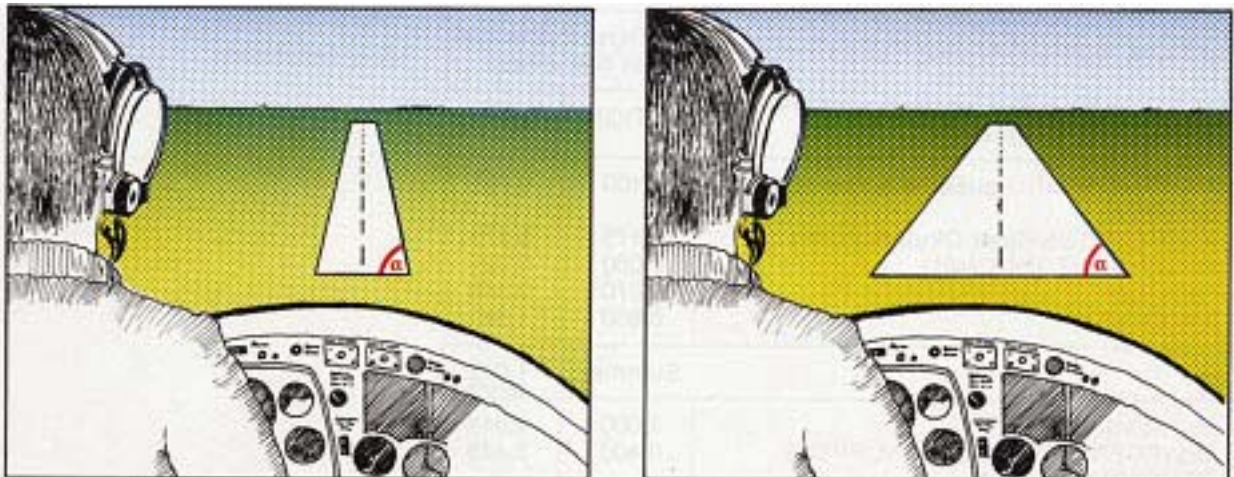


Abb. 8.9: Schätzfehler beim Landeanflug

Die Landebahn 25 in Abb. 8.10 wird nämlich genauso groß gesehen wie die Landebahn 09, obwohl diese doppelt so lang und breit ist. Wenn der Pilot letzteres weiß, kann er den richtigen Schluss ziehen, dass er sich nämlich doppelt so hoch befindet.

Wegen des nicht mehr ausreichenden räumlichen Sehvermögens bei diesen Entfernungen kann die Sinkrate, wenn

optische Landehilfen fehlen, oft erst richtig erkannt werden, wenn (vertraute) Bodenstrukturen (Runwaybelag/ Gras etc.) wahrgenommen werden. Bei einer unbekanntem Startbahn mit dunklem Belag überschätzt sich der Pilot oft dahingehend, dass er zu spät (d.h. zu tief) ab-

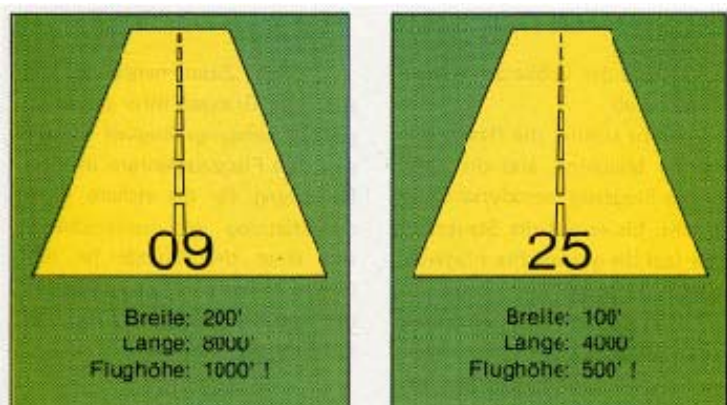


Abb. 8.10: Täuschung beim Einschätzen der Landebahn

fängt und umgekehrt bei hellem Belag (Beton) wird er eher zu früh (hoch) abfangen. Der Grund: Das im ZNS gespeicherte „Bildverarbeitungsprogramm“ lässt helle Objekte zunächst als näher und dunkle als weiter entfernt erscheinen. Erst ein (erlerntes) „Korrekturprogramm“ gleicht diesen Schätzfehler aus. Weitere Schätzfehler können sich einstellen, wenn entweder die Landebahn selbst oder das Gelände davor abfallend oder ansteigend ist - oder beides zugleich. Optische Täuschungen und Schätzfehler liegen in der Natur des Sehens. Der Flugzeugführer muss sie deshalb kennen und alle ihm zur Verfügung stehenden Hilfsmittel nutzen (VASI-System, Instrumentenanflug, Radarhilfe etc.).

8.3.9 Latenzzeiten beim Sehvorgang

Mit zunehmenden Geschwindigkeiten, mit denen Flugzeuge sich bewegen, spielen die Zeitspannen, innerhalb derer der komplexe Wahrnehmungsprozeß abläuft, eine immer größere Rolle: die Reaktion des Piloten auf eine vielleicht noch erkannte Bedrohung könnte zu spät einsetzen. In Abb. 8.11 sind die verstrichenen Zeiten vom ersten Sichtkontakt eines Objektes außerhalb des zentralen Sehfeldes bis zur durchgeführten Änderung des Flugweges.

Aktion: Luftraumbeobachtung (skysearch)	Mittlerer Zeitbedarf [sec]	
	Aktion	Total
Ein Hindernis (z.B. Flugzeug) wird erkannt, der Kollision ausgewichen.		
Wahrnehmung außerhalb des zentralen Sehfeldes	0,100	0,100
Vorbereitung der Okulomotorik	0,175	0,275
Augenbewegung 40°	0,050	0,325
Fixieren	0,070	0,395
Erkennen	0,650	1,045
Summe		1,045
Entscheiden	2,000	3,045
Bewegen des Steuerknüppels Control	0,400	3,445
Ausweichbewegung des Flugzeugs bis zur Flugwegänderung	2,000	5,445
Summe		5,445

Abb. 8.11: Zeit vom Erkennen des Hindernisses bis zum Ausweichmanöver

Die Zeiten von der Wahrnehmung bis zum Erkennen der Situation hängen von der Komplexität des Signals (Größe, Helligkeit, Bewegung) ab. Bevor eine Entscheidung getroffen wird, muss das Signalmuster interpretiert werden. Die Entscheidungszeit hängt von der Komplexität der Gesamtsituation ab. Sie steigt proportional zur Anzahl der Handlungsalternativen an. Hinzu kommen individualspezifische Gegebenheiten des Piloten: Erfahrung, Kondition („lange Leitung“) u.a.. Die sich aus den einzelnen Zeiten ergebenden Flugwege hängen von der Geschwindigkeit ab. Diese ergibt sich als Relativ-Geschwindigkeit: Die Geschwindigkeit eines auf den Beobachter zufliegenden Flugzeugs addiert sich zu seiner Eigengeschwindigkeit.

Als Faustregel gilt für die zurückgelegten Wegstrecken (in m) bis zum

- ERKENNEN:

$$\frac{\text{Geschwindigkeit (in Kts)}}{2}$$

- AUSWEICHEN:

$$\frac{\text{Kts} \times 5}{2}$$

Diese Zusammenhänge wie auch die Grenzen ihrer physiologischen Leistungsfähigkeit werden von den Flugzeugführern in ihrer Bedeutung für die sichere Flugdurchführung oft unterschätzt, was einer der Gründe für den hohen Anteil von Flugunfällen in der Anflugphase und bei der Landung sein könnte.

8.3.10 Fliegen mit Bildverstärker-(BiV-)Brille

Die natürliche Nachtsehfähigkeit des menschlichen Auges setzt dem fliegerischen Einsatz Grenzen. Um den Einsatzwert eines Luftfahrzeuges möglichst auch bei Nacht zu erhalten,

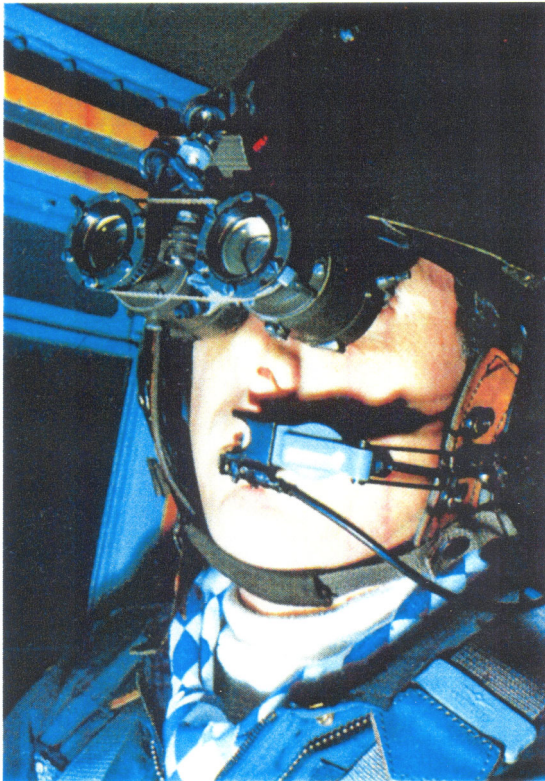


Abb. 8.12: Bildverstärker (BiV) -Brille

muss sich der Pilot spezieller technischer Hilfsmittel bedienen, wie z.B. der BiV-Brille (s. Abb. 8.12). Dieses Gerät ähnelt einem Theaterglas und ist vor den Augen am Helm befestigt. Der BiV-Brille liegt eine elektronisch arbeitende Lichtverstärkung (Fotomultiplier) zu Grunde. Die auch in dunklen Nächten meist noch vorhandene Restlichtmenge wird dabei um den Faktor 100.000 und darüber verstärkt. Kernstück dieses passiven Nachtsehgerätes ist ein Bildverstärker, der das einfallende Restlicht im Sehbereich des menschlichen Auges verstärkt in einem grünen Bild über zwei Okulare (monochromatisch/binokular) wiedergibt. Die technische Grenze liegt derzeit in der III. Generation bei 0,5 Millilux Restlicht. Das bedeutet, dass ca. 70 % aller Nächte für den Nachttiefflug im Hubschrauber mit der BiV-Brille genutzt werden können.

Der Vorteil einer BiV-Brille liegt darin, dass in einem Tiefflugeinsatzprofil (wird derzeit nur von der Heeresfliegertruppe durchgeführt)

Hindernisse gesehen werden können, die mit dem „unbewaffneten“ Auge nicht mehr sichtbar wären.

Den Vorteilen stehen jedoch auch Nachteile und Grenzen gegenüber:

- Die BiV-Brille wird auch als „Hellsichtgerät“ bezeichnet. Das grünliche Bild regt wie beim Tagsehen die photopischen Stäbchen an. Dies bedeutet, dass beim Übergang vom BiV-Flug in den herkömmlichen Nachtflug erst wieder eine vollständige Dunkeladaptation erreicht werden muss.
- Außerdem begrenzt die Brille das Gesichtsfeld auf ca. 45°, d.h. es kommt zu einem weitgehenden Verlust des peripheren Gesichtsfelds und somit erheblicher Beeinträchtigung der räumlichen Orientierung.
- Durch das optische Auflösungsvermögen des Gerätes kommt es zu einer herabgesetzten Sehschärfe. Freileitungen z.B. können als gefährliche Hindernisse mit der BiV-Brille nur sehr selten gesehen werden. Bei Niederschlägen wird das Bild stark körnig. Grob abgeschätzt kann man sagen, dass beim Flug mit der BiV-Brille die Sehschärfe auf ca. 45% reduziert ist.

- Verlust der räumlichen Wahrnehmung: Obwohl das Bild über zwei getrennte Okulare gesehen wird, entsteht kein stereoskopisches Bild. Die Bildwahrnehmung ist daher wie bei einem Bildschirm „flächig“. Schätzfehler für Entfernungen (z.B. beim Hovern) sind somit leicht möglich.
- Verlust aller farblichen Kontraste durch das monochromatische grüne Bild.
- Schwierigkeit der schnellen Anpassung zwischen Fernsicht und Nahsicht.
- Plötzliches Nachlassen der Sehleistung, wenn bei starkem Lichteinfall von außen die Brille automatisch abdunkelt. Hubschraubercockpits, die für den Nachtflugeinsatz mit BiV-Brille verwendet werden, sind daher besonders umgerüstet, um Reflexe und Spitzlichter von Instrumenten aus dem Cockpit zu vermeiden.
- Das Gewicht der BiV-Brille (etwa 1 kg) in Verbindung mit dem Fliegerhelm führt bei Schwingungen und Vibrationen im Hubschrauber zu einer erhöhten Anspannung der Hals-, Nacken- und Schultermuskulatur, zur vermehrten Belastung der HWS, u.U. auch zu Schädeldruckgefühl nach längerem Tragen.

Aus diesen systembedingten Merkmalen ergibt sich unschwer, dass die Benutzung der BiV-Brille bei Nachtflugeinsätzen Bedingungen schafft, die erheblich von „normalen“ (Tag-) Flugbedingungen abweichen. Die veränderte, „verfremdete“ Darstellung der visuellen Umwelt zwingt den Hubschrauberführer ständig zu einer Art Bildvervollständigung, zu einer geistigen Synthesearbeit im ständigen Kampf um ein stabiles „visuelles Bezugsfeld“, also ohne jede „Verschnaufpause“. Dies hat ein erhöhtes vegetatives Erregungsniveau zur Folge, welches auch nach Beendigung des Flugauftrages nur langsam abklingt.

Zu den Besonderheiten der BiV-Fliegerei gehört auch, dass bei abnehmenden Sichtbedingungen der BiV-Tiefflieger noch tiefer und dichter an das Hindernis herangeht, um es besser erkennen zu können. Damit gerät er in einen Konflikt zwischen besserer Sicht einerseits und größerem Flugsicherheitsrisiko andererseits. Eine terrestrische Navigation ist nur über hinderniserkundetem Gelände möglich: Der Hubschrauberführer, der nachts mit BiV-Brille fliegt, muss sein Gelände sehr gut kennen, die Flugroute fast „auswendig“ gelernt haben. Ein nicht zu unterschätzender Stressor ist der Erfolgszwang, dass trotz aller Einschränkungen durch die Brille selbst, der Nachtiefflug mit Hubschraubern uneingeschränkt durchführbar sein soll. Das gleiche gilt für das Bewusstsein, dass ein Abweichen von der erkundeten Strecke zu einem schweren Unfall, z.B. durch Einflug in Freileitungen führen kann. Zu erwähnen ist auch, dass das erforderliche Koordinierungsgespräch zwischen beiden Piloten während der gesamten Flugdauer nicht nur dem ständigen Abgleich und der Ergänzung von Informationen dient, sondern auch der emotionalen Entlastung, also der Stressbewältigung. Der Wechsel zwischen Tag- und Nachtflugeinsätzen bringt auch die typischen Probleme der Schichtarbeit mit sich, die bis in die Sphäre von Familie und Freizeitgestaltung reichen. Erst bessere Nachtsehhilfen, die mittlerweile technisch möglich sind, eine bessere Sehschärfe erlauben, ein räumliches Sehen zulassen und nur noch unwesentlich in Größe und Gewicht von einer „normalen“ Brille abweichen, werden einige der beschriebenen Einschränkungen abmildern können.

8.4 Optische Abbildung und Fehlsichtigkeiten

Die funktionell optischen Anteile des Auges sind im wesentlichen Hornhaut, Linse, Pupille und Netzhaut, die wie bei einer Kamera zusammenarbeiten. Hornhaut und Linse bestimmen daher wie das Objektiv die Brennweite des Systems mit einer Gesamtbrechkraft von ca. 60 dpt. Die Pupille hat die Funktion der Blende und die Netzhaut übernimmt die Aufgabe eines hochsensiblen Filmes. Normalsichtigkeit (Emmetropie) besteht demnach, wenn der Brennpunkt zu einem scharfen Bild auf der Netzhaut führt.

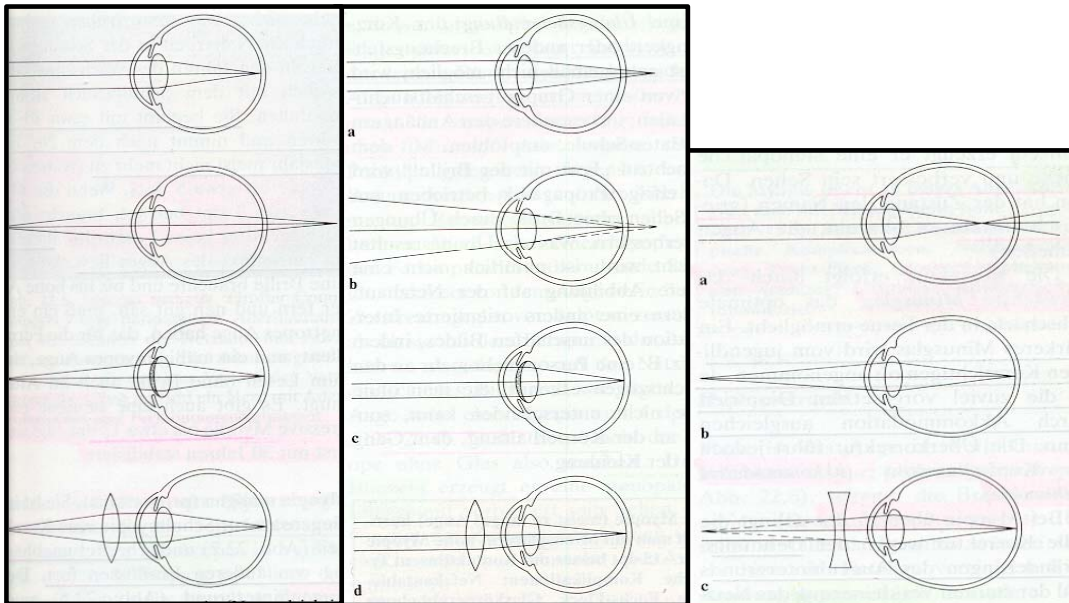


Abb. 8.13: Emmetropie (Presbyopie), Hyperopie, Myopie mit Darstellung der verschiedenen Korrekturgläser

Bei vielen Personen und selbstverständlich auch Piloten gibt es jedoch Veränderungen, die zu einer Fehlsichtigkeit (Ametropie) führen (Abb. 8.13). Ursachen hierfür sind die Augapfellaenge (Achsenametropie) bzw. eine veränderte Brechkraft des optischen Systems (Brechungsametropie). Liegt der Brennpunkt dabei vor der Netzhaut spricht man von Kurzsichtigkeit (Myopie). Wird das Bild hinter der Netzhaut scharf abgebildet spricht man von Weitsichtigkeit (Hyperopie). Eine Stabsichtigkeit (Astigmatismus) ist bedingt durch eine stärkere Krümmung meistens der Hornhaut in einer bestimmten Achslage, wodurch das Bild nur in einer Ebene optimal fokussiert werden kann und daher sowohl in der Nähe als auch in der Ferne verzerrt wird. Die mit zunehmendem Alter auftretende Alterssichtigkeit (Presbyopie) ist die Folge der abnehmenden Naheinstellungsfähigkeit (Akkommodation) der Linse.

8.4.1 Korrekturmöglichkeiten

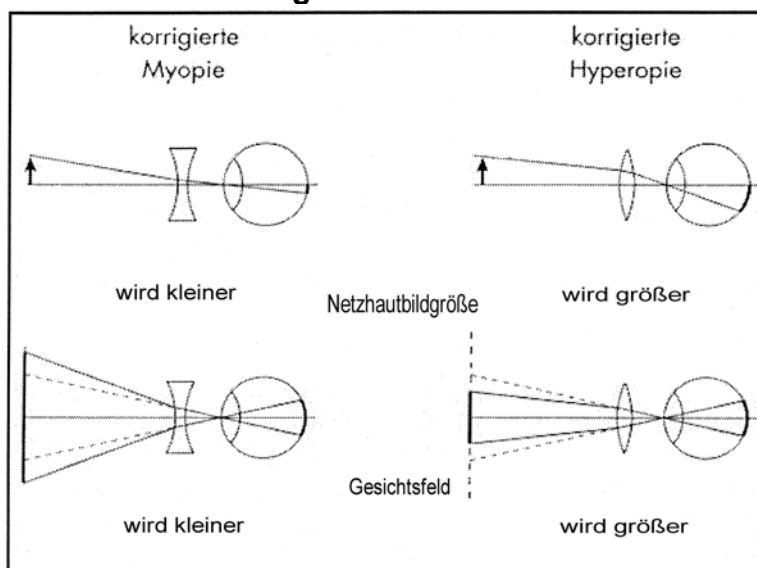


Abb. 8.14: Einfluss von Korrekturgläsern auf Netzhautbildgröße und Gesichtsfeld

8.4.1.1 Brille

Eine Myopie wird mit Zerstreuungslinsen (Minusgläsern), eine Hyperopie mit Sammellinsen (Plusgläsern) ausgeglichen. Ein Auge mit Astigmatismus benötigt zylindrische Gläser, deren Achse entsprechend der Krümmungsänderung eingeschliffen wird.

Die angesprochenen Gläser haben das grundsätzliche Problem, dass sie ca. 1 bis 1,5 cm vor dem Augapfel sind und dadurch v.a. bei höheren Dioptrienstärken im äußeren Bereich eine Verzerrung des Bildes durch prismatische Wirkungen hervorrufen und somit das Gesichtsfeld einschränken. Bei hoher Myopie bzw. Hyperopie wird das Netzhautbild außerdem erheblich verkleinert bzw. vergrößert (Abb. 8.14). Problematisch wird dieser Effekt besonders bei großen Unterschieden zwischen beiden Augen, wenn das ZNS zwei unterschiedlich große Bilder (Aniseikonie) verarbeiten muss. Um nicht auch Gesichtsfeldeinschränkungen in Form von Ringskotomen durch sehr kleine Brillengestelle, die ohne Zweifel jedoch einen höheren Tragekomfort gewährleisten, hervorzurufen, sollten insbesondere Piloten größere Gestelle tragen. Dies wiederum erschwert aber in vielen Fällen das Zusammenspiel mit dem Fliegerhelm.

Weitere Probleme, die in Zusammenhang mit Brillen stehen, sollen nur in Stichworten angegeben werden:

Reflexionen, Streuung, „Helmeinspiegelungen“, BiV-Brille, Druckekzeme, Akkommodationsaufwand, Konvergenzbedarf u.a.

8.4.1.2 Kontaktlinsen

Die zuvor angesprochenen Probleme lassen sich vor allem durch den Abstand des Brillenglases zum Augapfel erklären. Kontaktlinsen, die auf dem Tränenfilm der Hornhaut schwimmen, werden daher in vielen Fällen besser akzeptiert.

Harte Linsen (Abb. 8.15)

Harte Linsen bestehen aus plexiglasähnlichen Kunststoffen wie z.B. Polymethylmethacrylat oder auch Fluor-Silikon-Methacrylat-Copolymer und sind kleiner als der Hornhautdurchmesser. Sie sind sehr beständig, die neueren Materialien gut sauerstoffdurchlässig und haben eine hohe Lebensdauer. Sie beanspruchen aber das Hornhautepithel und können daher zu Erosionen führen.



Abb. 8.15: Harte Kontaktlinsen

Eine Tragepause in der Nacht von 10 bis 12 Stunden sollte deshalb auf jeden Fall eingehalten werden.

Weiche Linsen (Abb. 8.16)

Ihr Bestandteil ist zumeist Hydroxymethylacrylat, welches sehr viel Wasser aufnimmt, wodurch sie sehr flexibel sind und sich der Oberfläche gut anpassen. Einen Astigmatismus können sie jedoch nicht korrigieren. Hierzu stehen spezielle torische Kontaktlinsen zur Verfügung.

Die Lebensdauer ist deutlich geringer und die in jedem Fall benötigte Reinigungsprozedur ist relativ aufwendig. Die Gefahr, Hornhaut- oder Bindehautentzündungen zu erleiden, ist weit aus höher als bei harten Kontaktlinsen, da weiche Kontaktlinsen einen günstigen Nährboden besonders für Nasseime wie z.B. *Pseudomonas aeruginosa* und *Akanthamoeben* sowie Pilze darstellen.

Die weichen Kontaktlinsen der neuen Generationen vereinigen die Vorteile der zuvor besprochenen Linsen und sind daher zum heutigen Zeitpunkt die Linsen der Wahl. Durch Tauschintervalle unterschiedlicher Dauer ist die Gefahr einer Entzündung minimiert ebenso wie mögliche Reaktionen des Auges auf die Reinigungssubstanzen. Dennoch muss auch hier eine gründliche Reinigung mit Wasserstoffperoxid-Reinigungslösungen und eine Protein Entfernung alle ein bis zwei Wochen erfolgen.

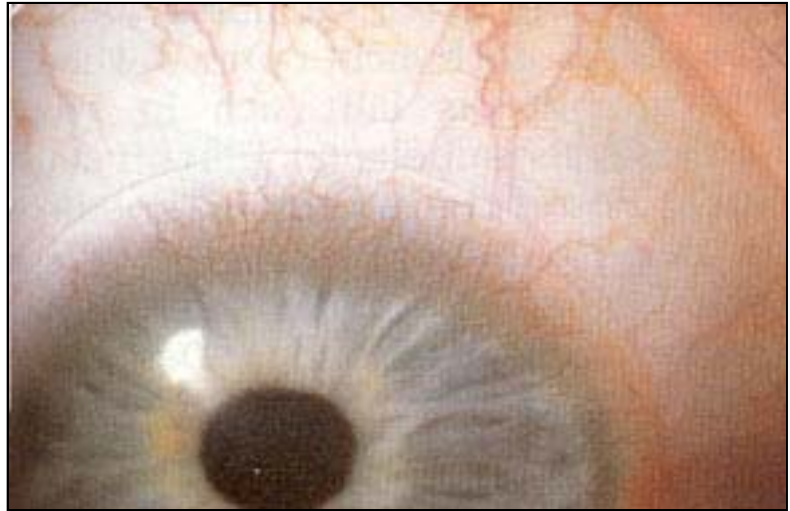


Abb.8.16: Weiche Kontaktlinse (erkennbar an dem größeren, über den Limbus reichenden Durchmesser)

Jedoch bleibt auch hier der Einsatz bei Astigmatismus begrenzt. Vor allem bei Strahlflugzeugführern kann daher ein Astigmatismus nur in geringem Ausmaß toleriert werden, der mit rein sphärischen Linsen ausgeglichen werden kann. Torische Linsen, die einen zylindrischen Ausgleich ermöglichen, können sich bei bestimmten Flugmanövern aus ihrer vorbestimmten Achse drehen und zu einem rapiden Visusabfall führen.

8.4.1.3 Operative Verfahren

Auf die einzelnen Verfahren eine Fehlsichtigkeit operativ zu beheben, soll hier nicht eingegangen werden. Nur sollte sich grundsätzlich jeder darüber im klaren sein, dass hierbei an einem prinzipiell gesunden Organ (zumeist die Hornhaut) Manipulationen durchgeführt werden, die mehrfache Komplikationen (z.B. Vernarbung, Trübungen, irreguläre Astigmatismen, Hornhautektasie) nach sich ziehen können.

Ist jedoch eine Operation erfolgreich durchgeführt worden, bestehen physiologischerseits, gesetzt den Fall, dass alle Kriterien, die an nicht operierte Hornhäute gestellt werden, erfüllt werden, keine Bedenken gegen den Einsatz der Person als Luftfahrzeugführer.

8.4.2 Sehleistung, Sehschärfe, Grenzwerte

	WFV-Grad		
	I	II	III
Sehleistung jeders. mindestens	0,5		Keine Standardwerte
Sehschärfe jeders. Mit verträglichen Gläsern mindestens	1,0	1,0	1,0
Nahsehen ggf. mit entsprechender Korrektur mindestens	Für alle WFV-Grade Nieden 1 in 25-30 cm (= 0,6 – 0,75)		
Objektiv ermittelte Hypermetropie nicht mehr als:	+2,0 sph	+4,0 sph	+5,5 sph
Objektiv ermittelte Myopie nicht mehr als:	-0,75 sph	-1,5 sph	-5,5 sph
Objektiv ermittelter Astigmatismus in jedem beliebigen Meridian nicht mehr als:	1,0 cyl	3,0 cyl	3,0 cyl

Abb. 8.17: Geforderte Sehleistung nach ZDv 46/6

Der Augenarzt prüft bei einem Piloten oder Bewerber zunächst das Sehvermögen (Sehschärfe, Visus) ohne jegliche Korrektur.

Sollte sich hierbei ein Defizit herausstellen, werden Gläser verschiedener Stärken probiert, um den bestmöglichen Visus, die Sehschärfe mit Korrektur, zu ermitteln.

Die Gläserstärke wird dann mit drei Werten angegeben: Dem sphärischen Anteil, dem zylindrischen und der Achse zu diesem Zylinder. Der sphärische Anteil wird entsprechend einer Myopie oder Hyperopie mit Minus oder Plus angegeben. Da bei Erforderlichkeit eines Zylinders zwei Achsen existieren, wird entweder die Achse über dem höheren Brechwert angegeben oder über dem niedrigeren. Dadurch ändert sich das Vorzeichen von + auf - und die Achse entsprechend um 90°.

Die Grenzwerte für Piloten, Erstbewerber oder WFV III - Personal unterliegen steten Aktualisierungen, so dass hier nur die aktuell gültigen Werte als Tabelle angegeben werden, die mittels eigenen Eintragungen stets auf dem neuesten Stand sind (s. Abb. 8.17).

8.5 Farbsehen, Farbsinnstörungen

Die Zapfen der Netzhaut weisen drei verschiedene Pigmente mit unterschiedlicher Empfindlichkeit auf (s. Abb. 8.18). Durch breite Überlagerung der Absorptionskurven ergeben sich nur Farbpräferenzen. Die Weiterverarbeitung eines farbigen Reizes geschieht vor allem durch Kontrastphänomene zunächst in der Netzhaut bis hin zu den Sehfeldern der Hirnrinde. Der farbtüchtige Mensch hat die angesprochenen drei Pigmente (Trichromat), deren Ausbildung X-chromosomal festgelegt wird.

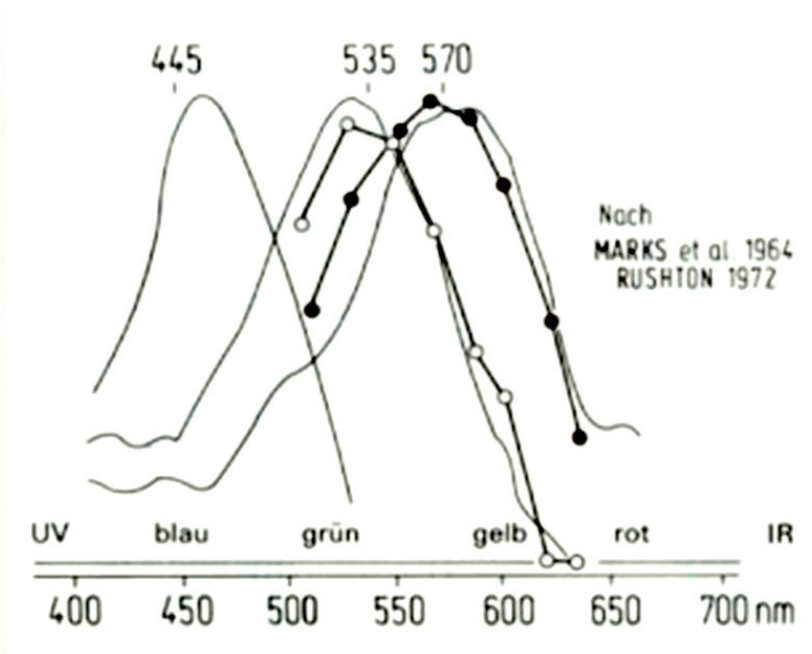


Abb. 8.18: Absorptionsspektrum der Zapfenpigmente des Menschen

8.5.1 Erbliche Farbsinnstörungen

Wegen der rezessiven Vererbung ist verständlich, dass häufiger Männer von Farbsinnstörungen betroffen sind. Man unterscheidet komplette Defekte, bei denen eines oder seltener zwei (Anopien) oder gar alle drei Pigmente (Achromatopsie) fehlen, von partiellen Defekten (Anomalien), bei denen vermutlich anomale Pigmente vorliegen. Liegt die Störung im Grün-

Normal = Trichromasie	3 Zapfenpigmente	91,8% der Bevölkerung
Anomale Trichromasie:	Abnorme Zapfenpigmente	
im Grün:	Deuteranomalie	4,5% der Bevölkerung
im Rot:	Protanomalie	1% der Bevölkerung
Dichromasie:	2 Zapfenpigmente	
Gründefekt:	Deuteranopie	1,5% der Bevölkerung
Rotdefekt:	Protanopie	1,2% der Bevölkerung
Monochromasie:	1 Zapfenpigment	sehr selten

Abb. 8.19: Systematik und Häufigkeit von erblichen Farbsinnstörungen (nach Duke-Elder)

bereich (Deuteranopie/-anomalie) besteht ein schlechtes Unterscheidungsvermögen für Rot, Grün und Gelb insbesondere bei gleicher Lichtintensität. Rotsinnstörungen (Protanopie / -anomalie) verursachen ein weitaus dunkleres Empfinden für Rot als im Normalfall.

Die seltenen Blausinnstörungen (Tritan.) haben zur Folge, dass Blau und Grün wie auch Orange und Rosa verwechselt werden können.

Wichtig ist der Farbsinn vor allem bei farbcodierten Schaltern, Leitern, Litzen o.ä. insbesondere bei abnehmender Lichtintensität, deren Verwechslung verheerende Auswirkungen nicht nur auf die Führung des Luftfahrzeugs haben können.

8.5.2 Erworbene Farbsinnstörungen

Veränderungen des Farbsinnes können auch durch Erkrankungen der brechenden Medien, der Netzhaut oder des Sehnervs verursacht werden. Zumeist sind diese dann einseitig und gehen in der Regel bei Trübungen der brechenden Medien mit einer vermehrt rötlich-bräunlichen Wahrnehmung einher, bei Netzhautschäden mit Blausinnstörungen und bei Sehnervenerkrankungen eher mit Rot-Grünsinnstörungen. Auch hier gilt: „Keine Regel ohne Ausnahme“.

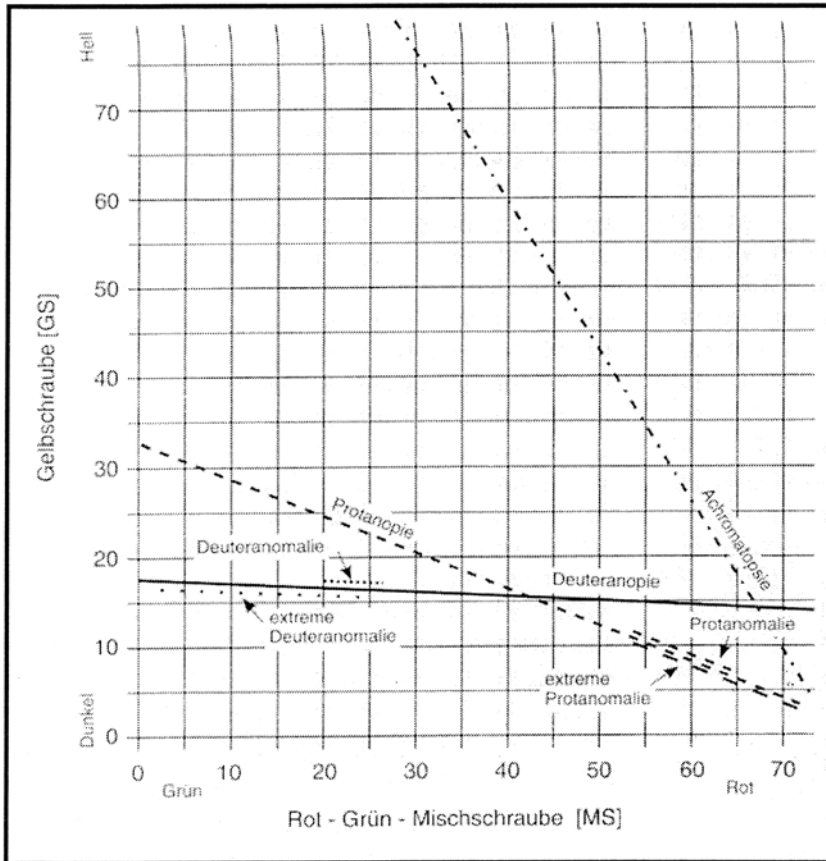


Abb. 8.20: Einstellungsmöglichkeiten beim Anomaloskop

Vom Augenarzt wird der Farbsinn zunächst z.B. mit den pseudoisochromatischen Tafeln nach Ishihara geprüft. Dabei werden verschieden große Punkte unterschiedlicher Farbe aber ähnlicher Lichtintensität dargeboten, unter denen der Farb-tüchtige bestimmte Zahlen ausmacht.

Werden hierbei Fehler gemacht, kommt das gutachterlich wichtige Anomaloskop nach Nagel zum Einsatz. Dabei wird im oberen Teil ein Halbkreis gemischt aus Rot und Grün dargeboten und im unteren Halbkreis eine gelbe Natriumbande, deren Helligkeit verstellt werden kann. Die Mischung und Helligkeit müssen so eingestellt

werden, dass beide Halbkreise als gleich empfunden werden. Aus dem Rot- und Grünanteil wird der Anomalquotient (AQ) ermittelt, wobei bei jeder Person ein oberer und ein unterer Wert festgehalten werden kann.

Der Farbentüchtige erreicht einen Wert von 1,0. Werte, die darunter liegen gehen in Richtung Protanomalie, Werte darüber in Richtung Deuteranomalie. Bei Anopien wird die Diagnose ohne Angabe eines AQ angegeben, da in diesen Fällen mehrere Gleichungen angenommen werden. Die Grenzwerte für fliegerisches Personal liegen derzeit bei 0,65 und 1,3.

8.6 Begutachtungswesen

Bei den regelmäßig durchzuführenden Nachuntersuchungen für Luftfahrzeugführer der Bundeswehr am FIMedInstLw werden folgende klinische Befunde erhoben:

Die Sehschärfe ohne Korrektur bzw. nach optimaler Refraktion, Veränderungen der vorderen Augenabschnitte und nach medikamentöser Mydriasis Funduskopie zur Beurteilung von Macula, Papille, Gefäßen und Peripherie.

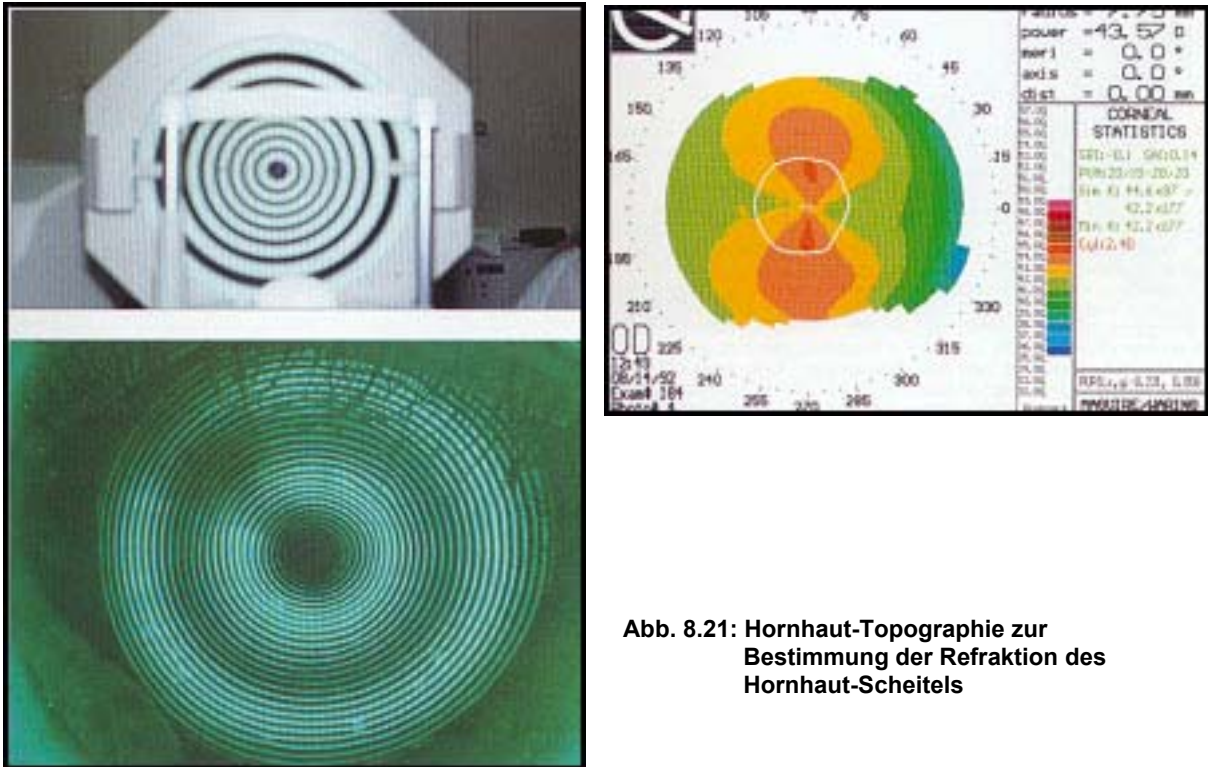


Abb. 8.21: Hornhaut-Topographie zur Bestimmung der Refraktion des Hornhaut-Scheitels

Ab dem 40. Lebensjahr wird zusätzlich jährlich der Augeninnendruck kontrolliert. Die Erstuntersuchung für Pilotenbewerber wird ergänzt durch die Erhebung des Anomalquotienten mit AQ1 und AQ2- Vermessung und grafischer Darstellung der Hornhautoberfläche (Topographie) (Abb. 8.21), eine Prüfung des Gesichtsfeldes und Untersuchung des mesopischen Sehens sowie der Blendungsempfindlichkeit mittels Nyktometer. Abschließend wird eine medikamentöse Cycloplegie zur Ausschaltung der Akkommodation durchgeführt mit anschließender objektiver Refraktion. Bei Bedarf (z.B. Medikamenteneinnahme oder nach Erkrankungen) werden diese zusätzlichen Untersuchungen auch für die bereits aktiven Luftfahrzeugführer benötigt. Außerdem steht noch die Möglichkeit einer Ultraschalluntersuchung und einer Argonlaserbehandlung (z.B. der Netzhaut) zur Verfügung. Insbesondere bei bestimmten Erkrankungen müssen gegebenenfalls Untersuchungen auch in engeren Zeiträumen stattfinden. So ist es keine Seltenheit, dass der Augeninnendruck bei okulärer Hypertension, also erhöhtem Augeninnendruck ohne morphologischen Schaden, in Abständen von drei Monaten kontrolliert wird. Ein weiteres Beispiel ist die engmaschige Kontrolle von Fundusveränderungen bei Diabetikern oder Hypertonikern.

Aber auch bei der Einnahme von zahlreichen Medikamenten muss an eventuelle Veränderungen am Auge gedacht werden. So ist als Beispiel das Resochin anzuführen, bei dem es zu Veränderungen sowohl der Vorderabschnitte wie auch am Hinterabschnitt mit Änderung der Farbempfindlichkeit des Auges kommen kann.

8.7 Sondergenehmigungen

Werden Grenzwerte nach ZDv 46/6 überschritten oder liegen Krankheiten des Auges vor, welche einen Ausschluss der Wehrfliegerverwendungsfähigkeit zur Folge haben, gibt es die Möglichkeit der Erteilung einer Sondergenehmigung. Aufgrund der sehr zuverlässigen Möglichkeit der o.a. objektiven Refraktion ist der Spielraum beim Überschreiten der Grenzwerte für die Refraktion insbesondere bei Erstbewerbern nur sehr gering. Bei langjähriger Flieger-

fahrung und notwendiger Verstärkung der Brillengläser ist hier sicher großzügiger zu verfahren, wenn keine Besonderheiten im Gesamtbild auftreten. Bei einer Farbschwäche, die nur gering vom Normalwert abweicht, muss individuell geprüft werden, ob sich diese Schwäche möglicherweise auf die Flugsicherheit auswirkt oder ob unter physiologischen Bedingungen dies keinerlei Auswirkungen zeigt. Erkrankungen, die mit morphologischen Schäden einhergehen können, wie zum Beispiel das Glaukom (grüner Star), sind ebenfalls sehr individuell einer Prüfung zu unterziehen. Hierbei kann es für den augenärztlichen „Laien“ schon einmal aussehen, als ob hier teilweise willkürlich beurteilt würde. Für den Einzelfall bietet sich dann immer eine telefonische Rücksprache zur Klärung an.

8.8 Ausblick

Hier werden in Stichpunkten einige Themen genannt, bei denen in Zukunft Änderungen zu erwarten oder auch zu erhoffen sind:

- Laserschutzbrille
- BiV-Brille
- torische Kontaktlinsen auch für Strahlflugzeugführer
- multifokale Kontaktlinsen
- Erweiterung des Spektrums für die Zulassung als Erstbewerber bei refraktiver Chirurgie

8.9 Verwendete und weiterführende Literatur

Breuer, H. dtv-Atlas zur Physik, Bd 1. (dtv: 3226) 6. Aufl., Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 2000

Kanski, J.J. Lehrbuch der klinischen Ophthalmologie. 2. Aufl., Thieme, Stuttgart, 1996

Lachenmayr, B., Friedburg, D., Hartmann, E. Auge – Brille – Refraktion. 2. Aufl., Enke, Stuttgart, 1999

Lang, G. K. Augenheilkunde. Thieme, Stuttgart, 1998

Reim, M. Augenheilkunde. 5. Aufl., Enke, Stuttgart, 1996

Richard, G. Ophthalmologischer Untersuchungskurs. Thieme, Stuttgart, 1992

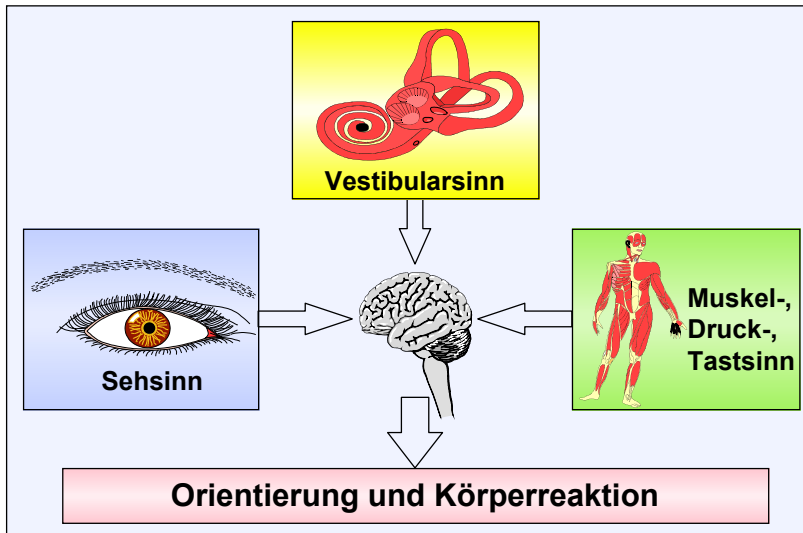
Spalton, D. J., Hitchings, R. A., Hunter, P. A. (Hrsg.) Atlas der Augenkrankheiten. 2. Aufl., Thieme, Stuttgart, 1996

9 RÄUMLICHE ORIENTIERUNG / DESORIENTIERUNG

9.1 Einführung

Räumliche Desorientierung tritt auf, wenn Flugzeugführer Sinneseindrücke, die nicht der wirklichen Lage und Bewegung im Raum entsprechen, als real interpretieren.

Räumliche Desorientierung (Spatial Disorientation, abgek. SD) ist ein beitragender Faktor bei vielen Flugunfällen, bei einigen sogar die Hauptursache. Jeder Flugzeugführer ist anfällig für SD und jeder hat im Fluge die eine oder andere Form der Desorientierung erlebt.



Drei Sinnesorgane ermöglichen die Lageorientierung in Bezug auf die Erdoberfläche:

- die Augen
- das Vestibularorgan des inneren Ohres
- die Oberflächen- und Tiefensensibilität des menschlichen Körpers (Propriozeptives System: Muskel-, Druck-, Tastsinn).

Abb. 9.1: Räumliche Orientierung

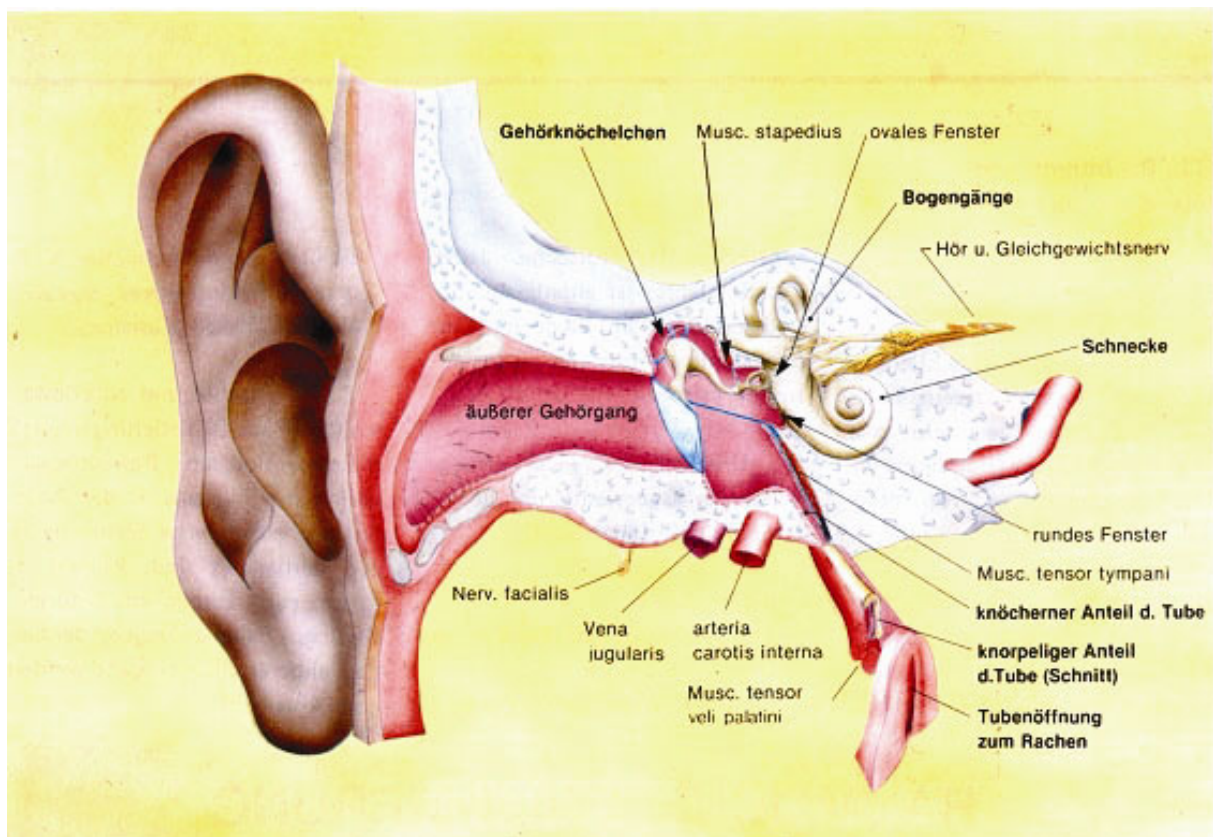


Abb. 9.2: Das innere Ohr

Das wichtigste und zuverlässigste Organ zur Orientierung bei den dreidimensionalen Bewegungsabläufen des Fliegens ist das Auge. Solange zuverlässige Sichtreferenzen vorhanden sind, kommt es kaum zur räumlichen Desorientierung. „Fehlmeldungen“ der beiden anderen Sinnesorgane werden dann korrigiert. Das Vestibularorgan und die propriozeptiven Sinne sind im Fluge unzuverlässig und können Fehlinformationen liefern, die in Bezug auf die Lage im Raum, insbesondere, wenn die Sicht nach außen fehlt (in Wolken, Dunst oder Nebel), das Auge nicht korrigieren kann und damit zu Täuschungen (Illusions) und räumlicher Desorientierung führen können.

9.2 Anatomie und Physiologie des Gleichgewichtsorgans

Sinnestäuschungen, die vom Gleichgewichtsorgan ausgehen, lassen sich aus seiner Beschaffenheit und Funktionsweise erklären. Das Gleichgewichts- oder Vestibularorgan liegt nahe der Schnecke (Cochlea) beiderseits im Felsenbein. Es besteht aus den Bogengängen und dem Otolithen-Apparat (Sacculus und Utriculus).

9.2.1 Die Bogengänge und ihre Funktion

Drei senkrecht zueinander angeordnete Bogengänge sind nötig, um Drehbewegungen um alle möglichen Raumachsen (Nicken, Wenden und Seitwärtsneigen des Kopfes) zu registrieren. Sie enthalten in ihrer Ampulle je eine Leiste mit Sinneszellen, deren Sinneshaare (Zilien) in die schwenkbare Cupula eingebettet sind.

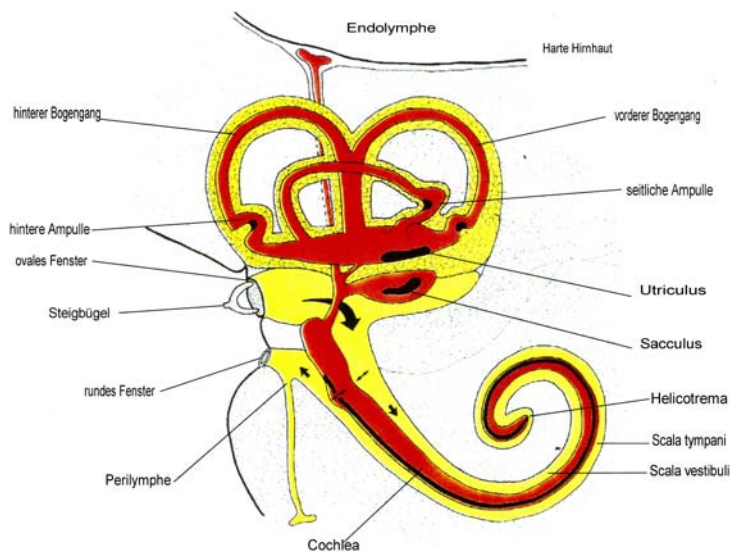


Abb. 9.3: Die Bogengänge mit Utriculus und Sacculus (mod.n. de Burlet)

Dreht sich der Kopf - oder das Flugzeug bei Ruhelage des Kopfes - so bewegt sich der Bogengang zwangsläufig mit. Die im Bogengang enthaltene Endolymphe folgt aufgrund ihrer Trägheit dieser Bewegung nur verzögert: Die Cupula wird ausgelenkt. Dadurch werden die Fortsätze der Haarzellen innerhalb der Cupula ebenfalls ausgelenkt, was wiederum zu einer Erregung der ableitenden Nervenfasern führt. Die Impulse des

Vestibularnervens gelangen ins Gehirn und werden als Drehung des Kopfes interpretiert. Die bei der Beendigung der Kopfbewegung folgende Reduktion der Beschleunigung bringt die Cupula wieder in die Normallage zurück.

Dreht sich der Körper über einen längeren Zeitraum mit konstanter Geschwindigkeit, kommt die Strömung im Bogengang zur Ruhe und die Cupula richtet sich auf. Das Gehirn empfängt nun die Falschmeldung: „Ruhelage“. Stoppt nun die Bewegung tatsächlich, entsteht eine Relativströmung der Endolymphe in die Gegenrichtung. Eine Zeitlang tritt die Illusion einer Gegendrehung auf. Der Schwellenwert der angularen Beschleunigung für diese Abläufe wird mit ca. $2^\circ/\text{sec}^2$ angegeben. „Unterschwellige Bewegungen“ werden somit nicht registriert.

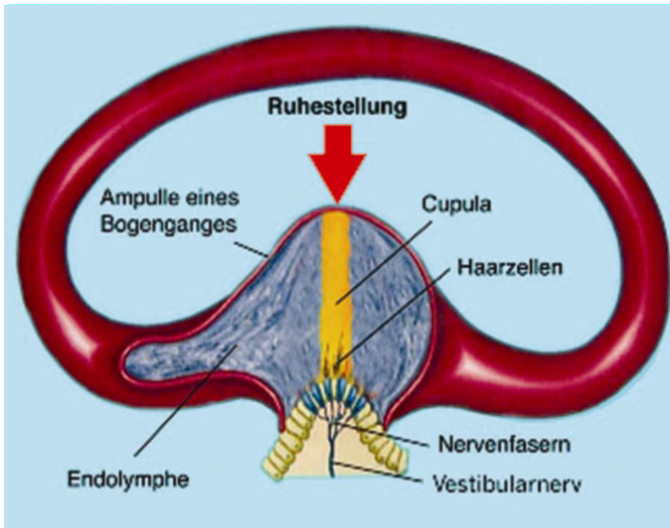


Abb. 9.4: Bogengangorgan

Alle durch Rotation entstehenden Sinnesreize werden über das Ganglion vestibulare zu den Vestibularkernen (im verlängerten Rückenmark) geleitet. Wichtige Bahnen ziehen von dort zu den Augenmuskelkernen, zum Kleinhirn, zu den Bewegungsneuronen der Skelettmuskulatur und zum Raumorientierungszentrum im Zentralnervensystem. Eine Verbindung zum N. Vagus erklärt die gastrointestinale Symptomatik (z.B. Druck und Übelkeit in der Magengegend). Die enge Verbindung des Vestibularorgans mit den Augenmuskelkernen zur besseren Raumorientierung wird

daraus deutlich, dass jede Abweichung der Kopfstellung sofort durch eine gegenläufige Augenbewegung (Nystagmus) kompensiert wird.

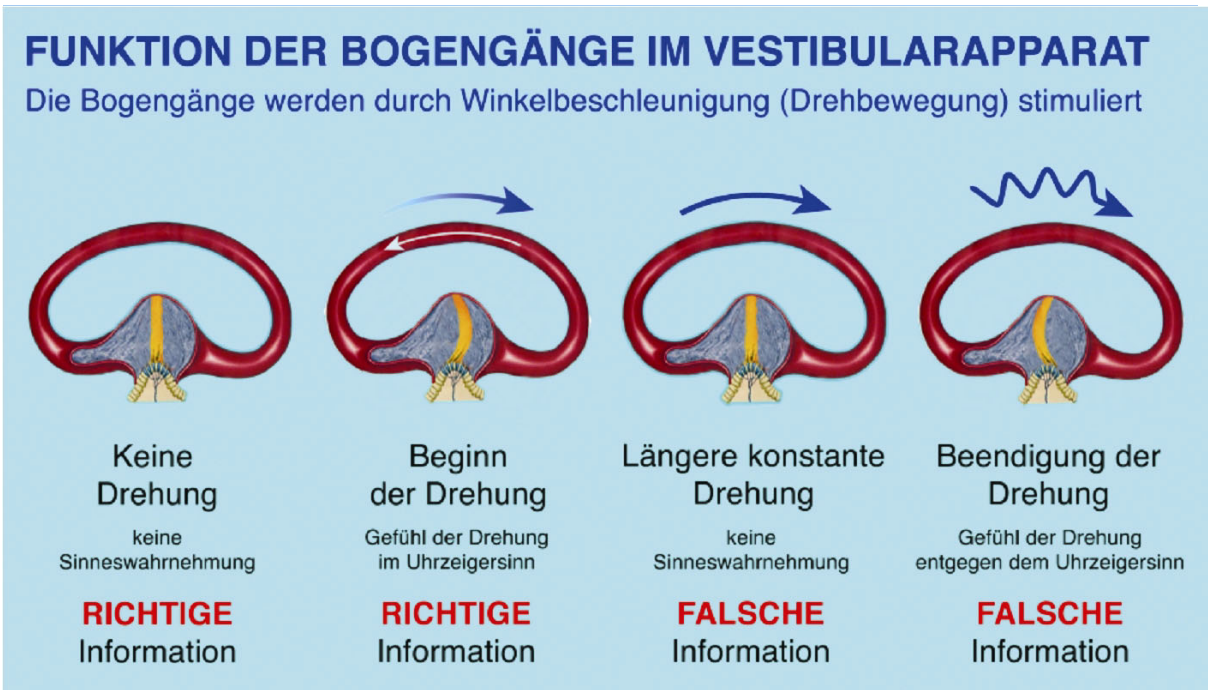


Abb. 9.5: Funktion der Bogengänge, Verhalten bei angulärer Beschleunigung

Bei schnellen Drehbewegungen des Flugzeugs (z.B. schnelles Rollen, Trudeln) kann dieser Reflex das Ablesen der Instrumente erschweren oder zeitweise unmöglich machen, insbesondere dann, wenn zusätzlich der Kopf bewegt wird.

Für das Gleichgewichtsorgan ungewohnte Reize tragen auch zu Bewegungskrankheiten (Luft-, Seekrankheit), sog. Kinetosen (vgl. auch Kapitel 10), bei.

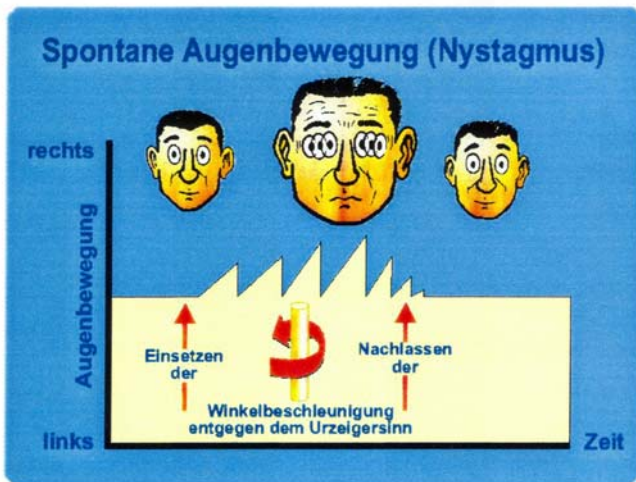


Abb. 9.6: Nystagmus

lithenmembran, ihre Position auf der Macula zu verändern. Dabei werden die Sinneshaare gebeugt, und die Veränderung der Lage des Kopfes wird signalisiert.

Wenn der Kopf aufrecht steht, wird durch die Sinneshärchen eine „Ruhe“-Frequenz von Nervenimpulsen erzeugt. Wird der Kopf geneigt, ändert sich die Frequenz der Nervenimpulse und das zentrale Nervensystem wird über die geänderte Kopfhaltung informiert. (siehe Abb. 9.8 A)

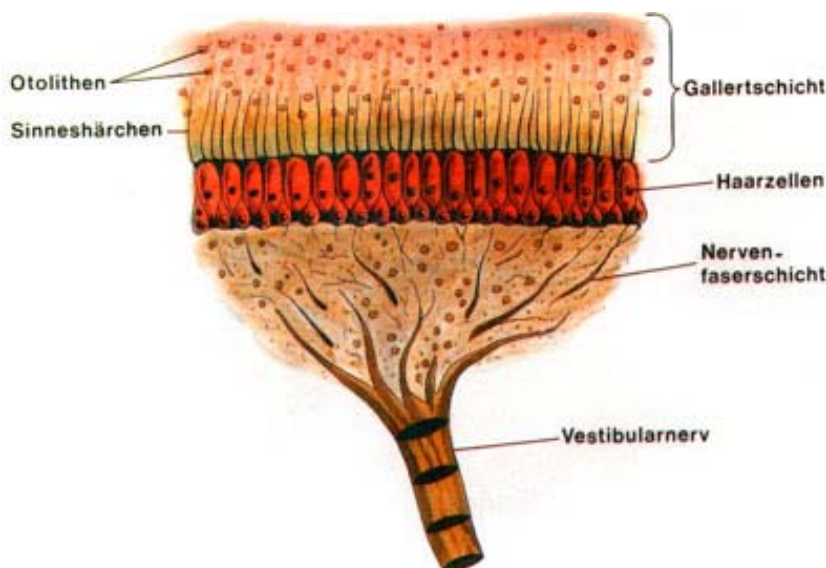


Abb. 9.7: Das Otolithenorgan in Ruhelage

durch Ausfahren der Sturzflugbremsen, zu einer Verschiebung der Otolithenmembran nach vorn. Das entstehende Signal führt zur Empfindung „Sinken“.

Im koordinierten Kurvenflug hingegen bleibt das Otolithenorgan aufrecht, es richtet sich nach dem „Scheinlot“ aus, so als ob keine Querlage bestünde. (Siehe Abb. 9.8 C).

9.2.2 Der Otolithenapparat und seine Funktion

Das Vestibularorgan enthält - in Form zweier Säckchen (Sacculus und Utriculus) - den Otolithenapparat. Sacculus und Utriculus enthalten Sinneszellen mit Zilien (Macula), welche in eine gallertartige Membran hineinragen, die mit Kalzitkristallen (Otolithen, Statolithen) angereichert ist.

Die Otolithen sprechen normalerweise auf Lageänderungen schwerkraftbedingt an; Änderungen der Kopfposition in Bezug auf die Richtung der Erdanziehung veranlassen die Otolithen

jedoch auch durch lineare Trägheitseinwirkung auf Grund von Beschleunigungen stimuliert, wie sie im Fluge häufig auftreten. Bei einer starken Beschleunigung durch Schuberrhöhung der Triebwerke wird die Otolithenmembran nach rückwärts verschoben, also eine Neigung nach hinten signalisiert wie beim Steigflug. (Siehe Abb. 9.8 B)

Ebenso kommt es bei starkem Abbremsen, etwa

FUNKTION DER OTOLITHEN

VERHALTEN BEI LINEARER BESCHLEUNIGUNG

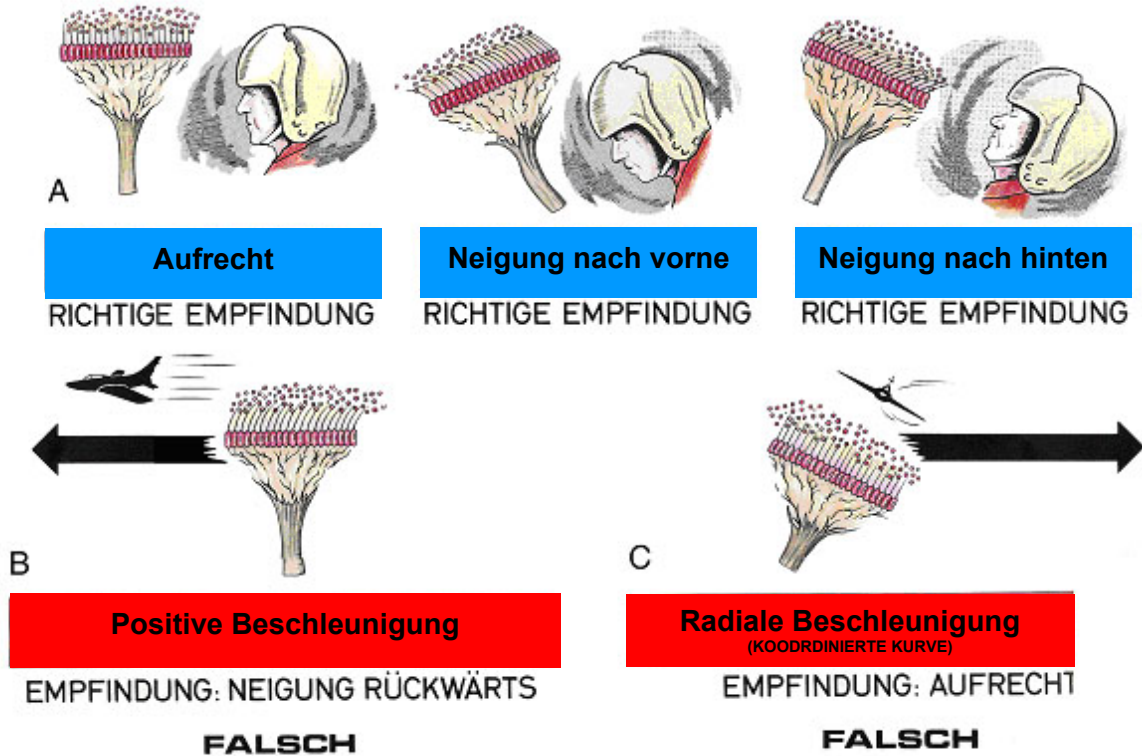


Abb. 9.8: Funktion der Otolithen

9.3 Der Muskel-, Druck- und Tastsinn

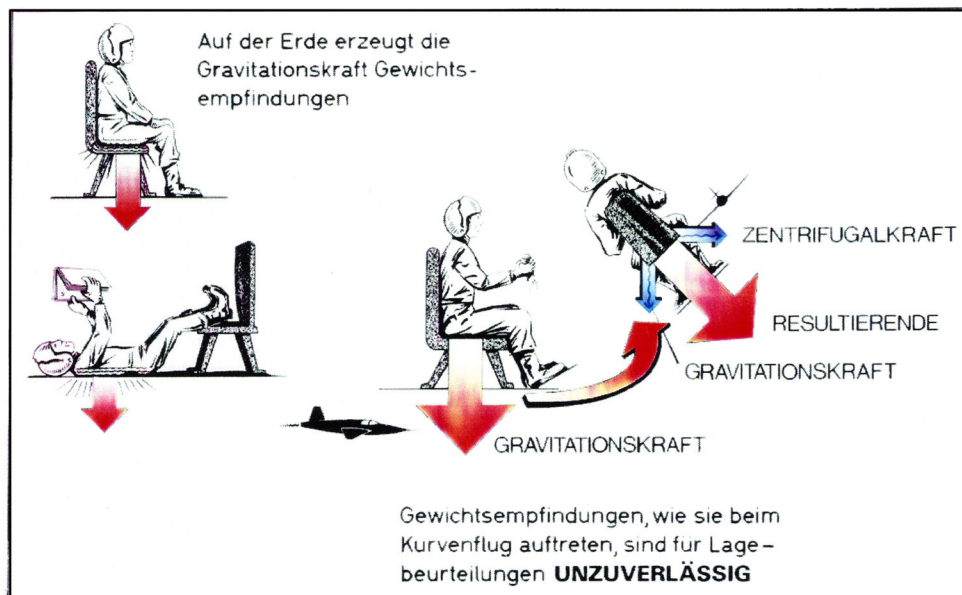


Abb. 9.9: Gewichtsempfindungen am Boden und in der Luft

Über den ganzen Körper verteilte Sinneszellen der Oberflächen- und Tiefensensibilität orientieren den Menschen über Lage und Bewegung des Körpers oder der Körperteile in Bezug auf die Erdoberfläche, über „Oben“ und „Unten“.

Subcutane Druckrezeptoren informieren darüber, ob man steht, sitzt oder liegt. In Fliegerkreisen berühmt ist das „Hosenbodengefühl“, englisch „seat of the pants“ genannt. Flieger der Pionierzeit machten oft folgenschwere Fehler, weil sie glaubten, man könne die Lage des Flugzeuges im Raum mit Hilfe des „Hosenbodengefühls“ bestimmen, wenn Sichtreferenzen fehlten. Im Fluge richtet sich der Druck- und Tastsinn nach der Resultierenden aus Erdanziehung und Fliehkraft, eine korrekte Lageorientierung ist nicht länger möglich, der „erdgebundene“ Druck- und Tastsinn ist überfordert (s. Abb. 9.9).

9.4 Räumliche Desorientierung

Solange die Reize, die von den beteiligten Sinnesorganen an das Zentralnervensystem gemeldet werden, mit der tatsächlichen Position, Lage oder Bewegung im dreidimensionalen Raum übereinstimmen, bleibt der Pilot orientiert. Widersprechen sich die Reize jedoch oder stimmen sie nicht mit der tatsächlichen Position, Lage oder Bewegung überein, unterliegt er unweigerlich einer Sinnestäuschung insbesondere dann, wenn äußere Sichtreferenzen fehlen (Wolken, Dunst, Dunkelheit). Vertraut er, was die Regel ist, seinen Fluginstrumenten, bleibt er orientiert. Die Missempfindungen hinsichtlich Lage, Position oder Bewegung jedoch bleiben. Sie begleiten ihn, ärgerlich und plagend, bis das Auge wieder korrigierend eingreifen kann; über den Wolken etwa oder beim Landeanflug, wenn die Wolkenuntergrenze erreicht ist. Vertraut er den Instrumenten nicht und versucht sein Flugzeug nach den Sinnesreizen auszurichten, kommt es zur räumlichen Desorientierung.

9.4.1 Vestibulare Täuschungen

Einige charakteristische Sinnestäuschungen werden im Folgenden beschrieben. Hierbei wird unterschieden zwischen Täuschungen, die durch angulare (Bogengänge) oder lineare Beschleunigung (Otolithen) hervorgerufen werden.

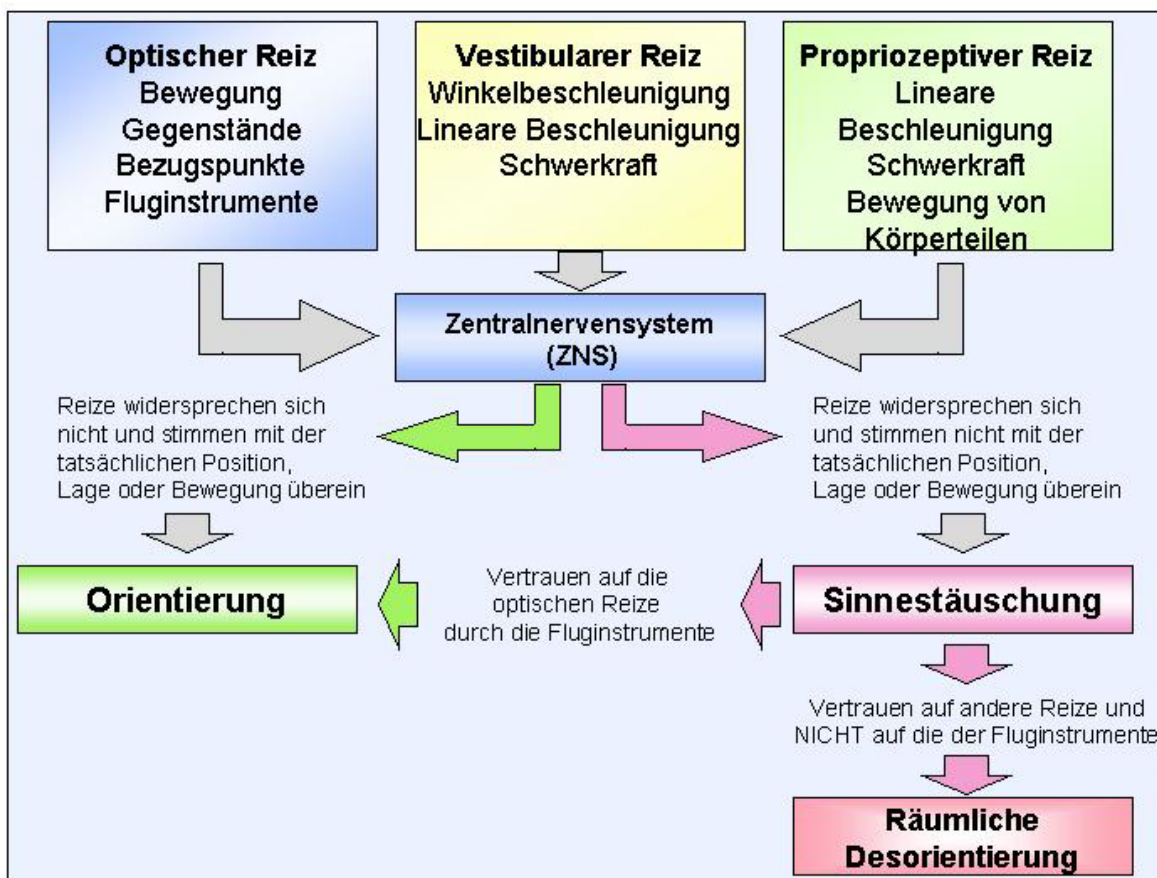


Abb. 9.10: Räumliche Desorientierung

Das Gefühl des „Hängens“ (Leans)

Die bekannteste vestibuläre Täuschung entsteht durch eine Folge von über- und unter-schwelligen Reizungen der Bogengänge.



Abb. 9.11: The Leans

In einer lang gezogenen Kurve verliert der Pilot nach einiger Zeit das Gefühl für seine Querlage. Rollt er nun aus, um die Kurve zu beenden, signalisieren die Bogengänge eine Neigung in die Gegenrichtung. Um das Gefühl des Geradeausfluges zu haben, lehnt er sich (engl.: to lean) in die vermeintliche Senkrechte hinüber:

In der Fliegersprache nennt man das „Leans“. Das gleiche Gefühl der Querlage entsteht, wenn unerschwellig (meist un-

beabsichtigt und mit weniger als $2^\circ/s^2$) eingerollt, die Querlage abrupt beendet wird oder umgekehrt. Geflogen wird natürlich nach der Anzeige des künstlichen Horizonts, das „Gefühl des Hängens“ aber bleibt eine Zeitlang bestehen.

Scheindrehung

Die Illusion der Scheindrehung tritt auf, wenn die Bogengänge sich in einer konstant rotierenden Umgebung „stabilisiert“ haben und dann die Drehung beendet wird. Es tritt das Gefühl auf, sich in Gegenrichtung zu drehen (Englisch: Somatogyral Illusion).

„Friedhofstrudeln“ (Graveyard Spin)

Eine gleichmäßige Trudelbewegung über einen längeren Zeitraum hinweg (ca. 30 Sek.) wird vom Piloten nicht mehr wahrgenommen, da die Bogengänge ein Equilibrium erreichen. Die Fluginstrumente zeigen allerdings die trudelnde Abwärtsbewegung an. (Künstlicher Horizont, Höhenmesser, Kurskreisel, Wendezeiger, Variometer). Wird das Trudeln beendet, entsteht die Illusion des Trudelns in die Gegenrichtung. Folgt der Pilot seinen Sinneseindrücken und nicht den Anzeigen der Fluginstrumente, wird ein erneutes Trudeln in die ursprüngliche Richtung eingeleitet.

Dies könnte sich, insbesondere wenn Sichtreferenzen fehlen, bis zum Aufschlag auf dem Boden fortsetzen: im Fliegerenglisch - etwas makaber - ein „Graveyard Spin“.

„Friedhofsspirale“ (Graveyard Spiral)

Die abwärtsgerichtete Flugbewegung ähnelt der des vorher beschriebenen Trudelns, erfolgt aber in Form einer koordinierten Kurve.

Ein unerfahrener Flugzeugführer verliert in einer Querlage (der Auftrieb des Flugzeugs verringert sich) leicht an Höhe. Er nimmt den Kurvenflug selbst nach einiger Zeit nicht mehr wahr, da die Bogengänge nicht mehr gereizt werden. Er korrigiert nun den Höhenverlust durch Ziehen des Steuerknüppels und erhöht den Schub, um Höhe zu gewinnen. Dieses Manöver verringert jedoch nur den Radius der Spirale, wenn die Querlage nicht mit Hilfe der

Fluginstrumente beendet wird. Die Spirale könnte, immer enger werdend, solange fortgesetzt werden, bis die Kontrolle über das Flugzeug verloren geht.



Abb. 9.12: Graveyard spin

Coriolis Illusion

Die Coriolis Illusion ist wohl die gefährlichste vestibuläre Täuschung, da sie ein geradezu überwältigendes Gefühl der Desorientierung hervorruft.

Dieses Gefühl tritt auf, wenn in einer langen, koordinierten Kurve (etwa im „Penetration Turn“ beim Instrumentenanflug) sich die Bogengänge „stabilisiert“ haben und dann der Kopf seitlich nach oben oder unten gegen die Drehrichtung des Flugzeuges bewegt wird - etwa beim Schalten von Bedienelementen auf den Konsolen beiderseits vom Pilotensitz.

Durch eine solche Kopfbewegung werden alle Bogengänge gleichzeitig stimuliert

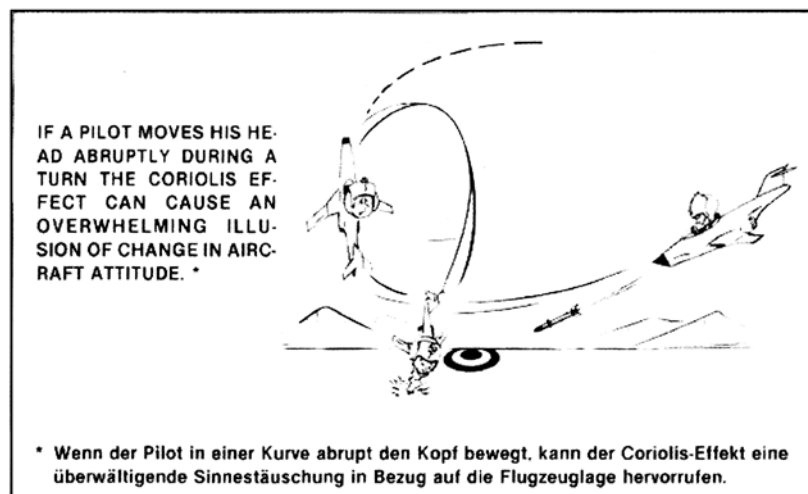


Abb. 9.13: Coriolis Illusion

und es kommt zum Eindruck von Drehbewegungen, die in Wirklichkeit nicht vorhanden sind. Ausgeprägte Drehbewegungen des Kopfes zur Beobachtung des Luftraums bei Kurvenflügen können den gleichen Effekt hervorrufen.

Das Gefühl besteht aus dem überwältigenden Eindruck einer Rollbewegung, verbunden mit starkem „Steigen“ oder „Fallen“ (tumbling). Unter dem Eindruck dieser Sinnestäuschung ist es besonders wichtig, Fluglagekorrekturen ausschließlich nach den Fluginstrumenten vorzunehmen, außerdem sind abrupte Kopfbewegungen bei Kurvenflügen nach Möglichkeit zu vermeiden.

Illusion des Steigens oder Sinkens (Somatogravic Illusion)

Die Illusion des Steigens entsteht bei einer positiven linearen Beschleunigung des Flugzeugs, wie z.B. beim Startvorgang oder der Geschwindigkeitsaufnahme während des Geradeausflugs. Sie wird verursacht durch eine auf dem Gesetz der Trägheit beruhenden Scherung der Otolithen auf der Otolithenmembran. Der Flugzeugführer hat nun den Eindruck, dass sein Kopf nach hinten geneigt ist wie beim Steigflug. Abb. 9.14 zeigt den Verlauf des Flugweges während eines Durchstartverfahrens. Der Flugzeugführer setzt in diesem Falle die von den Otolithen erhaltenen Informationen ohne weiteren cross-check in eine Steuerbewegung um und steuert somit das Flugzeug „in den Boden“.

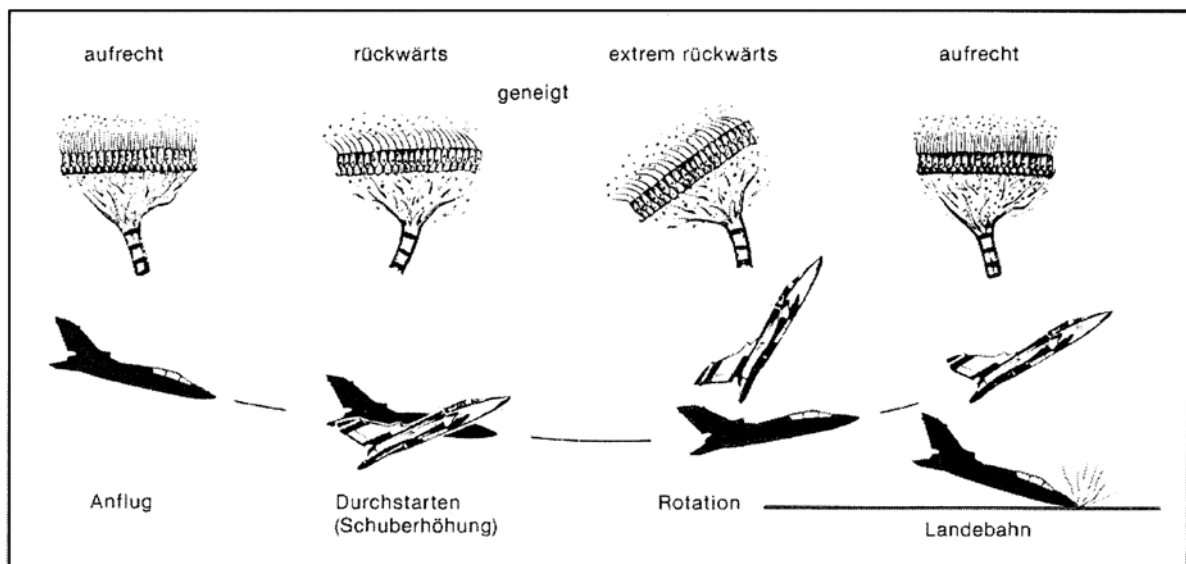


Abb. 9.14: Die Illusion des Steigfluges beim Durchstartverfahren

Diese Illusion entsteht überwiegend unter Instrumentenflugwetterbedingungen und beim Nachtflug. Sobald optische Reize außerhalb des Flugzeugs für die Beurteilung der Fluglage genutzt werden können, wird der falsche Eindruck über das Auge sofort korrigiert.

Die Illusion des Sinkens entsteht bei einer negativen Beschleunigung des Flugzeugs, wie z.B. beim Ausfahren der Sturzflugbremsen.

Dies führt zu einer Bewegung der Otolithen auf der Otolithenmembran nach vorn, was einer Senkung des Kopfes gleichkommt. Der Flugzeugführer hat jedoch den (falschen) Eindruck, dass sich die Flugzeugnase nach unten bewegt. Werden optische Informationsquellen für die Beurteilung der Fluglage nicht genutzt, wird eine Bewegung des Steuerknüppels nach hinten die Konsequenz sein. Beide Illusionen werden durch die Eingaben des Muskel-, Druck- und Tastsinns verstärkt, wie aus Abb. 9.15 hervorgeht.

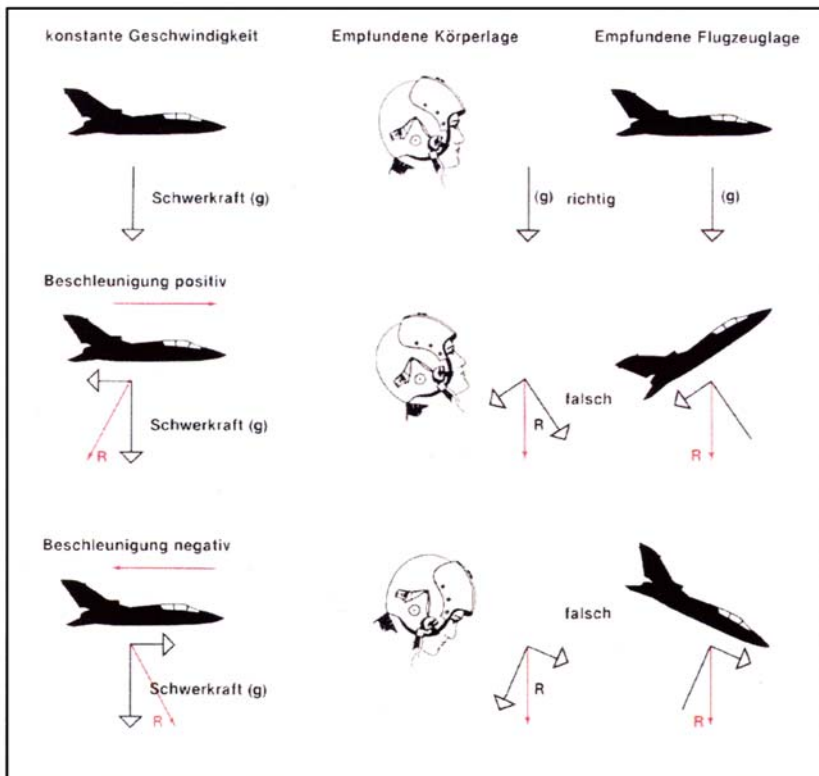


Abb. 9.15: Einfluss linearer Beschleunigung auf die räumliche Orientierung

Der Fahrstuhl-Effekt (Elevator Illusion)

Diese Form der Sinnestäuschung kann bei einer linearen Beschleunigung entstehen, die in der Vertikalen nach oben gerichtet ist. Durch die von den Otolithen ausgehenden Reize kommt es zu einer Kompensationsbewegung der Augen nach unten. Durch diesen Reflex soll eine weitere Beobachtung der Umgebung oder des Instrumentenbretts gewährleistet werden („im Auge behalten“). Da nunmehr die Augen nach unten gerichtet sind, hat der Flugzeugführer den Eindruck, dass sich die Flugzeugnase nach oben

bewegt und wird dies ohne Interpretation der Fluginstrumente in eine Bewegung des Steuerknüppels nach vorn umsetzen. Diese Sinnestäuschung erscheint bevorzugt bei Flügen durch Aufwindgebiete (Thermik), wenn optische Reize aus der Umgebung nicht vorhanden sind. Ist der Blick nach draußen gegeben, wird der Eindruck durch den Sehsinn überlagert und korrigiert.

9.4.2 Weitere Erscheinungsformen der Räumlichen Desorientierung

In der internationalen Militär- und Zivilluftfahrt sind außer diesen „klassischen“ Erscheinungsformen vestibularer Täuschungen noch eine Reihe weiterer Phänomene bekannt, die zu einer Fehlsteuerung aufgrund einer Fehlbeurteilung der Fluglage führen können. Da Englisch die internationale Fliegersprache ist, werden die Bezeichnungen dieser Phänomene im Original wiedergegeben.

Das Jet Upset Phenomenon

Diese Form der Sinnestäuschung ereignet sich überwiegend bei Einsatzprofilen, die teilweise mit aufgeschalteter automatischer Flugsteuerung (Autopilot) geflogen werden. Dies ist meistens bei Verkehrsflugzeugen und Transportflugzeugen der Fall. In den bisher bekannten Fällen hatte plötzlich ein Angehöriger der Besatzung oder auch die gesamte Crew den Eindruck, dass sich die Nase des Flugzeuges nach oben bewegte. In besonders krassen Fällen schilderten Flugzeugführer sogar den Eindruck, das Flugzeug habe sich bereits im Rückenflug befunden. Als Folge dieser (Fehl-) Interpretation der Fluglage wurde das Steuerhorn jeweils spontan so heftig nach vorn bewegt, dass das Flugzeug aus dem tatsächlichen Geradeausflug in einen steilen Sinkflug überging. Nach einer Zeit der Konfusion innerhalb der Besatzung über die tatsächliche Fluglage gelang es dann (in den gut ausgegangenen Fällen!), unter Einsatz erheblicher Steuerkräfte, das Flugzeug wieder in den Horizontalflug zu-

rückzubringen. Wie viele Unfälle auf dieses Phänomen zurückzuführen sind, ist statistisch nicht erfasst. Ermittelt sind jedoch die Begleitumstände, die zu einer derartigen Situation führen können:

- Instrumentenflugwetterbedingungen oder Nachtflug (Horizont nicht sichtbar);
- Einflug in schwere Turbulenzen;
- dadurch bedingt kurzzeitige Nichtlesbarkeit bzw. erschwerte Lesbarkeit der Instrumente;
- technische Mängel in der automatischen Flugsteuerung.

Das Break off-Phänomen

Hinter diesem in der internationalen Fliegerei bekannten Begriff verbirgt sich eine Situation, die als ein „Gefühl des Losgelöstseins“ oder des „Herausgelöstseins aus der Wirklichkeit“ beschrieben wird. Sie tritt überwiegend bei Einsatzprofilen von einsitzigen Kampfflugzeugen in Flughöhen über 30.000 ft (9.000 m) auf. Es sind aber auch Fälle bekannt, in denen Hubschrauberpiloten bereits in wesentlich niedrigeren Flughöhen unterhalb 1.000 ft sich „verlassen“ bzw. (von ihrer „Erdbundenheit“) „losgelöst“ fühlten. In allen Fällen scheinen Faktoren wie Monotonie in der Flugführung und Mangel an optischen Reizen die Intensität dieser Empfindungen zu beeinflussen. Ausserdem spielt offenbar das in großen Höhen atypische Flugverhalten vieler Flugzeugmuster eine Rolle, das zu einem gewissen Unbehagen des Flugzeugführers führen kann. Dieser Zustand wird als vergleichbar dem Gefühl, „auf einem Seil oder einer Nadelspitze zu balancieren“ beschrieben. Ein sich daraus entwickelnder Anstieg des Erregungsniveaus führt dann leicht zu einer Beeinträchtigung der Wahrnehmungsfähigkeit, so dass z.B. geringe Schräglagen überinterpretiert werden oder im Geradeausflug ein Kurvenflug empfunden wird. Daraus resultiert wiederum eine unnötige und u.U. gefährliche Steuerkorrektur. Einige Flugzeugführer versuchen dem „Losgelöstsein von der Umwelt“ mit häufigem (an sich überflüssigem) Funksprechverkehr zu begegnen, andere, indem sie sich von der Flugsicherung eine Flughöhe mit geringem vertikalen Abstand über einer Wolkendecke zuweisen lassen. Wiederholte derartige Angstzustände während des Fluges können sich zu einer regelrechten Phobie entwickeln.

9.5 Beitragende Faktoren

Eine Reihe von Faktoren begünstigt die Entstehung von Sinnestäuschungen oder verstärkt deren Wirkung. Eine vollständige Auflistung wird es nicht geben können, da neue fliegerische Einsatzprofile und neue Waffensysteme u.U. neue Formen der Sinnestäuschungen provozieren. Die Faktoren selbst ergeben sich aus den Umweltbedingungen, der technischen Struktur und der Cockpitkonfiguration des Luftfahrzeuges sowie aus der aktuellen psycho-physischen Verfassung des Flugzeugführers.

Nachtflug

Der Nachtflug begünstigt in besonderem Maße Sinnestäuschungen, wenn z.B. bei Sichtflügen in Wolken eingeflogen wird, die naturgemäß nicht zu sehen sind. Das gleiche gilt für den Einflug in Nebelbänke. Ferner kann es zu einer Irritation kommen, wenn natürliche Lichtquellen (Sterne, Mond) mit künstlichen Lichtquellen verwechselt werden. Besonders bei stark verglasten Flugzeugkabinen (z.B. F-16) kommt es zusätzlich noch zu Spiegeleffekten, da Lichtquellen aus dem Cockpit auf diesem Glas reproduziert werden.

Wechsel von Einflug in und Ausflug aus Wolken („in and out“)

Ständiger Wechsel von Einflug in Wolken und Ausflug aus Wolken führt dazu, dass der Flugzeugführer neben der optischen Wahrnehmung der Fluglageinstrumente zusätzlich solche in entsprechender Frequenz aus dem peripheren Sehfeld bezieht. Dies können sowohl Wol-

ken- als auch Landschaftsbilder sein. Daraus kann sich in der Beurteilung der Fluglage eine Konfliktsituation ergeben, die noch durch ständige Hell - Dunkel- Lichteffekte verstärkt wird.

Einschränkung der Flugsicht

Sichteinschränkungen durch Regen, Schnee, Sonnenstand, Dunst und Nebel können die räumliche Orientierung ebenso beeinträchtigen wie die Nichteinschätzbarkeit des natürlichen Horizonts. Unter Sichtflugwetterbedingungen führen neben dem Bezugspunkt auf der Steurkurslinie vor dem Flugzeug auch Wahrnehmungen innerhalb des peripheren Sehfeldes unbewusst zur Orientierung. Da diese bei Rückgang der Flugsicht immer mehr verloren gehen, wird eine Orientierung immer schwieriger, bis sie dann im Stadium eines „Röhrensehens“ (tunnel vision) nicht mehr möglich ist (Abb. 9.16).

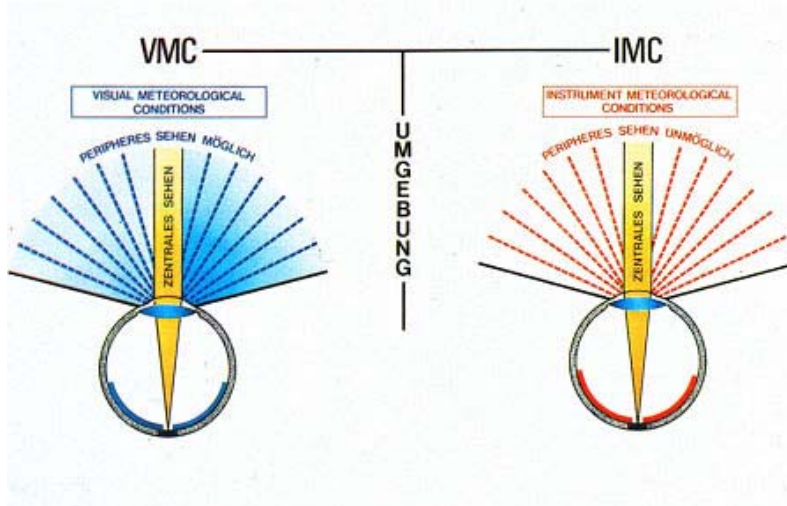


Abb. 9.16: Informationsangebot bei unterschiedlichen Flugsichtbedingungen

Die Entscheidung zum Umkehren muss also rechtzeitig fallen, wenn eine kritische Flugsituation vermieden werden soll.

Eine Fortsetzung des Fluges nach Instrumentenflugregeln ist als „Patentlösung“ nicht immer möglich, da sie die Ausbildung des Flugzeugführers im Instrumentenflug, eine Ausrüstung des Luftfahrzeuges für den Instrumentenflug sowie bestimmte meteorologische Bedingungen voraussetzt.

Übergang vom Sichtflug zum Instrumentenflug (VFR-IFR Transition)

Der Übergang vom Sichtflug zum Instrumentenflug erfordert eine gewisse Eingewöhnungszeit. Diese wird einerseits von der Latenzzeit bestimmt, die der Ziliarmuskel des Auges für die Fern- oder Nahakkommodation der Linse benötigt, andererseits von der Dauer des mentalen Prozesses der Orientierung auf dem Instrumentenbrett. Es ist daher verständlich, dass Sinnestäuschungen und Anzeichen von räumlicher Desorientierung besonders häufig beim raschen, nicht geplanten Einflug in Instrumentenflugwetterbedingungen auftreten.

Diese Erkenntnis wird abgesichert durch eine im Auftrag von General Flugsicherheit in der Bundeswehr erstellten Studie über kritische Flugsituationen und Beinahe-Unfälle („Faktor Mensch“, April 1982). Hiernach ereigneten sich im Flugbetrieb von Kampfflugzeugen 72 % aller Fälle von Desorientierung und im Bereich Hubschrauberflugbetrieb sogar 87,5 % aller Fälle beim überraschenden Einfliegen in Instrumentenflugwetterbedingungen während eines geplanten Sichtfluges.

Das „Flicker Light Vertigo“

Das Flicker Light Vertigo kann beim Fliegen mit Hubschraubern oder auch einmotorigen Propellerflugzeugen entstehen, wenn das Sonnenlicht- oder das Licht einer künstlichen Lichtquelle in der Frequenz der Rotor- bzw. Propellerdrehzahl unterbrochen wird und damit im Cockpit und auf dem Instrumentenbrett Hell-Dunkel-Reflexe in der gleichen Frequenz erzeugt werden. Diese können bei Besatzungsmitgliedern Reaktionen wie Nervosität, Übelkeit und Brechreiz, Kopfschmerzen und Benommenheit auslösen. Im weiteren Verlauf folgen Schwindel und räumliche Desorientierung. In besonders schweren Fällen kann es bei längerer Exposition zu Reaktionen ähnlich denen von epileptischen Anfällen oder zum Bewusstseinsverlust kommen. Müdigkeit und Frustration scheinen nach bisherigen Erkenntnissen die individuelle Symptomatik ebenso zu begünstigen wie Hypoxie, Hypoglykämie und Hyperventilation. Folgende Maßnahmen können die Reaktion verringern bzw. ausschalten:

- vorübergehende Änderung der Flugrichtung aus der Lichtquelle heraus,
- Änderung der Rotor- oder Motordrehzahl,
- Tragen von nicht polarisierenden Sonnenbrillen,
- Schalten der Positionslichter auf Dauerbetrieb („Steady“),
- Ausschalten der Scheibenwischer.

Psychologische Faktoren

Aus *Abb. 9.17* geht hervor, wie sich aus psychologischer Sicht ein derartiger „Überraschungseffekt“ auf die Wahrnehmungs- und Handlungsfähigkeit auswirken kann.

Er löst zunächst einen Anstieg des Erregungsniveaus aus. Das Ausmaß des Anstiegs kann durch zusätzliche Stressoren sowohl vor Antritt des Fluges als auch während des Fluges beeinflusst werden. Als Beispiele seien genannt: Belastungen durch andere Aufgaben, Alarmierung (SAR/QRA) oder auch durch psychisch-emotionale Belastungen aus dem sozialen Umfeld. Während des Fluges können Faktoren wie Informationsmangel oder Informationsüberladung, Konflikte innerhalb der Crew sowie spezifische Umweltfaktoren wie Lärm, Vibration, Turbulenzen und G-Kräfte den Anstieg des Erregungsniveaus begünstigen. Dieses kann zu Abweichungen von üblichen Wahrnehmungs- und Handlungsweisen führen. Widersprüchliche Informationen durch unterschiedliche Informationsquellen (Gefühl - Umgebung - Instrument) führen zu einem weiteren Anstieg des Erregungsniveaus mit anschließenden Einbußen der Wahrnehmungsfähigkeit bis hin zum „Kanalisieren“, d.h. extremer Einengung derselben.

Entschließt sich der Flugzeugführer nun zu einer Steuerkorrektur, so wird diese oft nicht situationsgerecht dimensioniert, da auch der feinmotorische Bewegungsapparat durch den Grad der Erregung beeinflusst wird. Häufig handelt es sich dann um eine Fehlsteuerung in Form einer Überreaktion:

„Herumreißen des Steuerhorns“, „Durchziehen des Steuerknüppels“, abrupte Bewegung am Blattverstellhebel, können in extremen Fällen zum Verlust der Kontrolle über das Flugzeug führen. Schließlich kann es sogar zu einer Handlungsblockade kommen („vor Schreck gelähmt“), d.h., dass - bei vollen Erkennen der Notwendigkeit - eine Korrekturbewegung mit den Steuerorganen überhaupt nicht mehr durchgeführt wird.

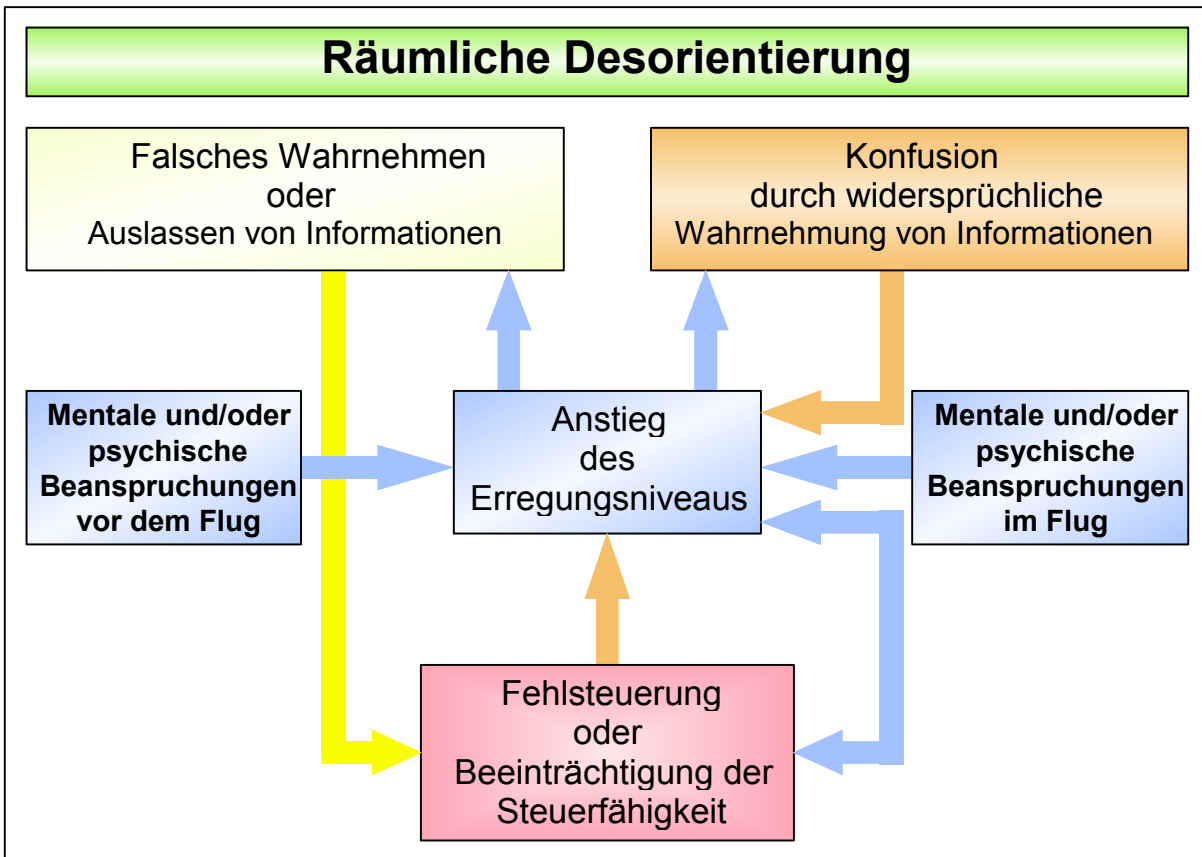


Abb. 9.17: Steuergröße „Erregungsniveau“ bei der räumlichen Desorientierung

Als weiterer psychologischer Faktor ist auch eine sehr hohe Motivation zu nennen und daraus folgend ein selbst auferlegter Erfolgszwang. Dieser kann noch gesteigert werden durch Erfolgszwänge, die von dem Auftragserteilenden mit „auf den Flug“ gegeben werden oder durch den „Druck“ durch (z.B. höherrangige) Mitflieger während des Fluges.

Erkrankung der oberen Atemwege

Die Erkrankung der oberen Atemwege kann das Zustandekommen des Druckausgleichs beeinträchtigen oder unmöglich machen. Der dann entstehende „ear block“ begünstigt in starkem Maße einen Drehschwindel und kann im weiteren Verlauf häufig zu Übelkeit und Brechreiz führen. Wenn mit Hilfe des VALSALVA'schen Handgriffs der Druckausgleich nicht hergestellt werden kann, muss von einem Flugvorhaben abgesehen werden und zwar in allen Einsatzprofilen.

Selbstversorgung mit Medikamenten

Die Selbstversorgung mit Medikamenten durch Flugzeugführer kann zu besonders schweren Fällen von räumlicher Desorientierung führen, vor allem, wenn es sich um Medikamente handelt, deren Gebrauchsinformation bereits über Nebenwirkungen wie Beeinträchtigung des Sehannes, Drehschwindel, Übelkeit und Brechreiz sowie Müdigkeit Aufschluss geben (vgl. Kapitel 14). Da ein Flugzeugführer wie jeder andere Bürger über moderne Medien die gewünschten Primäreffekte von Medikamenten kennt, die für die fliegerische Tätigkeit ungünstigen Nebenwirkungen jedoch sehr selten, ist die Selbstversorgung mit Medikamenten für Lfz-Besatzungsangehörige der Bundeswehr gemäß Anlage 8 der ZDv 19/2 („Flugbetriebsordnung für die Bundeswehr“) verboten.

Müdigkeit, Erschöpfung und „Hangover“

Müdigkeit, Erschöpfung und „Hangover“ erhöhen ebenfalls die Anfälligkeit für räumliche Desorientierung. Während die Müdigkeit eine Rolle spielt, wenn der Flug zu ungünstigen Zeiten innerhalb des zircadianen Rhythmus (vgl. Kap. 13) abläuft, ist unter der Erschöpfung die sog. „mission fatigue“ zu verstehen, die sich aus der Länge der Flugdienstzeit und der damit verbundenen Erschöpfung auch von Sinnesorganen ergibt.

Der „Hangover“ (Kater) als Folge übermäßigen Alkoholgenusses begünstigt eine Sinnestäuschung ausgesprochen stark. In Simulatorversuchen konnte nachgewiesen werden, dass noch bis zu 48 Stunden nach (reichlichem) Alkoholgenuss das räumliche Orientierungsvermögen gestört sein kann.

Cockpitkonfiguration

Die Cockpitkonfiguration sollte aufgrund der Erkenntnisse der Ergonomie heutzutage keine Ursache für Desorientierung mehr sein. Dennoch kann eine ungünstige Anordnung von wichtigen Bedienelementen den Flugzeugführer zu Kopfbewegungen veranlassen, die Sinnestäuschungen begünstigen. Ebenfalls kann die Struktur der Frontscheibe eine Konfusion in der Beurteilung der Fluglage herbeiführen, wenn z.B. Teile des Rahmens als mit dem natürlichen Horizont parallel laufend interpretiert werden. Sowohl Informationsüberladung als auch Informationsmangel in der Aussage von Fluglageinstrumenten können die räumliche Orientierung erschweren.

Vibrationen und Trägheitskräfte

Starke Vibrationen eines Hubschraubers, die durch die Hauptrotorkonstruktion bedingt sind (z.B. Bell UH-1 D) führen zum Mitschwingen von Fluglageinstrumenten und Bulbus und erschweren die Interpretation der Fluglage. Trägheitskräfte dagegen irritieren das Gleichgewichtsorgan (siehe oben), was zu besonders schwerwiegenden Fällen von räumlicher Desorientierung führen kann (vgl. die Kapitel 6 und 11).

9.6 Hilfen zum Umgang mit räumlicher Desorientierung

Schließlich sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie räumliche Desorientierung vermieden oder überwunden werden kann. Als Vorbeugung ist die gründliche Kenntnis der psychophysischen Zusammenhänge erste Voraussetzung. Dies wird durch flugphysiologische Ausbildung und ständiges Auffrischen der Inhalte gewährleistet. Ferner muss sich ein Flugzeugführer vor Antritt eines Fluges bewusst sein, dass Sinnestäuschungen eintreten können, und zwar unabhängig von der fliegerischen Erfahrung. Der Flug darf nur im Vollbesitz von körperlicher und geistiger Leistungsfähigkeit angetreten werden. Ausbildung und ständige Inübunghaltung im Instrumentenflug müssen gewährleistet sein.

Während des Fluges muss bei Verschlechterung der Flugsicht zur Vermeidung von Desorientierung rechtzeitig in den Instrumentenflug übergegangen werden. Ein Wechsel vom Instrumentenflug zurück auf den Sichtflug oder ein häufiges Wechseln zwischen beiden Verfahren sollte vermieden werden. Ist die Fortsetzung des Fluges nach Instrumenten nicht möglich (Ausbildung/Ausrüstung/ Wetter), muss rechtzeitig der Entschluss zum Umkehren bzw. Ausweichen gefasst werden. (Der Hubschrauberführer hat zusätzlich die Möglichkeit einer Außenlandung). Ausgefallene Fluglageinstrumente sollten nach Möglichkeit abgedeckt werden, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Größere Kopfbewegungen sollten vermieden werden. Gerät ein Flugzeugführer dennoch in eine Sinnestäuschung, muss er zu deren Überwindung ausschließlich die Fluglageinstrumente benutzen. Wichtig ist, dass er deren Aussage und Funktionsgenauigkeit mehr Glauben schenkt als seinem „Gefühl“ („Trust your instruments!“). Wenn möglich, sollen die Steuerorgane dem Co-Piloten übergeben werden.

Ein vorübergehender Geradeausflug führt häufig aus einer Sinnestäuschung heraus. Nur eine ständige Auseinandersetzung mit der Problematik der räumlichen Desorientierung kann dazu beitragen, dass Sinnestäuschungen nicht zu an sich vermeidbaren Flugunfällen führen.

9.7 Verwendete und weiterführende Literatur

Benson, A.J. Spatial disorientation – common illusions. In: Ernsting, J., Nicholson, A. N., Rainford, D. J. (eds) Aviation medicine, part 3: operational aviation medicine, chap 32, repr., 3. ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000

Benson, A. J. Spatial disorientation – general aspects. In: Ernsting, J., Nicholson, A. N., Rainford, D. J. (eds) Aviation medicine, part 3: operational aviation medicine, chap 31, repr., 3. ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000

Gillingham, K. K. Spatial orientation in flight. Armstrong Laboratory, Arlington, (Technical report, 1993-0022), 1993

Watson, D. Spatial orientation and disorientation during flight. CAA Aviation Bulletin (2), 1992

10 Luftkrankheit

10.1 Einführung

Der Begriff Luftkrankheit beschreibt einen akut auftretenden Symptomenkomplex aus unterschiedlich ausgeprägten und unterschiedlich kombinierten Einzelsymptomen in einem Luftfahrzeug. Die Luftkrankheit stellt somit eine Untergruppe des im allgemeinen als Bewegungskrankheit oder Kinetose bezeichneten Krankheitsbildes dar. Im englischen Sprachgebrauch wird von „Motion Sickness“ gesprochen. Je nach Fortbewegungsmittel wird von Reisekrankheit, Weltraumkrankheit, Luftkrankheit, Seekrankheit, Simulatorkrankheit oder Autofahrerkrankheit gesprochen. Der Begriff Nausea für den klinischen Symptomenkomplex kommt aus dem Griechischen. Die Seefahrernation der alten Griechen nannte erstmals die Seekrankheit Nausea (Naus = Schiff, Nausea = Übelkeit).

10.2 Definition

Die Luft- oder Bewegungskrankheit zeichnet sich durch ein Schwindelgefühl mit und ohne Übelkeit bei Gesunden aus, hervorgerufen durch eine reale oder scheinbare Bewegungsempfindung, die der Person unbekannt oder an die sie nicht adaptiert ist.

10.3 Symptome

Die Luftkrankheit entwickelt sich über Anfangssymptome wie körperliches Unbehagen, Schwindel, Müdigkeit und Blässe. Mit zunehmendem Schweregrad können kalter Schweiß, vermehrter Speichelfluss, Geruchsempfindlichkeit, Kopfschmerzen, Druckgefühl im Bauch und schließlich als zentrale Symptome Nausea, Würgereiz und Erbrechen mit motorischen Koordinationsstörungen, Antriebs- und Konzentrationsverlust bis hin zur Apathie und Vernichtungsangst folgen. Die Rückbildung der Symptome erfolgt innerhalb von Stunden nach Beendigung des auslösenden Reizes. In Einzelfällen können die Symptome aber auch 1-3 Tage anhalten. Begleitende Symptome wie Schläfrigkeit, Konzentrationsschwäche oder verminderte Leistungsfähigkeit können aber auch länger vorhanden sein.

10.4 Physiologische und physikalische Grundlagen

Für die Orientierung im Raum, die Wahrnehmung der Eigen- oder Fremdbewegung sowie für die eigene Körperhaltung stehen dem Menschen maßgeblich drei Systeme zur Verfügung. Dies sind:

1. das visuelle System
2. das Vestibularsystem
3. das somato-sensorische oder propriozeptive System.

Die Physiologie des Sehens wird ausführlich im Kapitel 8 beschrieben. Im folgenden soll nur kurz noch einmal auf das Vestibularsystem sowie das propriozeptive System im Zusammenhang mit der Luftkrankheit eingegangen werden.

Der Vestibularapparat:

Das Vestibularorgan besteht aus einem beidseitigen häutigen Gangsystem. Es untergliedert sich in jeweils drei Bogengänge (Ductus semicirculares) und zwei sackartige Erweiterungen (Sacculus und Utriculus) die das Otolithenorgan bilden. Die Bogengänge gehen mit einem ampullenartig erweiterten Schenkel vom Utriculus ab und bilden etwa 2/3 eines Kreisbogens. Der etwa 3 mm große, ovale Utriculus trägt an seinem Boden die Macula Utriculi, sein Sinnesepitel. Jede Sinneszelle trägt mehrere Sinneshärchen (Stereocilien) und ein Kinocilium. Dieses Kinocilium ist besonders dick und größer als die Stereocilien. Die Sinneshaare

ragen in eine gallertartige Masse hinein. In der obersten Schicht dieser Gallertmasse finden sich die sog. Otolithen. Diese sind bis zu 15 µm große Kristalle, die vorwiegend aus Kalziumcarbonat bestehen.

Linearbeschleunigungen stellen für die Mechanorezeptoren der Macula den adäquaten Reiz dar. Linearbeschleunigungen bewirken eine Verschiebung der Otolithenmembran und somit zu einer Scherung der Sinneshärchen. Diese Scherung stellt den eigentlichen Reiz dar. Eine starke lineare Beschleunigung kann so z.B. die Neigung des Kopfes vortäuschen (z.B. Katalpultstart vom Flugzeugträger.).

Die drei Bogengänge des Vestibularorgans repräsentieren die drei Ebenen des Raumes. Sie sind senkrecht zueinander angeordnet. Jedes Bogengangsorgan hat eine Aussackung, die Ampulle, in der die Sinneshärchen in eine gallertartige Cupula hineinragen. Für den Vestibularapparat stellen Drehbeschleunigungen den adäquaten Reiz dar. Dabei bleibt die träge Endolymphe hinter den Drehbewegungen der sie umgebenden knöchernen Bogengänge zurück. Die Cupula wird von ihrer Neutralstellung ausgelenkt. Nach Ende der Drehbeschleunigung kehrt die Cupula aufgrund ihrer Elastizität wieder in ihre Ausgangslage zurück.

Zur Wahrnehmung einer Drehung muss ein überschwelliger Reiz erfolgen. Die Reizschwelle liegt bei einer Winkelbeschleunigung von etwa 0,5 - 2 °/s². Eine Drehbeschleunigung wird durch eine gegenläufige Entladungssequenz der Sinneshärchen auf den beiden Seiten angezeigt. Auch hier wirken Scherkräfte auf die Sinneshaare. Reizrichtung und Größe verändern die Entladungsfrequenz und übermitteln so den Drehreiz.

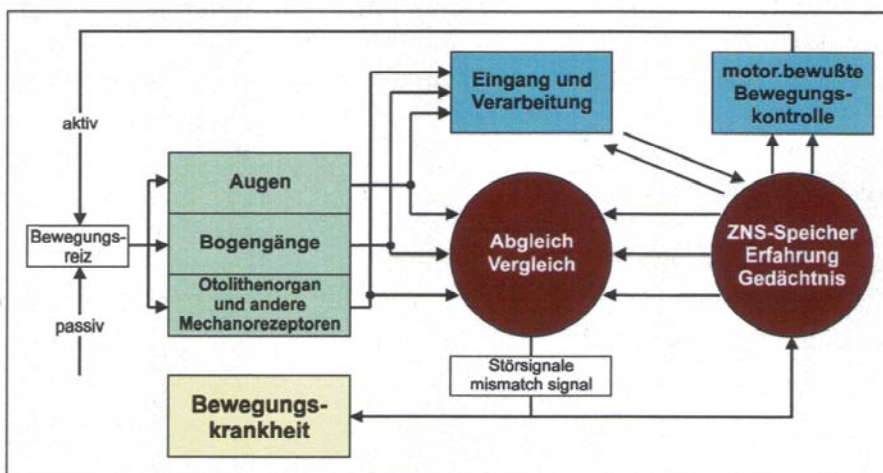


Abb. 10.1: Zur Störsignaltheorie der Bewegungskrankheit

Das propriozeptive System besteht aus vielen, im ganzen Körper vorhandenen Rezeptoren, die uns Informationen über Druck, Spannung und Aufrichtung von Haut, Muskeln, Sehnen und Gelenken übermitteln. Es ist für unser Lageempfinden das am wenigsten wichtige System, sofern wir über unsere

Augen und über unser Vestibularorgan entsprechende Lageinformationen zur Verfügung gestellt bekommen.

10.5 Entstehungstheorie/Pathogenese

Die Entstehung der Kinetose ist ein sehr komplexes und auch heute noch nicht völlig geklärtes Geschehen. Neben den exogenen Faktoren wie Beschleunigungsreizen bzw. optokinetischen Reizen spielen Disposition, Habituation sowie Umweltbedingungen wie Lärm und Vibration oder intraindividuelle Faktoren wie Nahrungsaufnahme, Alkohol- oder Drogenkonsum eine wichtige Rolle.

Für die Auslösung einer Kinetose ist das Vorhandensein eines intakten Vestibularapparates unumgänglich. Die Entstehungstheorien für das Auftreten von Kinetose haben sich im Laufe der letzten Jahrzehnte weiter entwickelt. Neben der reinen Bogengangskinetose z.B. hervor-

gerufen durch den Corioliseffekt (cross coupled acceleration) bei dem auf einen sich bewegendem Körper Trägheitskräfte in einem rotierenden Bezugssystem einwirken, wird heute die Theorie des sensorischen Konfliktes (sensory conflict concept) für die Entstehung einer Kinetose verantwortlich gemacht.

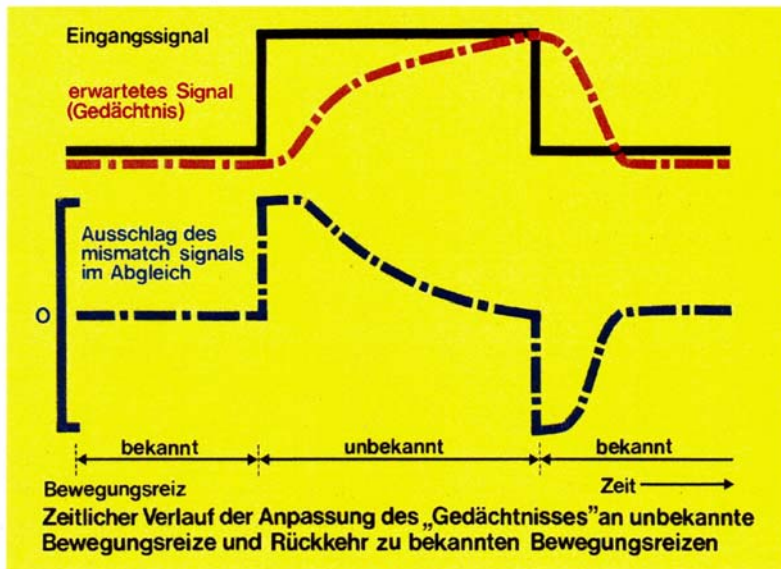


Abb. 10.2: Zeitlicher Ablauf der Anpassung des „Gedächtnisses“ an unbekannte Bewegungsreize und Rückkehr zu bekannten Bewegungsreizen

Bei dieser Theorie wird von einem Ungleichgewicht der Bewegungs- und Lageinformation ausgegangen, die durch das Auge, den Vestibularapparat oder das propriozeptive System übermittelt werden. Jeder unserer Bewegungsabläufe wird mit einem im zentralen Nervensystem gespeicherten Erwartungsmuster verglichen und entschieden, ob diese mit den Lageinformationen unserer Sinnesorgane übereinstimmen. Zeigt sich hierbei ein Konflikt oder Widerspruch zwischen den Informationen der einzelnen Sin-

nesorgane und unserer im zentralen Nervensystem gespeicherten Erwartungshaltung, kann es zu der Wahrnehmung von Scheinbewegungen, Orientierungsstörungen und schließlich zur Bewegungskrankheit kommen. Dieser Konflikt oder „Mismatch“ stellt ein Störsignal dar. Abhängig von der Stärke dieses Störsignales kann es zur Auslösung einer Kinetose kommen. Bei einer wiederholten Erzeugung dieses Störsignales durch einen sensorischen Konflikt kann es zu einer Adaptation an die neue Bewegung kommen. Dieser Reiz wird dann in den Pool der zentral-nervösen Erwartungsmuster integriert und so eine Verminderung der Kinetoseanfälligkeit erzeugt. Diese Anpassungsfunktion findet auch in dem sog. Anti-Airsickness-Trainingsprogramm seine Anwendung. Der Erfolg liegt hier bei 60 %.

Für die möglichen auftretenden Konfliktsituationen können zwei Haupttypen unterschieden werden.

A) VESTIBULÄR-VESTIBULÄRER KONFLIKT

- Bogengang-Bogengang Konflikt
- Bogengang-Otolithen Konflikt
- Otolithen-Bogengang Konflikt
- Otolithen-Otolithen Konflikt

b) visuell-vestibulärer Konflikt

- visuell-vestibulärer Konflikt
- vestibulär-visueller Konflikt

Bei jedem der beiden Konfliktsituationen können zwei Typen des Ungleichgewichtes auftreten.

1. Beide Systeme liefern gleichzeitig sich widersprechende oder nicht zueinander in Beziehung stehende Informationen.
2. Ein System liefert Informationen, das zweite jedoch nicht, obwohl es aufgrund des Erfahrungsspeichers erwartet wird.

Im folgenden wird nun kurz auf die verschiedenen Konfliktsituationen der beiden Hauptgruppen eingegangen.

10.5.1.1 Vestibulär-vestibulärer Konflikt

Da das Vestibularsystem in ein Rezeptorensystem für Winkelbeschleunigungen durch die Bogengänge und für Linearbeschleunigungen in der Schwerkraft durch das Otolithenorgan aufgeteilt ist, kann es hier durch verschiedenste Erregungsinformationen zu Konflikten über die Bewegung und Lage im Raum kommen.

10.5.1.1.1 Bogengang-Bogengang Konflikt

Der Bogengang-Bogengang Konflikt tritt bei einer gleichzeitigen Rotation um mehr als eine Achse auf (Coriolis-Stimulation). Dieses passiert, wenn ein Individuum um eine bestimmte Achse gedreht wird, seinen Kopf dann aber in eine andere Bewegungsebene bringt. Diese kombinierte Winkelbeschleunigung (cross-coupled acceleration) ist besonders heftig, wenn die Kopfbewegung erst nach einer langen Phase konstanter Winkelgeschwindigkeit durchgeführt wird. Der Corioliseffekt tritt auf, weil nach einer langen Zeit gleichförmiger Winkelgeschwindigkeit das entsprechende Bogengangsorgan wieder zur Ruhe gekommen ist und bei einer Lageänderung des Kopfes in eine andere Ebene eine gleichzeitige heftige Stimulation aller drei Bogengangsorgane mit Beschleunigung und Verzögerung erfolgt. Je nach eingenommener Haltung kann es zu den verschiedensten Bewegungsempfindungen kommen.

Ein anderes wichtiges Beispiel für eine reine Bogengangsbeteiligung stellt die Schwindelempfindung aufgrund der Einnahme von Alkohol dar. Dieses ist besonders in der Fliegerei aufgrund der langen Nachwirkzeit des Alkohols zu beachten.

10.5.1.1.2 Otolithen-Bogengang Konflikt

Während einer kombinierten Bogengangsstimulation i. S. des Corioliseffektes dauert es etwa 10 s bis die Cupula wieder ihre Neutralposition eingenommen hat. Während dieses Zeitraumes gibt aber das Otolithenorgan die wahre Position des Kopfes in Beziehung zur Schwerkraft wider. Es kommt damit zu widersprüchlichen Signalen von Otolithenorgan und Bogengängen. Ein anderes wichtiges Beispiel ist die Kinetose, die durch Oszillation um lineare Beschleunigungsreize ausgelöst wird. Dieses kann durch Fliegen in Turbulenzen oder vertikale Windböen ähnlich wie das Stampfen eines Schiffes in rauher See als Ursache haben. Hierbei kommt es zu sich dauernd verändernden Kraftvektoren aufgrund von Erdbeschleunigung und Linearbeschleunigung unterschiedlichster Richtung und Größe ohne korrelierende Informationen der Bogengangsorgane.

10.5.1.1.3 Bogengang-Otolithen Konflikt

Diese Konflikte stellen besonders unter den Bedingungen veränderter Schwerkraft ein Problem dar. Unter veränderten Schwerkraftbedingungen sind die Bogengangsorgane zwar in der Lage, Drehbewegungen wahrzunehmen, das Otolithenorgan ist jedoch nicht in der Lage, die richtige Schwerkraftinformation des Kraftvektors zu vermitteln. Die von dem Otolithenorgan vermittelte Information entspricht nicht der Erwartungshaltung unseres zentralnervösen Erfahrungsspeichers. Hinzu kommt noch ein Konflikt mit dem visuellen System, vermittelt durch die jeweilige Neigung des Netzhautbildes, das durch das Otolithenorgan nicht bestätigt werden kann.

10.5.1.1.4 Otolithen-Otolithen Konflikt

Für das Entstehen der Raumkrankheit wird nicht nur der oben beschriebene Bogengang-Otolithen Konflikt sondern auch der sog. Otolithen-Otolithen Konflikt verantwortlich gemacht. Ausgehend von einer gewissen Ungleichheit unseres Vestibularorgans auf beiden Seiten des Kopfes wird angenommen, dass das Gewicht der Kalziumkristalle des rechten und linken Otolithensystems unterschiedlich ist. Unter den Bedingungen der Erdschwerkraft wird dieser Unterschied aufgrund von Erfahrung und einem kompensatorischen Zentrum ausgeglichen. Unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit muss dieser Ausgleich aber versagen. Daher kommt es zu unterschiedlich großen Reizinformationen aus den beiden Otolithenorganen. Der daraus entstehende Konflikt kann für die Entstehung der Raumkrankheit verantwortlich sein.

10.5.1.2 Visuell-vestibulärer Konflikt

Der zweite große Komplex umfasst den visuell-vestibulären Konflikt. Dieser Konflikt wird ausgelöst durch unzusammenhängende oder unverträgliche Bewegungssignale des visuellen und des vestibulären Systems, die nicht mit bekannten Erfahrungen in Einklang zu bringen sind. Dies kann zu schweren Bildern von Bewegungskrankheit führen. Im Gegensatz zu der früheren Annahme, dass visuelle Einflüsse nur einen modulierenden Faktor auf die Empfänglichkeit für Bewegungskrankheiten darstellen, weiß man mittlerweile, dass auch in Abwesenheit wirklicher Bewegung Kinetose visuell erzeugt werden kann. Eine weitere Möglichkeit der Konflikterzeugung zwischen visuellem und vestibulärem System besteht darin, dass in einer Situation beide Systeme gleichzeitig gegenläufige Bewegungsinformationen liefern. Dies ist z. B. der Fall beim Lesen in einem sich bewegenden Fahrzeug. Für die Fliegerei

	Anfälligkeit für Kinetosen	
	gering	hoch
Verteilung	Ca. 75-85 %	ca. 15-25%
Erkrankung bei	<ul style="list-style-type: none"> • starker Reizexposition • grobes Wetter • Kunstflug 	<ul style="list-style-type: none"> • geringer Reizexposition • ruhiges Wetter • Geradeausflug
Konditionierung durch	<ul style="list-style-type: none"> • Vertrautheit mit Flugbewegungen und deren Antizipation • Vertrauen in das Luftfahrzeug (Abbau von Angst und Furcht) • Konzentration auf Instrumente, Vorschriften, fliegerische Anforderung • aktives Fliegen • Ablenkung (insbesondere von der Beobachtung der Vorgänge im eigenen Körper) 	
keine Konditionierung möglich	„vegetative Labile“ Reizüberempfindlichkeit der Sinnesorgane (Otolithenapparat, Bogengänge, etc.)	
Konsequenz	Grund für Abbruch einer fliegerischen Ausbildung wegen schwerer oder wiederholter Luftkrankheit bei etwa 2-3% der Flugschüler	

Abb. 10.3: Die Anfälligkeit für Kinetosen

wäre hier das Beispiel des Waffensystemoffiziers, der seine Karte im hinteren Cockpit liest, zu nennen. Es handelt sich hierbei um eine rein optokinetische Bewegung, die nicht durch Bewegungsinformation auf den Vestibularapparat unterstützt wird. Der visuell vermittelte Zustand der Selbstbewegung kann nicht von wirklicher Bewegung unterschieden werden. Daher kommt es zu einer Divergenz zwischen visuellem und vestibulärem System. Die Intensität dieses Stimulus kann durch zusätzliche Kopfbewegungen noch weiter verstärkt werden. Diese Situation stellt damit das visuell erzeugte Gegenstück des Corioliseffektes dar, der als optokinetischer oder „Pseudo-Corioliseffekt“ bezeichnet wird. Als praktisches Beispiel für das Auftreten von dem visuell-vestibulären Konflikt ist die Wahrnehmung von Bewegung in stationären Simulatoren durch ein Sichtsystem ohne entsprechendes Gegenstück der wirklichen Bewegung

für das Vestibularsystem. Die dort auftretende Kinetose wird als Simulatorkrankheit bezeichnet.

net. In diesem Falle erfüllt nur das visuelle System unsere zentralnervöse Erwartungshaltung. Vestibuläre und propriozeptive Informationen sind damit nicht in Einklang zu bringen. Erfahrung spielt bei dem Entstehen einer Simulatorekrankheit scheinbar auch eine Rolle. Piloten mit großer Flugerfahrung leiden häufiger an der Simulatorekrankheit als Personen, die keinerlei wirkliche Flugerfahrung besitzen.

10.5.1.3 Vestibulär-visuelle Konflikte

Hierbei kommt es zu einem Konflikt zwischen dem Fehlen eines visuellen Signales bei gleichzeitiger vestibulärer und propriozeptiver Stimulation durch ein sich bewegendes Transportmittel. Dieser Konflikt tritt vorwiegend bei passivem Transport mit eingeschränkter oder nicht vorhandener Außensicht auf. Als Beispiele können hier U-Boote, Schiffe oder Flugzeuge ohne Fenster, wie z. B. Transportflugzeuge genannt werden. Das Entstehen einer Kinetose ist ein multifaktorielles Geschehen. Bisher ist eine Vorhersagbarkeit über die Kinetoseempfindlichkeit eines Individuums kaum möglich.

Wer seekrank wird, muss nicht unbedingt luft- oder auch autokrank werden. Die Kinetoseanfälligkeit eines Individuums mag einer gewissen Prädisposition unterliegen.

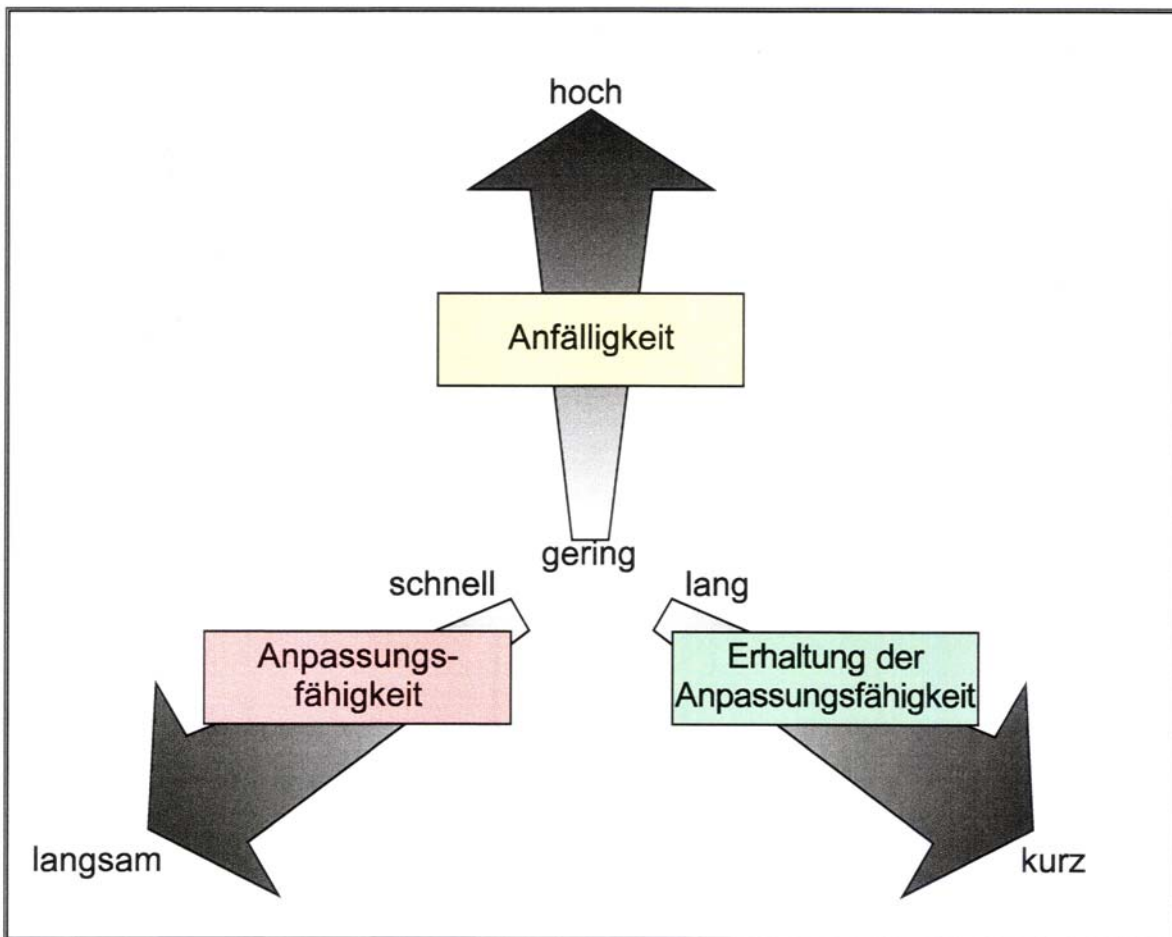


Abb.10.4: Die drei Faktoren, die die Luftkrankheit beeinflussen

Die Kinetoseanfälligkeit ändert sich im Laufe unseres Lebens. Bis zum 2. Lebensjahr wird die Bewegungskrankheit sehr selten beobachtet. Mit der Reifung des Kindes steigt die Anfälligkeit bis zu einem Gipfel um das 10. - 13. Lebensjahr an, danach nimmt sie wieder ab. Im höheren Alter etwa nach dem 50. Lebensjahr wird sie ebenfalls nur noch selten beobachtet. Dies mag darin begründet liegen, dass Kleinkinder das visuelle System nur in begrenztem

Umfang zur dynamischen Raumorientierung nutzen und somit für den optisch-vestibulären Konflikt weniger anfällig sind.

Frauen scheinen gegenüber Männern eine stärkere Kinetoseneigung zu besitzen. Neben der Auslösung einer Kinetose durch den zugrundeliegenden sensorischen Konflikt wird die Kinetoseanfälligkeit noch durch weitere Faktoren beeinflusst. Eine dieser Faktoren scheint die mentale Aktivität zu sein. Wird während eines Bewegungsreizes eine geistige Konzentration von einem Individuum abverlangt (z. B. Kommunikation mit der Flugführung, Durchführung von navigatorischen Berechnungen, Vorbereiten eines Waffeneinsatzes etc.) so wird die Anfälligkeit für eine Kinetose dadurch gesenkt. Übelkeit und Erbrechen sind häufig mit Furcht und Angst verknüpft. So kann alleine die Angst vor dem Erbrechen eine verstärkte Kinetoseneigung durch Konditionierung hervorrufen.

Bei Flugschülern z.B. stellt sich eine Konditionierung für Luftkrankheit derart ein, dass diese Flugschüler bereits am Boden allein durch den Geruch von Kerosin oder den Geruch ihrer Sauerstoffmaske Kinetosesymptome zeigen können. Weiterhin kann die Einnahme von Medikamenten, Alkohol oder Drogen die Kinetoseanfälligkeit negativ beeinflussen. Besonders in der Fliegerei muss daher auf die Vermeidung solcher Störfaktoren geachtet werden.

10.6 Vorbeugung und Therapie

So individuell wie die Gründe für das Auftreten einer Kinetose, so individuell muß Vorbeugung und Therapie der Luftkrankheit gestaltet sein. Neben dem Ausschluss externer Störgrößen wie bereits oben angesprochen, muss jeder für sich oder mit Hilfe von Dritten Mechanismen erlernen, die der Luftkrankheit entgegen wirken. Dies kann geschehen z. B. durch die Veränderung der Sitzhaltung (z. B. Transport im Liegen, Halbliegen oder Sitzen) und der Sitzrichtung (in Fahrtrichtung oder entgegengesetzt, Augen offen oder geschlossen, Blick nach innen oder außen, lesen oder nicht lesen). Der an der Luftkrankheit Leidende wird im Laufe der Zeit für sich selbst das beste Verhaltensmuster herausfinden. Für alle, die an der Luftkrankheit leiden, gilt aber: So wenig Kopfbewegung wie möglich, insbesondere beim Kurvenflug! Treten beim Fliegen erste Symptome der Luftkrankheit auf, so ist es hilfreich, einen möglichen visuell-vestibulären Konflikt durch das Fixieren des Horizontes zu vermindern. Das Einnehmen von gleichförmigen Flugbedingungen (Geradeaus-Flug) ist ebenfalls hilfreich. Auch das Atmen von 100 % Sauerstoff wirkt sich positiv aus. Der Problemkreis der Luftkrankheit ist häufig auch mit Angst vor dem Fliegen verbunden. Hier kann ein psychologisches Training helfen, das Auftreten der Luftkrankheit zu vermindern. Aber auch sportliche Aktivitäten und mentale Entspannungstechniken können das Entstehen der Luftkrankheit günstig beeinflussen. Anwärter für den fliegerischen Dienst, die Symptome der Luftkrankheit zeigen oder bei denen sie sich entwickeln, können einem Anti-Air-Sickness-Trainingsprogramm unterzogen werden. Dieses Programm ist eine Kombination aus Bewegungsreizen, Entspannungstechniken und psychologischer Verarbeitung des Problemkreises. Dieses Desensibilisierungsprogramm wird im Bereich der Bundeswehr durch die Abteilung VI in Verbindung mit der Abteilung III des Flugmedizinischen Institutes der Luftwaffe am Flugorientierungstrainer durchgeführt. Die medikamentöse Therapie der Luftkrankheit ist sehr vielseitig. Antihistaminika, Belladonna-Abkömmlinge, Antiemetika, Vitamine und Psychopharmaka stehen zur Verfügung. Im Bereich der Bundeswehr verbietet sich jedoch eine medikamentöse Therapie für Luftfahrzeugbesatzungsangehörige. Die medikamentöse Therapie kann zwar auf der einen Seite die Symptome der Luftkrankheit mindern, auf der anderen Seite aber negative Auswirkungen auf die mentale Leistungsfähigkeit des Piloten haben. Für Personen, die nicht mit der Führung eines Luftfahrzeuges betraut sind, stellte lange Zeit Scopolamin eine wirkungsvolle Medikation dar. Als bekannteste Anwendung darf die im TTS (Transdermal Therapeutisches System) als Pflaster auf der Haut genannt werden.

Bei jeglicher Form der medikamentösen Prophylaxe muss aber berücksichtigt werden, dass es sowohl schnell wirksame Präparate mit relativ kurzer Wirkdauer gibt, andererseits aber auch Präparate mit langsamerem Wirkungseintritt und entsprechend langer Verweildauer im System. Dies muß sowohl bei der Beratung für die Einnahmezeit vorher als auch für die Berücksichtigung der Nachwirkzeit beachtet werden. In der Fliegerei ist grundsätzlich keine medikamentöse Behandlung gestattet. Auch nach dem arbeitsmedizinischen Grundsatz G 25 (Fahr-, Steuer- und Überwachungstätigkeit) gilt ebenso, dass sich die Einnahme von Medikamenten gegen eine Bewegungskrankheit mit der Tätigkeit nicht vereinbaren lässt. Die Luftkrankheit kann jeden betreffen. Auch Piloten und Luftfahrzeugbesatzungsangehörige, die während ihrer Ausbildung oder während der ersten Zeit ihrer fliegerischen Tätigkeit nicht unter der Luftkrankheit litten, können diese dennoch entwickeln. Niemand ist vor ihr gefeit. Umso überraschender, wenn auch erfahrene Flieger plötzlich mit diesem Problem konfrontiert werden.

Das Auftreten von Luftkrankheit schränkt die Handlungsfähigkeit eines Besatzungsmitgliedes u. U. extrem ein. Eine intensive Exploration durch den Fliegerarzt um evtl. neue auslösende Faktoren zu erkennen ist daher dringend erforderlich, um wirksam gegen die Luftkrankheit vorgehen zu können. Ein weit verbreitetes und sicherlich vom Einzelnen auch als peinlich empfundenes Problem darf nicht zur Einschränkung der fliegerischen Leistungsfähigkeit und damit auch der Flugsicherheit führen.

10.7 Verwendete und weiterführende Literatur

Benson, Alan J.: Motion sickness. In: Aviation medicine / ed. by John Ernsting, S. 455 – 471 3. ed., Oxford, 1999

Gillingham, K. K., Previc, F. H. Spatial orientation in flight. In: DeHart, R. L. (ed) Fundamentals of aerospace medicine, sect 2: physiology in the flight environment, chap 11, 2. ed., Williams and Wilkins, Baltimore, 1999

Graybiel, A. Vestibular sickness and some of its implications for space flight. J Aviat Med 26/29, 1955

Jones, D. R., Katchen, M. S., Patterson, J. C., Rea, M. Neuropsychiatry in aerospace medicine. In: DeHart, R.L. (ed) Fundamentals of aerospace medicine, sect 3: clinical practice of aerospace medicine, chap 18, 2. ed., Williams and Wilkins, Baltimore, 1999

Probst, Th., Schmidt, U. The sensory conflict for the generation of nausea. J Psychophysiol 12 (Suppl.) , 34-49, 1998

Reason, J. T. Motion sickness adaptation. J R Soc Med 71 (11), 819-829, 1978

Thümler, R. Kinetose. In: Landgraf, H., Rose, D.-M., Aust, P. E. (Hrsg.) Flugreisemedizin. Teil 2: klinische Flugmedizin, Kap 11. Blackwell, Berlin, 1996

11 VIBRATION

Im täglichen Leben wirken Schwingungen beinahe ständig auf den Menschen ein. Dies ist ganz besonders am Arbeitsplatz der Fall, wo die Belastung des Körpers je nach Arbeitsumgebung und Tätigkeit unterschiedlich hoch sein kann. Starke Schwingungen treten vorwiegend in Fahrzeugen (Ganzkörper-Schwingungen) und an handgeführten Arbeitsgeräten (Hand-Arm-Schwingungen) auf. Aus flugmedizinischer Sicht verdienen besondere Aufmerksamkeit Ganzkörper-Schwingungen in Luftfahrzeugen, die über Sitze und Cockpitstruktur auf den Körper des Piloten übertragen werden, Hand-Arm-Schwingungen, die über Steuerorgane in seine Hände eingeleitet werden und Schwingungen der Cockpitstruktur, die das sichere und genaue Ablesen von Anzeigegeräten erschweren.

Vibrationen oder Schwingungen werden definiert als reversible Formänderungen in festen (elastischen) Körpern, als Dichte- bzw. Druckänderungen in Gasen oder Flüssigkeiten.

Diese Form- bzw. Druckänderungen können regelmäßig (periodisch) oder zufällig (stochastisch) sein.

Sie können im Bereich tiefster Frequenzen (< 1 Hz) bis zu höchsten Frequenzen auftreten. Der für die Auswirkungen auf den menschlichen Körper wichtigste Frequenz-Bereich liegt bei

0,1 Hz bis 100 Hz

Mechanische Schwingungen können über feste Körperoberflächen (z.B. Sitz, Handgriff im Cockpit) oder über ein umgebendes Medium (Luft, Wasser) in den menschlichen Körper eingeleitet werden. Dabei können sie, je nach Art und Einleitungsstelle, Teile des Körpers oder auch den ganzen Körper erregen. Für die Beurteilung der Wirkung von Schwingungen auf den Menschen ist zu unterscheiden, ob die Schwingungen translatorisch oder rotatorisch sind, an welcher Stelle sie in den Körper eingeleitet werden und in welcher Richtung sie einwirken.

11.1 Physikalische Grundlagen

In Abbildung 11.1 sind die Koordinatenachsen der in verschiedener Weise auf den Menschen einwirkenden Schwingungen dargestellt. Tabelle 11.1 zeigt eine Übersicht der schwingungsphysikalischen Begriffe.

11.1.1 Schwingungsmechanik

Zur Beurteilung der mechanischen Schwingungsfortpflanzung im Körper kann man sich vereinfacht den Menschen als gedämpftes Feder-Masse-System vorstellen, in das an bestimmten Stellen Schwingungen eingeleitet werden (Abb. 11.2). Ein Feder-Masse-System weist für jede Einzelmasse und für zusammengehörige, aus mehreren Einzelmassen bestehende Untersysteme Resonanzfrequenzen auf, bei denen in dem entsprechenden Teil verstärkte Schwingungsamplituden auftreten.

Abbildung 11.2 und Tabelle 11.2 enthalten eine Aufstellung von Resonanzfrequenzen verschiedener Körperteile in Abhängigkeit von Schwingungseinleitung und Schwingungsrichtung.

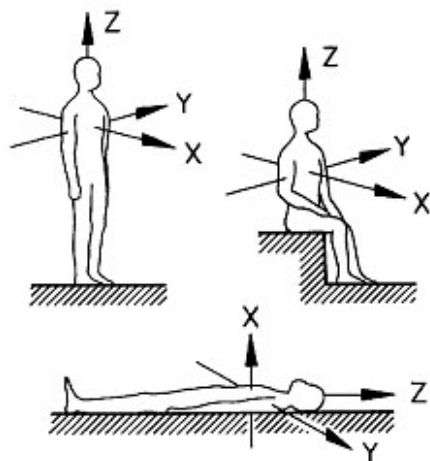


Abb. 11.1: Koordinatenachsen für die Schwingungseinwirkung auf den Körper

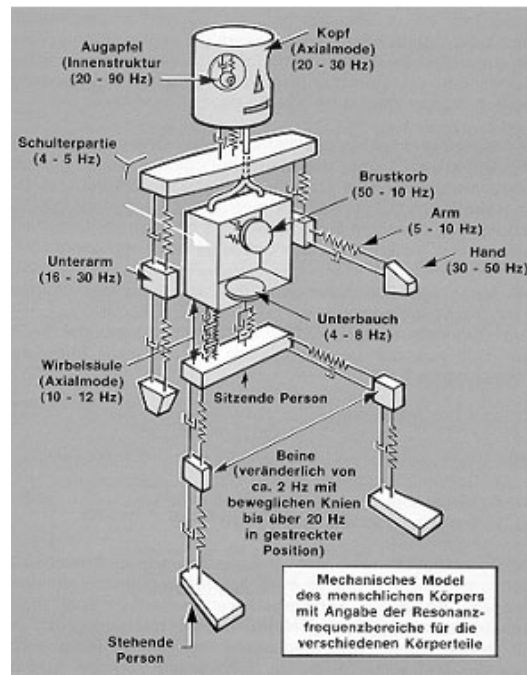


Abb. 11.2: Resonanzfrequenzen verschiedener Körperteile

Begriff	Symbol	Dimension	Bedeutung (Definition)
Amplitude		M, m/s, m/s ²	Augenblickswert einer Schwingungsgröße x
Bewertete Schwingstärke (K-Wert) (früher: Wahrnehmungsstärke K)	K		Maßzahl, die den Zusammenhang zwischen physikalischer Schwingbelastung einerseits und subjektiver Wahrnehmung, biomechanischem Schwingungsverhalten und bestimmten physiologischen Veränderungen andererseits wiedergibt. Zusatzbezeichnungen: L gilt für den liegenden Menschen, B für die Belastung in Gebäuden, X, Y und Z für die Schwingrichtung (Abbildung 11.1)
Bewertungsfilter			Elektronisches Netzwerk zur Bewertung frequenzabhängiger Wirkungen auf den Menschen (Ermittlung des K-Wertes)
Breitbandschwingungen			Schwingungen mit Frequenzanteilen in mehr als einer Dritteloktave (Terz)
Dämpfung			Umwandlung von Schwingungsenergie in Wärme
Effektivwert der Beschleunigung	a_{eff}	m/s ²	Quadratwurzel aus dem quadratischen Mittelwert der Beschleunigung über die Mittelungsdauer

Begriff	Symbol	Dimension	Bedeutung (Definition)
Eigenfrequenz	f_0	1/s	Wird ein Schwingungssystem durch eine einmalige Anregung in Schwingungen versetzt, so schwingt es in seiner Eigenfrequenz (Resonanzfrequenz)
Periodendauer	T	s	Zeit, in der eine einzelne Schwingung (Periode) abläuft. (= Schwingungsdauer)
Periodische Schwingung			Vollständige unmittelbare Wiederholung eines Schwingungsvorganges $x(t)$ nach einer bestimmten Zeit ($T = \text{Periodendauer}$)
Resonanz			Systembedingte Amplitudenüberhöhung durch Anregung in der Eigenfrequenz
Rotationsschwingungen			Kreisbogenförmige Schwingungen um eine Rotationsachse
Scheitelfaktor			Verhältnis von Scheitelwert zu Effektivwert
Scheitelwert			Abstand zwischen Höchst- und Tiefstwert und Mittellinie der Schwingung
Schmalbandschwingungen			Schwingungen mit Frequenzanteilen in weniger als einer Dritteloktave (Terz)
Schwingbeschleunigung	a	m/s ²	Änderung der Schwinggeschwindigkeit in der Zeit
Sinusschwingungen			Durch eine Sinus- oder Cosinusfunktion beschreibbare periodische Schwingung (= harmonische Schwingung)
Stochastische Schwingungen			Nichtperiodische, dem Zufall unterworfenen (regellose) Schwingungen
Transiente Schwingungen			Kurzzeitiger Schwingungsvorgang mit stoßhaltigem Charakter
Translatorische Schwingungen			Gradliniger Schwingungsverlauf
Übertragungsfaktor	V		Quotient aus Antwortamplitude und Erregeramplitude

Tabelle 11.1: Schwingungsphysikalische Begriffe (nach VDI 2057)

Körperhaltung	Körperteil	Schwingungsrichtung (s. Abb. 11.1)	Bereich der Resonanzfrequenz
Liegen	Fuß	X	16 – 1 Hz
	Knie	X	4 – 9 Hz
	Bauch	X	4 – 8 Hz
	Brustkorb	X	6 – 12 Hz
	Schädelknochen	X	50 – 70 Hz
	Fuß	Y	0,8 – 3 Hz
	Bauch	Y	0,8 – 4 Hz
	Kopf	Y	0,6 – 4 Hz

Körperhaltung	Körperteil	Schwingungsrichtung (s. Abb. 11.1)	Bereich der Resonanzfrequenz
Liegen	Fuß	Z	1 – 3 Hz
	Bauch	Z	1,5 – 6 Hz
	Kopf	Z	1 – 4 Hz
Stehen	Knie	X	1 – 3 Hz
	Schulter	X	1 – 2 Hz
	Kopf	X	1 – 2 Hz
	Rumpf	Z	4 – 7 Hz
Sitzen	Brustkorb	Z	3 – 6 Hz
		Z	4 – 6 Hz
	Wirbelsäule	Z	3 – 5 Hz
	Magen	Z	4 – 5 Hz
	Auge	Z	20 – 25 Hz

Tabelle 11.2: Resonanzfrequenzen verschiedener Körperteile

11.2 Schwingungsübertragung

Die Fortpflanzung einer Schwingung im menschlichen Körper hängt von Körperhaltung, Einleitungsstelle, Erregerfrequenz und Übertragungsweg (z.B. Sitzfläche - Kopf) ab.

Die Abbildung 11.3 zeigt ein Beispiel der Schwingungsfortpflanzung im Körper.

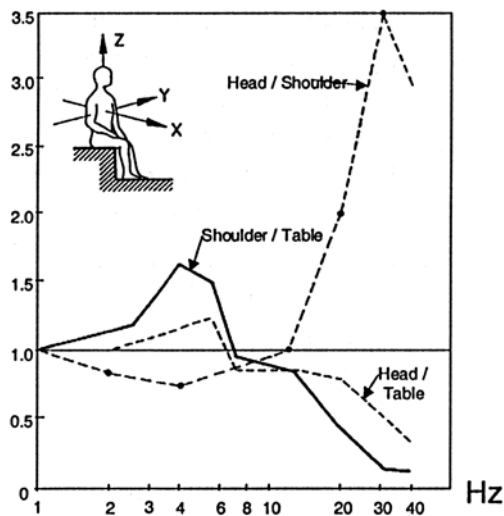


Abb. 11.3: Schwingungsübertragung im Sitzen (Übertragungsfaktor)

11.3 Einfluss der Vibrationen auf den menschlichen Körper

Die Intensität, mit der die Schwingungen an den einzelnen Körperstellen auftreten, hängt sehr stark von der Amplitude der Erregerschwingung und den Feder- und Dämpfungseigenschaften der auf dem Fortpflanzungsweg liegenden Körperpartien ab.

Die Feder- und Dämpfungseigenschaften von Körperpartien wiederum hängen vom individuellen Verhalten des Menschen ab. Vieles spricht dafür, dass der Mensch immer dann, wenn Schwingungen von ihm lästig empfunden werden, bewusst oder unbewusst versuchen wird, ihnen entgegenzuwirken. Wenn er auf Schwingungen mit aktiven Körperbewegungen rea-

giert, wird er hierfür Muskelarbeit aufwenden müssen. Das trifft aber auch für den Fall eines mehr passiven Verhaltens, „sich-schütteln-lassen“, zu, da der Mensch reflektorisch versuchen wird, sich muskulär wenigstens im Gleichgewicht zu halten. Bei Einleitung von sinusförmigen oder periodischen Schwingungen, die der Mensch durch ihre häufige Wiederkehr kennengelernt hat, wird er zu einem Teil mit aktiver, dynamischer Muskelarbeit antworten. Das geschieht, um sich mit seinem Bewegungsverhalten auf die erregenden Schwingungen so einzustellen, dass diese als möglichst wenig lästig empfunden werden. Es treten aber schon hierbei auch Anteile statischer Muskelarbeit auf. Im Falle von stochastischen Schwingungserregungen, deren Ablauf regellos oder zufallsbedingt erfolgt, gibt es jedoch kaum Anteile dynamischer Muskelarbeit, vielmehr muss der Mensch sich mit weitgehend statischer Muskelarbeit „vorspannen“. Dieses „Vorspannen“ der wichtigsten Muskelgruppen kann sowohl einer schnellen Reaktion dienen, unter Umständen jedoch einfach dem Zweck, die Eigenfrequenz und die Dämpfung des Körpers so zu ändern, dass Resonanzwirkungen vermieden oder abgeschwächt werden.

11.4 Schwingstärke K

Schwingungen verschiedener Frequenzen und unterschiedlicher Richtung werden vom Menschen verschieden stark wahrgenommen. Am empfindlichsten reagiert der Mensch bei Frequenzen zwischen 4 Hz und 8 Hz, dem Resonanzbereich des Rumpfes und der Eingeweide. Schwingungen, deren Schwingstärke über den Frequenzbereich von 1 Hz bis 80 Hz vom Menschen als gleich stark empfunden werden, wird ein bestimmter Wahrnehmungsgrad zugeordnet, die „Bewertete Schwingstärke K“.

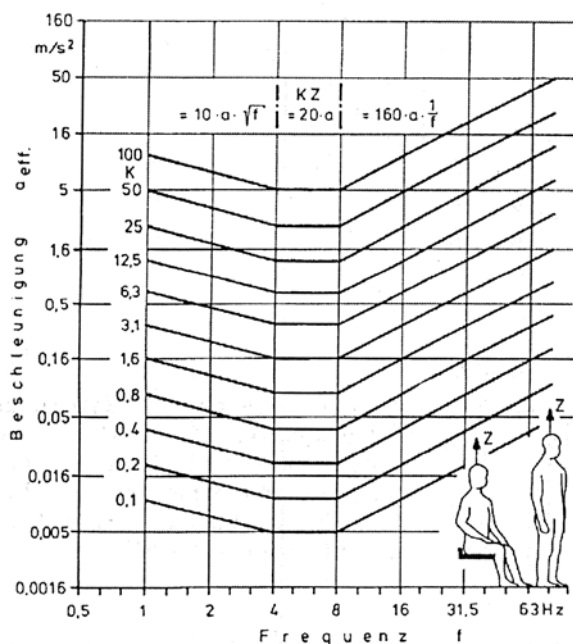


Abb. 11.4: Kurven gleicher Bewerteter Schwingstärken K_z in Abhängigkeit von Frequenz und Schwingbeschleunigung bei Einwirkung in z- Richtung für den sitzenden und stehenden Menschen (nach VDI 2057)

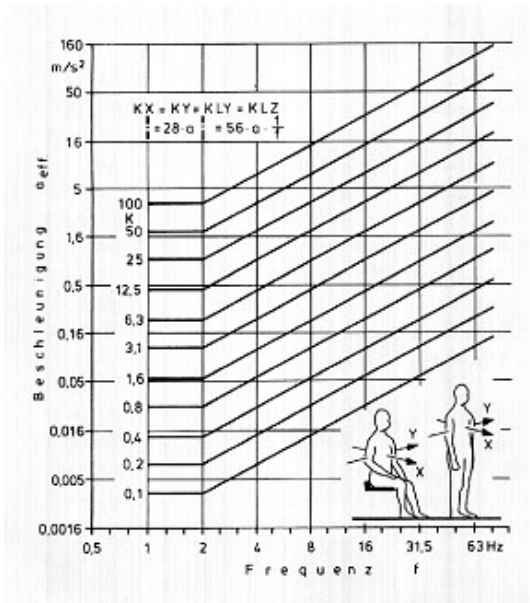


Abb. 11.5: Kurven gleicher Bewerteter Schwingstärken K_X und K_Y in Abhängigkeit von Frequenz und Schwingbeschleunigung bei Einwirkung in x- oder y- Richtung für den sitzenden und stehenden Menschen (nach VDI 2057)

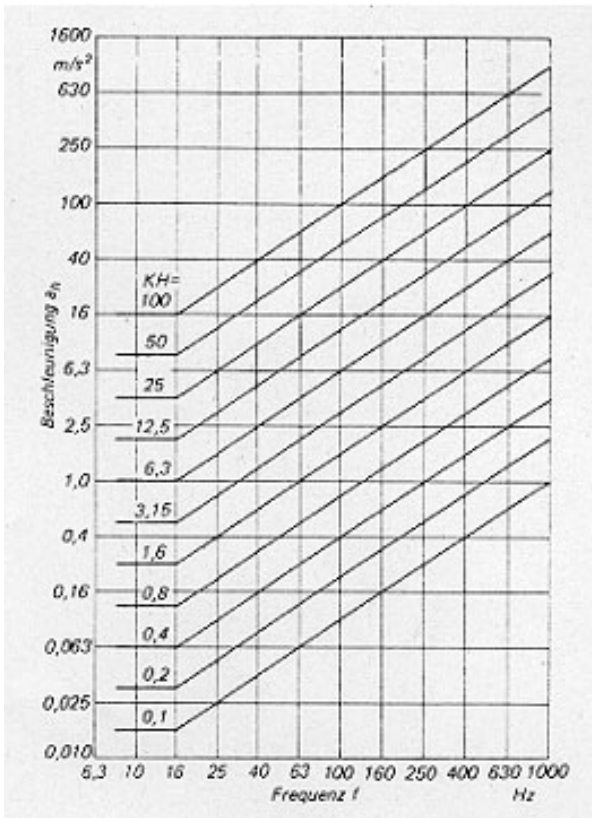


Abb. 11.6: Kurven gleicher Bewerteter Schwingstärken K_H in Abhängigkeit von Frequenz und Schwing beschleunigung bei Einwirkung über das Hand-Arm-System (nach VDI 2057)

Der Wert der maximal zulässigen Schwingstärke K einer vibrierenden Einrichtung oder Umgebung richtet sich nach der Dauer der ununterbrochenen, täglichen Einwirkung und nach dem zugrundegelegten Kriterium für eine Begrenzung der Schwingungen.

Im allgemeinen finden 3 Grenzkurven Anwendung (nach VDI 2057/ISO 2631):

1. Beeinflussung des Wohlbefindens
2. Verringerung der Leistungsfähigkeit
3. Beeinträchtigung der Gesundheit und Sicherheit

Die Abbildungen 11.4 bis 11.6 zeigen Kurven gleicher „Bewerteter Schwingstärke K“ für Ganzkörper-Schwingungen und Schwingungen des Hand-Arm-Systems.

Bewertete Schwingstärke KX, KY, KZ, KB	Beschreibung der Wahrnehmung
<0,1	Nicht spürbar
0,1	-----Fühlschwelle-----
0,4	-----
1,6	Gut spürbar
6,3	-----
100	-----Stark spürbar-----
> 100	-----

Tabelle 11.3: Zusammenhang zwischen „Bewerteter Schwingstärke K“ und subjektiver Wahrnehmung (Anhaltswerte - nach VDI 2057)

In Abb. 11.7 sind K-Grenzwerte für verschiedene Einwirkungsdauer und Grenzbedingungen dargestellt.

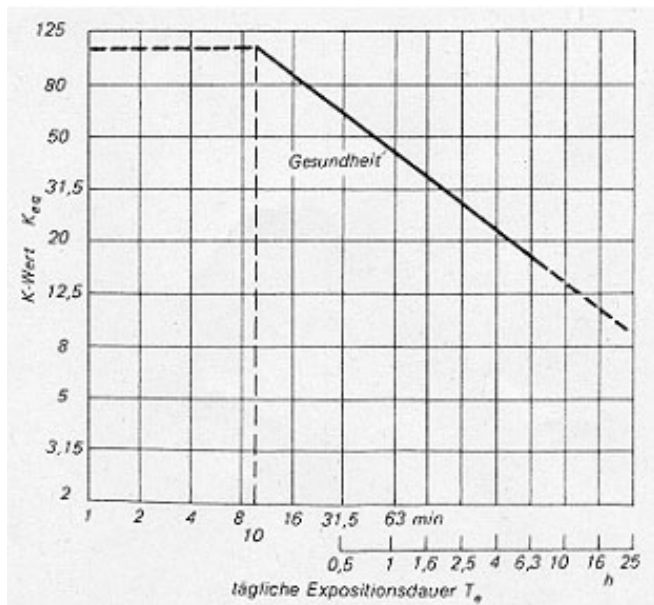


Abb. 11.7: K-Werte in Abhängigkeit von der täglichen Expositionsdauer (nach VDI 2057)

Die Tabellen 11.4 und 11.5 geben einen Überblick über die Schwingstärken die beim Betrieb von verschiedenen Fahrzeugen und Maschinen zu erwarten sind.

Fahrzeug / Arbeitsplatz	Bewertete Schwingstärke K_z
Hubschrauber	2 – 31
Militärfahrzeuge	
Radfahrzeuge, ältere Generation	26 – 80
Radfahrzeuge, Neuere Generation	9 – 33
Kettenfahrzeuge	30 – 70
Gefederte Straßenfahrzeuge	
PKW	4 – 15
Omnibusse	8 – 16
LKW (Straße)	4 – 18
LKW (Baustelle)	14 – 28

Tabelle 11.4: Belastung durch Ganz-Körper-Schwingungen in Hubschraubern und Fahrzeugen

Arbeitsgerät	Bewertete Schwingstärke K_H
Schleif- und Trennschleifmaschinen	18 – 27
Schlagbohrmaschinen, Schlagschrauber	27 – 100
Bohrhämmer, Aufbruchhämmer	40 – 100
Stampfer und Rüttelplatten	60 – 100
Motorkettensägen	45 – 100

Tabelle 11.5: Belastung durch Hand-Arm-Schwingungen bei verschiedenen Gruppen von vibrieren-

11.5 Auswirkungen der Schwingungen auf den menschlichen Körper

Frequenzbereich	Wirkung
1 – 4 Hz	Atembeschwerden durch Verschiebungen des Brustkorb-Unterleib-Systems
5 – 9 Hz	Brustschmerzen, Verschiebung des Zwerchfells, Unterkieferresonanz
4 – 10 Hz	Unterleibschmerzen
4 – 20 Hz	Je 1 g [m/s^2] Schwingungsbeschleunigung ergeben sich 20 – 40 % mittlere Sehschärfenabnahme
8 – 12 Hz	Schmerzen in Lendenwirbelsäule durch Kompression des Zwischenwirbelgewebes
10 – 18 Hz	Drang zum Wasserlassen und zur Darmentleerung durch Dehnung und Verformung der Organe
12 – 16 Hz	Resonanz der Luftröhre und der Hauptstamm-Bronchien, Gefühl mechanischer Zugbelastung

11.6 Bewertung

Die unter Punkt 11.2.4 beschriebenen Auswirkungen von Schwingungen auf den Menschen

- Beeinträchtigung der Gesundheit und Sicherheit
- Verringerung der Leistungsfähigkeit
- Beeinflussung des Wohlbefindens

können nicht absolut bewertet werden, da zum Einen die Grenzen fließend sind, zum Anderen die Auswirkungen meist nicht sofort zu erkennen sind.

Am sichersten und frühesten erkennt der Betroffene sicherlich die ungefährlichste Auswirkung, die Beeinflussung des Wohlbefindens. Gegenmaßnahmen zur Vermeidung einer kritischen Situation sind meist möglich und sollten durchgeführt werden.

Gefährlicher ist eine Verringerung der Leistungsfähigkeit, die zwar sofort auftreten kann, aber, wenn sie nicht oder nicht rechtzeitig erkannt wird, zu einem ernstem Sicherheitsrisiko werden kann.

Das Hauptproblem der Beeinträchtigung der Gesundheit durch Schwingungseinwirkung besteht darin, dass die Auswirkungen (oder Schäden) erst nach langer Einwirkungsdauer zu erkennen sind, meist zu einem so späten Zeitpunkt, an dem der Schaden nicht mehr zu beheben ist. Unter Umständen zeigt sich der Schaden erst lange Zeit nach der verursachenden Schwingungsbelastung.

Eine Beeinträchtigung der Sicherheit durch Schwingungen ist ebenfalls sehr kritisch, wird aber meist zu einem Zeitpunkt erkannt, an dem wirkungsvolle Abhilfe noch möglich ist. Dies trifft in erster Linie auf das genaue Ablesen kritischer Anzeigen und das exakte Bedienen von Steuerorganen zu.

Obige Erwägungen lassen nur den Schluss zu, dass die Einwirkung von Schwingungen auf den Menschen soweit wie möglich verhindert, auf jeden Fall aber minimiert werden muss. Das hat grundsätzlich zuerst an der Entstehungsstelle der Schwingungen zu geschehen (Rotorsystem, Getriebe). Erst wenn dies aus technischen Gründen nicht zufriedenstellend gelingt, müssen als nächster Schritt mittels geeigneter Dämpfungs-Komponenten die Schwingungen auf dem Übertragungsweg vom Entstehungsort zum Menschen beseitigt oder verringert werden. Bringen vorgenannte Lösungsansätze nicht den gewünschten Erfolg, verbleibt als letzte Lösung eine Verkürzung der Einwirkungsdauer über eine entsprechende Arbeitszeitgestaltung.

Wichtig ist, dass schon bei ersten Ansätzen einer Schwingungsbelastung („Beeinflussung des Wohlbefindens“) Maßnahmen zur Problembeseitigung in die Wege geleitet werden. Dazu gehören objektive Messungen der an den kritischen Orten auftretenden Schwingungsintensität mit anschließender Bewertung. Aus den Ergebnissen der Bewertung sind dann die weiteren Schritte abzuleiten.

11.7 Verwendete und weiterführende Literatur:

VDI 2057. Richtlinie: "Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen", 1987

ISO/DIS 2631/1. International Standard: "Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration", 1994

H. Dupuis, Zerlett G. Beanspruchung des Menschen durch mechanische Schwingungen. Schriftenreihe des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften, 1984

Brüel & Kjaer: "Humanschwingungen", 1989

Proceedings, "6th International Conference on Hand-Arm Vibration", Bonn, 1992

12 HNO - LÄRM

Die HNO - fliegerärztliche Untersuchung gehört mit zu den anfänglichen Flugtauglichkeitsuntersuchungen. Die ersten Piloten berichteten über Ohrendruck und Schmerzen, deren Ursache der Einfluss der sich ändernden atmosphärischen Bedingungen war. Die militärischen Einsätze führten zu einer Häufung von Erkrankungen wie der chronischen Sinusitis und der Otitis media mit Abszessbildung, so dass von einer berufsbedingten Häufung dieser Erkrankungen gesprochen werden kann. Die Folge waren operationsbedingte Neuralgien des Nervus Trigeminus nach Nasennebenhöhlenrevisionen, chronische Otitiden und die Notwendigkeit zur Mastoidrevision mit der Komplikation wie Schallleitungsschwerhörigkeit und Schallempfindungsstörungen. Die heutigen Operationsmethoden ließen diese Komplikationen selten werden.

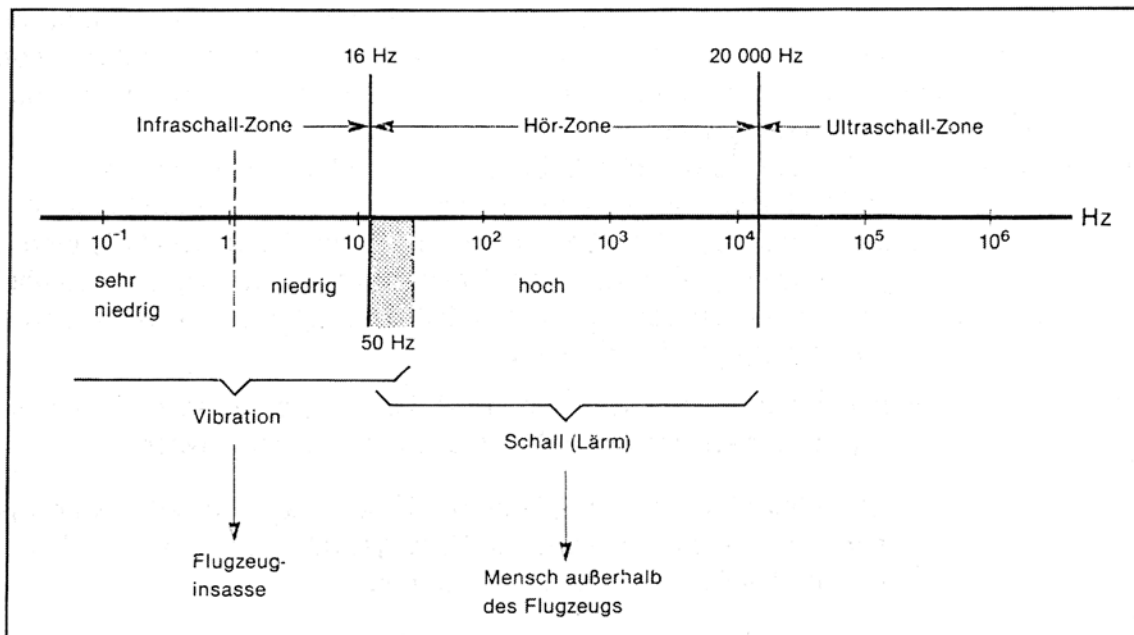


Abb. 12.1: Frequenzspektrum vom Materieschwingungen (Lärm und Vibration)

12.1 Klinische Untersuchung des äußeren Ohres, des Gehörganges und des Trommelfells, Hörpüfungsmethoden, auditive Wahrnehmung

Die otologische Untersuchung beginnt mit der Inspektion des äußeren Ohres, der Ohrmuschel und des Gehörgangseinganges, um die Passform der Kopfhörer und die ungehinderte Schalleitung zum Trommelfell sicherzustellen. Flugmedizinisch ist hier der sichere druckfreie Sitz der Kopfhörer und des Gehörgangsgehörschutzes maßgebend. Formveränderungen der Ohrmuschel und des Gehörgangseinganges können beispielsweise bei Kopfhörern (head sets) oder bei den "active noise reduction systems" Beschwerden und Funktionseinbußen hervorrufen. Schallschutzmaßnahmen werden durch Passungenauigkeiten unterlaufen und bewirken einen unzureichenden Schallschutz sowie ein nicht vorhandenes Sicherheitsgefühl. Ekzeme der Ohrmuschel oder des Gehörgangseinganges bedeuten flugmedizinisch eine Beeinträchtigung für das Tragen von Gehörgangsgehörschutz. Zur flugmedizinischen Untersuchung gehört auch die Beratung hinsichtlich der Hygiene und Pflege. Das Tragen eines Gehörgangsgehörschutzes bedeutet die Bildung einer Feuchtkammer, wodurch eine Persistenz ebenso wie eine Chronifizierung von Gehörgangsekzemen begünstigt wird. Gehörgangsekzeme sowie chronische externe Otitiden schränken das Tragen des Gehörgangsgehörschutzes ein und beeinträchtigen auch die Schallübertragung über den Kopfhörer oder den Helmlautsprecher. Die Beurteilung des äußeren Gehörganges

(vergl. Abb. 9.1) hinsichtlich freier Öffnung und Sicht auf das Trommelfell ist die Voraussetzung für die ungehinderte Schallübertragung. Flugmedizinisch ist hier auf Entzündungszeichen, Ohrschmalz (Cerumen), Osteome oder eine vordere Gehörgangseinengung zu achten.

Gehörgangsveränderungen:

- behindern den Sitz von Gehörgangsgehörschutz
- führen bei Entzündungen durch Bildung einer feuchten Kammer unter den Kopfhörern oder hinter dem Gehörgangsgehörschutz zur verzögerten Ausheilung und begünstigen eine Chronifizierung.
- Gehörgangsverengungen durch Osteome und Anomalien behindern die Beurteilung der Trommelfelle und der Mittelohrbelüftungsprüfung - (Valsalvamanöver)

Flugmedizinisch relevant heißt hier, dass diese Veränderungen zu einer Behinderung der Kommunikation durch Behinderung der Schallübertragung auf das Trommelfell führen, oder eine Behandlungsnotwendigkeit mit Einschränkung der erforderlichen Schutzmaßnahmen (Kopfhörertragen oder Schallschutz) bedingen.

Die Trommelfelle sind normalerweise porzellanfarbig spiegelnd intakt ohne eine wesentliche Gefäßzeichnung. Bei der Otoskopie zeigt sich ein Reflex im hinteren unteren Quadranten. Die normale Belüftung des Mittelohres erfolgt über die Eustachische Röhre. Die Belüftung ist vom klinischen Aspekt gewährleistet, wenn das Valsalva-Manöver ausführbar ist. Flugmedizinisch relevant ist die Dokumentation des aktiv durchführbaren Mittelohrdruckausgleiches, sichtbar durch eine Reflexänderung des Trommelfelles.

- Valsalva: Mittelohrüberdruck durch Öffnen der Tube mittels Pressdruck im Epipharynx bei geschlossenem Mund und geschlossener Nase
- Frenzel: Mittelohrüberdruck durch Öffnen der Tube mittels Pressdruck im Epipharynx bei geschlossenem Mund und geschlossener Nase und unter direkt anschließendem aktiven Schluckakt
- Politzer-Versuch: Ärztliche Maßnahme zur Tubendurchgängigkeitsprüfung bei Funktionsstörungen der Mittelohrbelüftung.

Flugmedizinisch relevant ist ein aktiv durchführbares Valsalvamanöver. Dies ist die einzige kontrollierbare Selbsthilfemaßnahme bei Belüftungsstörungen des Mittelohres und dient der Vorbeugung eines Barotraumas. Die Unmöglichkeit eine Trommelfellreflexänderung mittels Valsalva (Frenzel) aktiv durchzuführen, disqualifiziert für eine aktive Pilotenkarriere und bedeutet ein hohes barotraumatisches Risiko auch für Passagiere.

12.1.1 Prüfung der luftvermittelten Schallübertragung - Schalltransfer –

Physiologie:

Nach Sicherstellung der freien Sicht auf das Trommelfell folgt die Beurteilung des Hörvermögens.

12.1.1.1 Cochlea

Die audiologische Untersuchung soll ein ausreichend sicheres, die Flugsicherheit nicht einschränkendes Sprachverstehen nachweisen. Die Ableitung des Reintonaudiogrammes wird über Kopfhörer mit Sinustönen in definierten Frequenzen und regelbarer Lautstärke in einem schallisolierten Raum vorgenommen. Dies ist die Prüfung der luftvermittelten Schallübertragung.

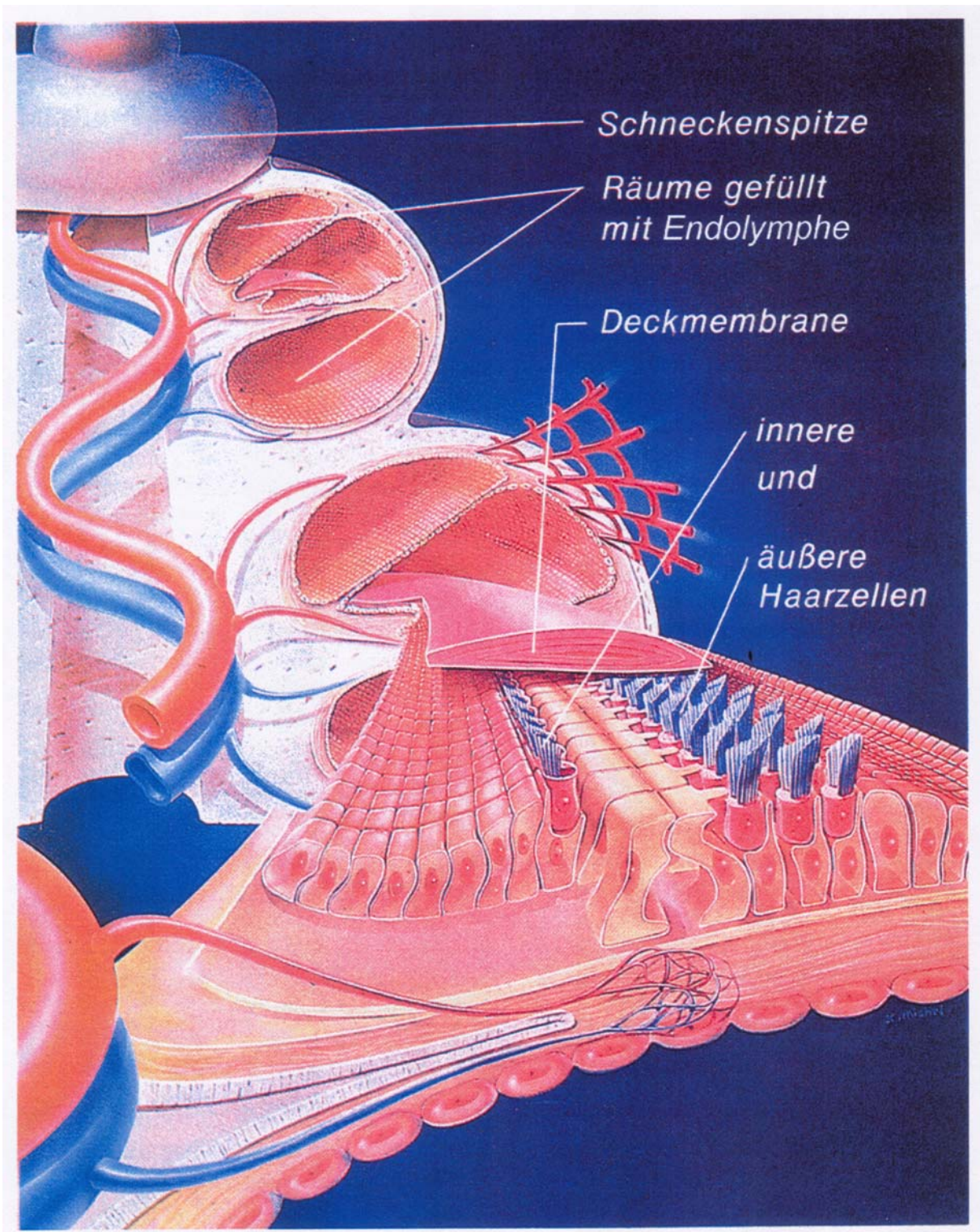


Abb. 12.2: Schnitt durch die Schnecke

Das Trommelfell dient zur Schalltransformation der Luftschwingung in die Masseschwingung der Gehörknöchelchenkette. Die Gehörknöchelchenkette leitet die Schallschwingung als Masseschwingung weiter und überträgt diese Schwingung über die Stapesfußplatte (im ovalen Fenster) auf die Flüssigkeitssäule der Cochlea, indem eine Flüssigkeitswelle (sog. Wanderwelle) vom ovalen Fenster ausgeht.

12.1.1.2 Wanderwelle

Die dabei entstehende Wanderwelle wird in der Cochlea in eine Sinusschwingung zerlegt. Im cochleären Resonanzbereich kommt es zu einer Erregung der Haarzelle mit Umwandlung der Energie in einen elektrischen Impuls, der dann neural fortgeleitet wird. Die durch den Schallimpuls entstandene Wanderwelle wird in der Cochlea reflektiert (gebunden an die intakte Funktion der äußeren Haarzelle) und kann als otoakustische Emission nachgewiesen werden.

12.1.1.3 Prüfung des Hörvermögens

Der physiologische Weg entspricht unter Flugbedingungen der Schallabgabe des Kopfhörerlautsprechers durch das Tragen des „head sets“ oder des Cockpitlautsprechers, wenn ohne „head set“ kommuniziert wird. Für die zivile Tauglichkeitsstufe III - (PPL) - ist die Prüfung der Verständlichkeit ausreichend, wenn normale Umgangssprache beidohrig von 2 m Abstand gehört wird. Nach den „Gutachterlichen Richtlinien zur Beurteilung einer Hörminderung“ entspricht das geforderte Sprachverstehen einer gering- bis mittelgradigen Schwerhörigkeit. Dabei werden gerade bei diesen Schwerhörigkeitsgraden unbewusst visuelle Assoziationsmöglichkeiten eingesetzt, die im Flugbetrieb nicht gegeben sind. Um eine dem Flugbetrieb vergleichbare Sprachübermittlung zu erreichen, sollte der Prüfling bei Ausschluss der visuellen Kontrolle (mit dem Rücken zum Fliegerarzt stehend) in einem ruhigen Raum und einer Entfernung von 2 Metern die normale Umgangssprache verstehen. Bei Zweifeln empfiehlt sich die Prüfung mit einer Wortliste, wie sie in der Fliegersprache üblich ist. Dabei sollte aber nicht in ganzen Sätzen geprüft werden, um Assoziationen auszuschließen. In der Muttersprache ergänzen wir aus dem Sinnzusammenhang des Satzes ohne gesichertes Verstehen, wenn mindestens 50 % der Worte einen Sinnzusammenhang vermitteln.

Wir müssen bei dieser Prüfmethode akzeptieren, dass eine einseitige Taubheit das Fliegen nicht ausschließt und auch nicht erfasst werden kann. Für alle anderen Bewerber muss ein Reintonaudiogramm durchgeführt werden.

Über das Sprachverstehen erfolgt keine weitere Angabe oder Forderung.

Für die militärischen Richtlinien gelten folgende in der ZDv 46/6 Ziffer 345/1 und 345/2 formulierten Bedingungen:

ZDv 46/6 - Ziffer 345/1	500 Hz	1 kHz	2 kHz	3 kHz	4 kHz	6 kHz
WFV I	20 dB	20 dB	20 dB	20dB	25 dB	25 dB

ZDv 46/6 - Ziffer 345/2	500 Hz	1 kHz	2 kHz	3 kHz	4 kHz - 6 kHz
WFV II und WFV III	35 dB	35 dB	35 dB	50dB	Keine Vorgabe

In diesen Grenzwerten spiegeln sich die Forderungen der berufsgenossenschaftlichen Grundsätze wieder, wie sie in der ZDv 46/32 G 20 (Lärm) in den Grenzwerte für die Erstuntersuchung vor Aufnahme einer Lärmtätigkeit und für die regelmäßige Nachuntersuchung festgelegt wurden. Was geschieht bei einem höheren Hörverlust, und welche Möglichkeiten der Diagnostik stehen zur Verfügung. Die Auswirkung eines reintonaudiometrischen Hörverlustes auf das Sprachverstehen ohne Rücksicht auf die Schwerhörigkeitsgenese gilt es zu prüfen. Das Sprachaudiogramm dient dem Otologen zur Beurteilung des Sprachverstehens unter Ausschaltung von Assoziationsmöglichkeiten, die jeder Schwerhörige unbewusst einsetzt. Diese neurootologische Untersuchung prüft das Sprachverstehen für jedes einzelne Ohr, so dass sicher angegeben werden kann, wie sich das schlechter hörende Ohr bei Beschallung im Lärmbereich verhält, wenn es das allein hörende Ohr wäre. Beurteilt wird das Einsilbenverstehen bei 60 dB, 80 dB und 100 dB. Hier zeigt sich, ob eine höhere Lautstärke

eine höhere Verständlichkeit ergibt und ob das Ohr über eine ausreichende Dynamik bei Schallbelastung (Lärm) mit gutem Wortverstehen verfügt. Werden bei 80 dB zwischen 95 % und 100 % der angegebenen einsilbigen Wörter verstanden und fällt bei 100 dB das Sprachverstehen nicht ab, so liegt ein die Flugsicherheit nicht einschränkendes Hörvermögen trotz reintonaudiometrischer Schwerhörigkeit vor. Zur Erhöhung der Flugsicherheit und über den Begutachtungsrahmen zur Festlegung der MdE und GdB hinaus erfolgt die Dynamikprüfung mit Schallbelastung (Lärm) über Kopfhörer. Kommt es bei einer Sprachlautstärke von 80 dB auf dem Prüfohr bei gleichzeitiger Störschallbelastung (Lärmbeschallung) von 80 dB bzw. 100 dB auf dem Gegenohr zu einem gleich guten Wortverstehen wie unter Ruhebedingungen, so liegt ein ausreichend sicheres Sprachverstehen unabhängig der Reintonaudiometrie vor.

Damit ist der juristischen Dokumentationspflicht genüge getan.

Audiologische flugmedizinische Zusatzuntersuchungen:

Zur Überprüfung in Grenzfällen empfiehlt sich die Testung im Flugzeug, da insbesondere viele PPL-Flieger die Bordlautsprecher benutzen. Die Erfahrung aus mehreren Gutachten zeigt, dass mit dem Benutzen von Hörgeräten keine Hörverbesserung in einer Schallumgebung zu erreichen ist. Vorteile bei Schwerhörigen bietet die Benutzung von "active noise reduction Systemen". Die bessere Lautsprecherqualität mit gutem Abschluss des Ohrbereiches durch die Lautsprecherkapsel bedeutet neben einem begrenzten Schallschutz auch eine höhere Sprachverständlichkeit durch Minimierung des Störschalles. Eine Störschallreduktion bewirken die „active noise reduction Systeme“ nur bis zu einem Frequenzbereich bis ca. 1000 Hz, wobei die Schallverstärkung zwischen etwa 750 Hz und 1500 Hz nicht zu vernachlässigen ist und etwa bis zu einer Vervierfachung des Schalldruckes geht. Die dargestellten Methoden zur Wahrung der Flugtauglichkeit sollten mit dem hinzugezogenen HNO-Kollegen für die Begutachtung besprochen werden, um Missverständnisse und die Aktenbeurteilung zu erleichtern und eine gezieltere flugmedizinische Begutachtung zu erreichen. Nachdem der klinische Untersuchungsablauf mit den zu beachtenden HNO-flugmedizinischen Befundbesonderheiten dargestellt wurde, werden nachfolgend die Grundlagen der Audiometrie und der Schallpegelmessung ausgeführt, um das Verständnis für die physikalische Messung und physiologische Beurteilung der auralen und extraauralen Wirkung von Schallwellen auf den menschlichen Körper zu erleichtern.

12.2 Physikalische Messung und physiologische Beurteilung der auralen und extraauralen Wirkung von Schallwellen auf den menschlichen Körper

Lärm ist physikalisch - technisch nicht definiert, wie dies bei den Begriffen Ton, Klang, Geräusch oder Knall der Fall ist, und wie sie nachfolgend verwendet werden.

12.2.1 Definition:

Schall im eigentlich physiologisch-physikalischen Sinn bezeichnet eine periodische Dichte-, Druck- bzw. Formveränderung der Luft, von Flüssigkeiten und festen oder elastischen Körpern, die direkt oder indirekt (Körperschall) auf das menschliche Gehörorgan übertragen werden, und innerhalb bestimmter Grenzen und ohne Rücksicht auf die Art ihrer Erzeugung wahrgenommen werden. Sehr tiefe Frequenzen werden dabei durch die Resonanz der Haut- und Organdrucksensoren wahrgenommen. Außerhalb des menschlichen Fühl- und Hörbereiches liegt der Infraschall unterhalb und der Ultraschall oberhalb der menschlichen Wahrnehmung.

Für die Beschreibung des Schalles sind folgende Parameter von Bedeutung:

Die Amplitude ist der Weg um den die Teilchen ausgelenkt werden. Die Frequenz ist der Abstand zwischen zwei Maxima oder Minima der Auslenkungswelle in Abhängigkeit von der Anzahl der Auslenkungen pro Sekunde.

Die Schalldauer beschreibt den Entwicklungszeitraum eines Schallereignisses.

Der Schalldruck ist der Druck, mit dem die Teilchen hin und her bewegt werden.

Beurteilung einer Schallquelle:

Zur Beurteilung einer Schallquelle dient die Messung des Schalldruckes. Bei einem Schallpegelmessgerät dient das Mikrophon als Empfänger mit der Aufgabe die einfallenden Schalldrücke in eine elektrische Wechselspannung umzuwandeln und zur Anzeige zu bringen.

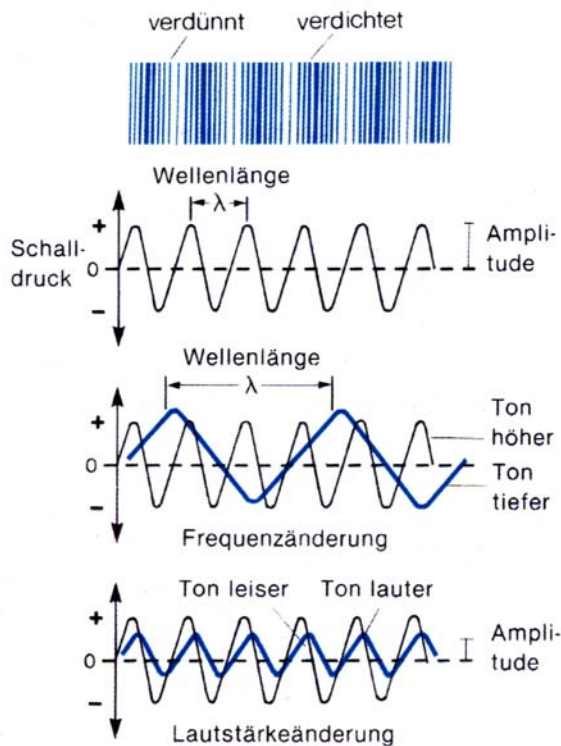


Abb. 12.3: Wellenlänge und Amplitude

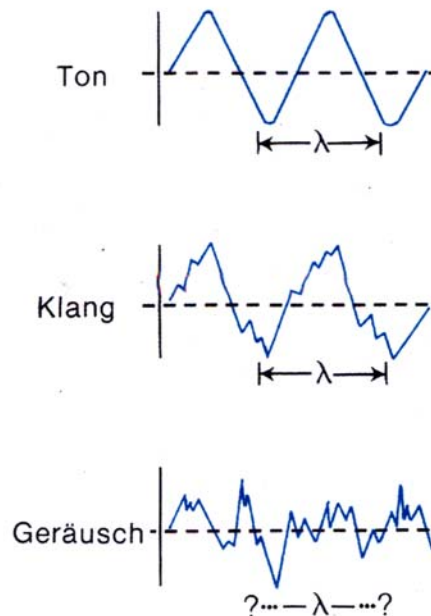


Abb. 12.4: Schwingungsformen in der Akustik

Die Schallmessung verfolgt deshalb zwei Zielrichtungen:

- Die Schallabstrahlung (Schallemission) dient der Beurteilung der Schallquelle
- Die Schalleinwirkung (Schallimmission) dient zur Beurteilung der Wirkung auf den Menschen
- Zur Schallpegelmessung gehört deshalb neben der Angabe der gemessenen Frequenz, die Angabe des Schalldruckes auch bezogen auf die Druckaufbaucharakteristik und die Zeitdauer der Schalleinwirkung.

- Ton: Schall mit sinusförmigem Druckverlauf und mit einer im Hörbereich liegenden Frequenz
- Klang: Schall, bestehend aus mehreren harmonischen Tönen, d.h. aus Tönen, deren Frequenzen in einem ganzzahligen Verhältnis stehen.
- Knall: Schall mit kurzzeitigem, impulsförmigen Druckverlauf

- **Lärm:** Schalleindruck, der in psychologischer Sicht belästigend ist oder in medizinischer Sicht objektiv messbare vegetative Reaktionen auslöst und bei extremer Art vorübergehend oder dauerhaft das menschliche Ohr schädigt
- **Geräusch:** Schall, bestehend aus mehreren unharmonischen Tönen z.B. Zischen, Brummen, Rauschen
- **Vibration:** Vibration als eine besondere Form der periodischen Dichte-, Druck- bzw. Formveränderungen der Luft, von Flüssigkeiten und festen oder elastischen Körpern mit der Besonderheit der Schwingungsübertragung mit Resonanzbildung

Bezugspunkt in der Audiometrie und Schalldruckpegelmessung in Dezibel ist die menschliche Hörschwelle für 1000 Hz. Diese Größe wurde als Durchschnittswert hörgesunder Jugendlicher ermittelt und international mit

$$\underline{2 \cdot 10^{-4} \text{ Pa Schalldruck}}$$

oder

$$\underline{2 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}^{-2} \text{ Schalleistung}}$$

festgelegt.

Definitionsgemäß bedeuten damit 0 dB $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ Schalldruck.

Schallquelle	Schalldruckpegel* [dB (A)]
Absolute Stille, schalltoter Raum (schwelenstärke)	0
Flüstersprache, Taschenuhrenticken	20
Ruhiger Garten	30
Wohnquartier, ohne Verkehr	40
Radio, Zimmerlautstärke	50
PKW, 10 m	60
Starker Straßenverkehr, laute Radiomusik	80
Motorrad, Autohupe 5 m	100
Presslufthammer, Propellermaschine	120
Flugmotoren, Kesselschmiede, Beatmusik (2 m Lautsprecherabstand) (Schmerzwelle)	130
Jettriebwerk	140

* Weitgehend identisch mit Lautstärkepegel in Phon

Abb. 12.5: Schalldruckpegel unterschiedlicher Quellen

Der menschliche Hörbereich in Schalldruck gemessen umfasst 7 Zehnerpotenzen, bei der Schalleistung aufgrund der Proportionalität zum Quadrat des Schalldruckes sind es 14 Zehnerpotenzen. Dabei hat man die „sehr variable“ Schmerzschwelle gewählt, die bei einem Schalldruck von

$$2 \times 10^2 \text{ Pa}$$

$$2 \times 10^3 \text{ } \mu\text{bar}$$

$$2 \times 10^{-2} \text{ Watt pro cm}^2$$

erreicht wird.

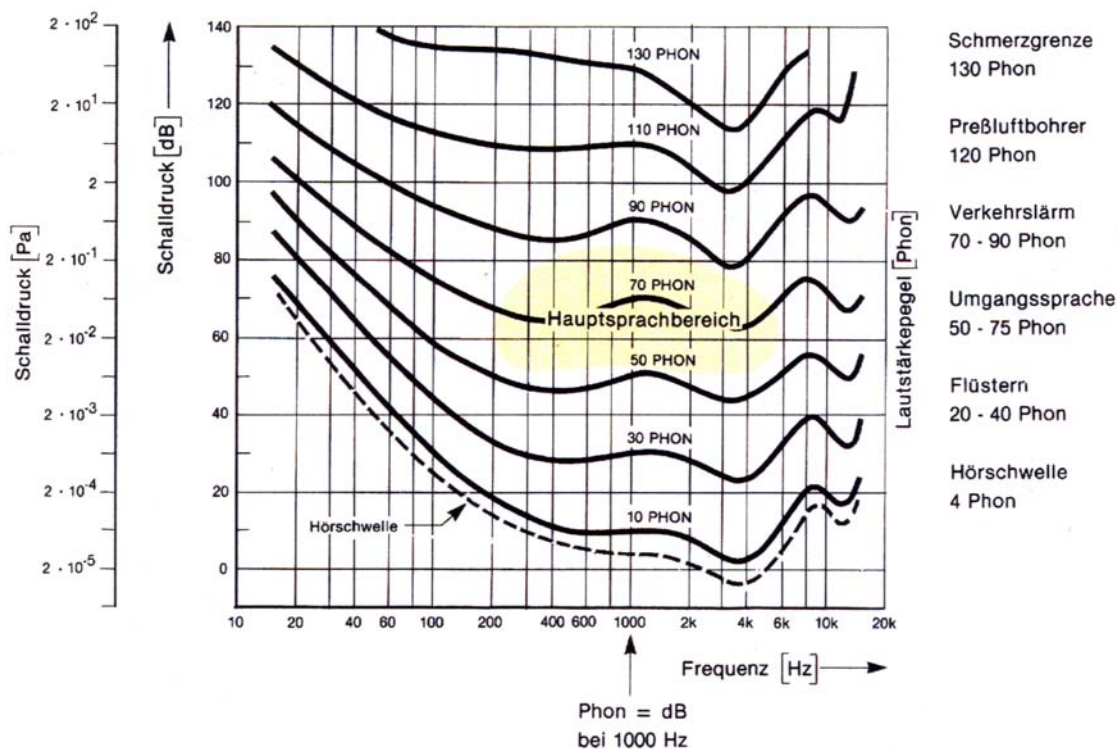


Abb. 12.6: Schalldruck, Schalldruckpegel und Lautstärke

Die cochleären Nervenzellen (Innenohrhaarzellen) reagieren somit in einem sehr weiten Schalldruckbereich. Aufgrund des großen Reaktionsumfanges des menschlichen Ohres wurde eine logarithmische Zahlenskala eingeführt und eine Pegelgröße definiert, die als relative Änderung einer Größe gegenüber einem Bezugswert derselben Größe angegeben wird. Die Darstellung der unteren und oberen Grenze des Hörbereichs stellt eine Beschreibungsgröße dar, zu der weiterhin das Hörfrequenzspektrum (cochleär wahrnehmbare Schallschwingung) gehört, welche das Frequenzspektrum der unteren Hörfrequenz von etwa 16 Hz bis 20 Hz bis zur oberen Hörfrequenz von etwa 16.000 Hz bis 20.000 Hz umfasst. Frequenzen unter 20 Hz werden vorwiegend im Fühlbereich der Drucksensoren wahrgenommen. Aus dem Verhältnis des gemessenen Schalldrucks (p) zum Schalldruck der unteren Hörschwelle (p_0) wird der Schalldruckpegel $L_p = 20 \times \lg p/p_0$ Dezibel (dB) errechnet, der Aufschluss über die Belästigung oder Gefährdung des Menschen in dieser Schallumgebung gibt. Der Schalldruckpegel wird in Dezibel (dB) angegeben. Infolge der Charakteristik der logarithmischen Maßeinheit bedeutet eine Verdoppelung des Schalldruckes eine Erhöhung des Schallpegels um 6 dB, eine 10-fache Erhöhung eine Erhöhung um 20 dB, eine 1000-fache Erhöhung einen Anstieg um 60 dB. Zur Beurteilung der psychologischen Wirkung einer Schallquelle dient die Analyse der Frequenzzusammensetzung.

Bewerteter Schallpegel (A)

Die Innenohrhaarzellen des Menschen reagieren im Frequenzbereich von 16 Hz bis 20 Hz bis 20000 Hz. Bei tiefen und hohen Frequenzen benötigen wir einen höheren Schalldruck, um die gleiche schwelthenhafte Hörempfindung auszulösen. Diese physiologischen Messpunkte wurden im gesamten Frequenzspektrum und Empfindlichkeitsbereich nicht als physikalisch definierte Messpunkte ermittelt, sondern aus Reihenmessungen mit subjektiver Angabe der minimalen Aktivierungsenergie wie der maximalen Energie zur Auslösung des Symptoms - Schmerz. So ist der notwendige minimale Erregungsschalldruck bei 250 Hz und

10 kHz um 20 dB, also das 10-fache größer als im Hauptsprachbereich zwischen 1000 Hz und 4000 Hz. Um dieses Phänomen zu berücksichtigen, wurden in zahlreichen Testreihen mit Versuchspersonen Kurven gleicher Lautstärke entwickelt. Dabei wurde die Lautstärkeangabe so gewählt, dass sich numerische Gleichheit mit dem Schalldruck in Dezibel bei einer Frequenz von 1000 Hz ergibt. Die Einführung der Bewertungskurven hatte den Sinn bei einem Hörgesunden nicht eine physiologisch gekrümmte absolute Hörkurve sondern eine gerade Hörlinie abzuleiten. Der Hörverlust ist dann als Abweichung von der Geraden definiert und unmittelbar abzuleiten. Durch Einbau von Filtern in die Schallpegelmessung wird die Bewertung so verändert, dass der angezeigte dB(A)-Wert dem durchschnittlichen Hörempfinden möglichst nahe kommt. Als Beispiel soll das Empfinden unterschiedlicher Kabinengeräusche im Lfz-Muster C 160 „Transall“ (vorwiegend tieffrequent – zivil Turboprop Dash 8 oder ATR 42) oder beim Tornado (WS PA 200 „Tornado“) (vorwiegend höherfrequent – zivil vergleichbar den alten Triebwerken der Boeing 707) angeführt werden.

12.2.2 Schallwahrnehmung

Äußeres Ohr – Gehörgang	Schallleitung im Medium Luft, Luftschwingung, mechanische Schwingung
Mittelohr	Schallleitung durch Schallwellentransformation als Massenschwingung der Gehörknöchelchenkette
Stapes	Schallleitung durch Schalltransformation der Gehörknöchelchen - Schwingung in Form einer Wanderwelle
Cochlea	Die zusammengesetzte Schwingung der Flüssigkeitsschwingung wird in einzelne Sinusschwingungen zerlegt, die im korrespondierenden Resonanzbereich zu einer Erregung der Haarzellen führt mit dem Aufbau eines elektrischen Potentials („Fourieranalyse“)
Nervus acusticus	Leitung der elektrischen Impulse
Hörbahn und Hörzentrum	Verschaltung der elektrischen Nerven-potentiale zu einer Wahrnehmung

12.2.3 Schallwirkung auf den Menschen

Zur Beurteilung der Schallwirkung auf den Menschen ordnete Lehmann bereits in den fünfziger Jahren die Beschallungsreaktionen in ein Schema mit definierten menschlichen Individualreaktionen ein. Die psychischen Wirkungen sind schallunspecifisch und können auch durch andere Sinnesreize ausgelöst werden.

Stufe I: 30 - 65 dB(A): Psychische Wirkungen, Konzentrationsschwäche, Aufmerksamkeitsverlust, erhöhte Ermüdbarkeit, Schlafstörungen

Diese Wirkungen sind bei Aufenthalt im Schallfeld auslösbar und allein abhängig von der psychischen Verfassung, Intellekt und Einstellung zum Schallfeld.

Dabei werden Geräusche mit vorwiegend hohen Frequenzanteilen (Kreischen, Pfeifen) störender als tiefes Brummen oder Rauschen empfunden. Als besonders psychisch beeinträchtigend wirken pulsierende, diskontinuierliche und überraschende Geräusche. Schlafstörungen mit Minderung der Schlafentiefe treten z.B. bei Schichtdienst ein, da hier in einer physiologisch ungünstigen Phase der zirkadianen Rhythmik Einwirkungen auftreten. Die Beeinträchtigungen wirken sich als verstärkender Faktor unabhängig vom absoluten Schallpegel aus. Krankheitsverläufe können dadurch richtungsweisend verändert werden.

Stufe II 65 - 90 dB(A) Vegetative Reaktionen, Hemmungen der Magenperistaltik und Speichelsekretion, Anstieg der diastolischen Blutdruckwerte, ab 70 dB(A) Stoffwechselsteigerung periphere Gefäßverengung, Pupillenerweiterung, verminderte Hautdurchblutung über 80 dB(A) Innenohrhaarzellschäden bei langjähriger Einwirkung

Die psychischen Einflüsse wirken auf das vegetative Nervensystem, je nach Konstitution in unterschiedlicher Stärke, im Sinne der Erhöhung des Sympathikotonus. Gesundheitsstörungen durch Schallereignisse können nur selten im Sinne einer Dosis - Wirkung - Beziehung ursächlich entschlüsselt werden. Ein ursächlicher Zusammenhang von Schallbelastung und Innenohrhaarzellschaden ist für eine Dauerbelastung über 80 dB (A) bei langjähriger Beschallung wahrscheinlich, sicher ab einer Beschallung über 85 dB (A) nachgewiesen. Andere Gesundheitsstörungen sind im Sinne einer Noxenaddition zu werten unter besonderer Berücksichtigung der psychischen Verfassung, die von der gegebenen Situation („ausgeliefert sein“), Persönlichkeitsstruktur, Einstellung zum Schallerzeuger und der Charakteristik des Schallemission. Eine Gewöhnung an Schallereignisse ist im Sinne einer Reaktionsabschwächung durch Ermüdung der Rezeptoransprechbarkeit mit Minderung der Schädlichkeit nicht nachgewiesen, für die Haarzelle gilt sogar die Addition der schädigenden Einwirkung - Schalltrauma.

Stufe III: 90 - 120 dB(A) Vorübergehende Hörschwellenabweichung (TTS) (Temporary Threshold Shift) - von Intensität und Dauer des Schallereignisses abhängig, Tinnitus, beginnende Störung des Sprachverstehens

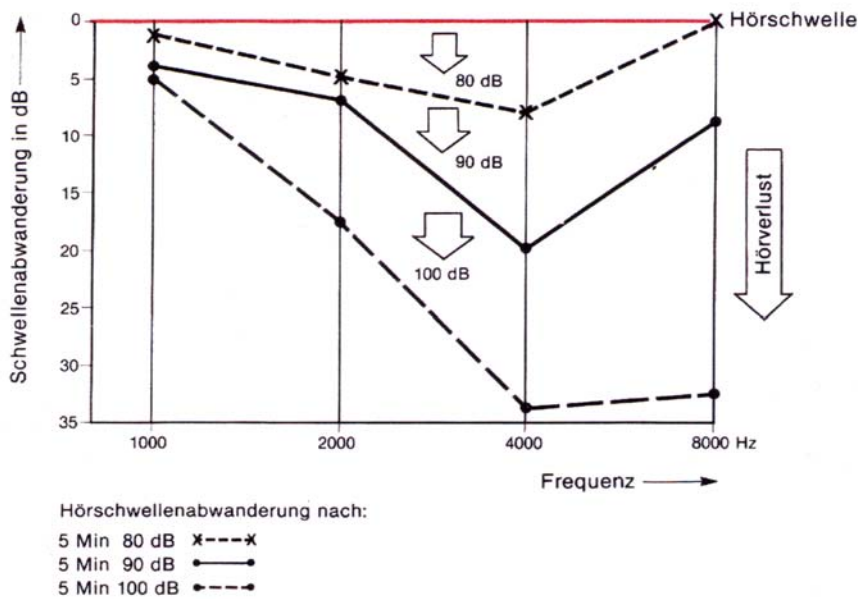


Abb. 12.7: Schwellenabwanderung nach 5 min Geräuschbelastung in Abhängigkeit von der Lautstärke (nach Nakamura)

Die vorübergehende Schwellenabwanderung geht der eigentlichen bleibenden Hörschädigung voraus und ist noch vollständig rückbildungsfähig. Als Ursache wird eine Stoffwechsellerschöpfung der Innenohrhaarzelle angesehen. Die Schwellenanhebung im Audiogramm ist der Nachweis der sich erholenden Innenohrhaarzelle oder die Regeneration der durch das Schalltrauma erloschenen „otoakustischen Emissionen“. Das Ausmaß des Schalltraumas ist

abhängig vom Schalldruck und der Schalldruckaufbaucharakteristik sowie der Schalldauer und äußert sich subjektiv als Vertäubungsgefühl mit einem Tinnitus, der die Dauer der Schwellenabweichung überdauern kann. Wer mehrere Stunden in einem Auto fährt und Musik hört oder ohne Gehörschutz in der Transall mitgeflogen ist, kennt dieses Vertäubungsgefühl sicher.

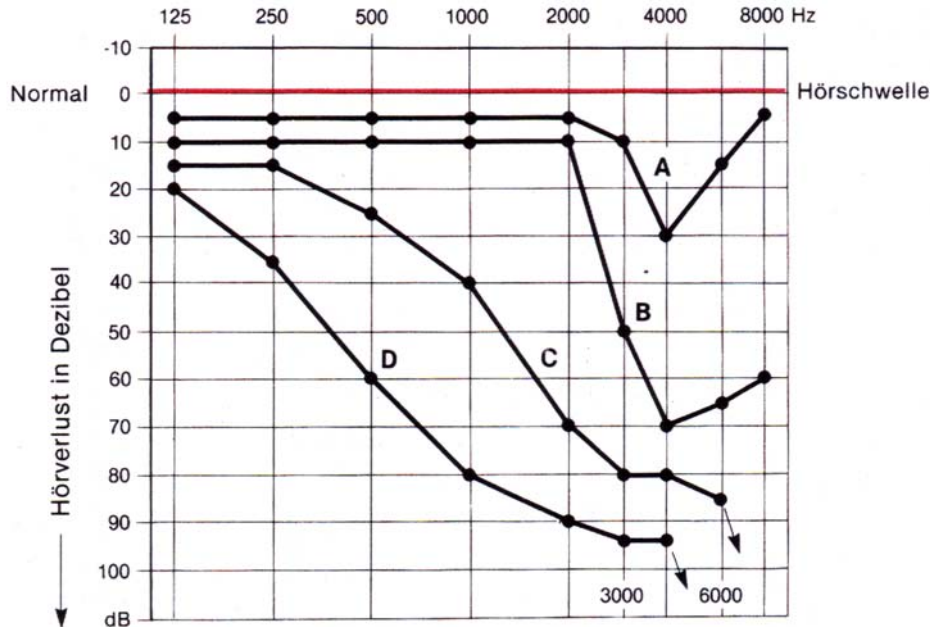


Abb. 12.8: Audiogramm eines fortschreitenden Hörverlustes bei langdauernder Lärmexposition

Stufe IV: 100 - 140 dB (A) Dauernde Schwellenabwanderung (Permanent Threshold Shift = PTS), irreversibler Strukturschaden der Innenohrhaarzelle, deutliche Störung des Sprachverstehens

Die dauernde Schwellenabwanderung ist Folge einer Zerstörung der Innenohrhaarzelle entweder durch ein singuläres Schalltrauma mit hohen Schalldrücken und steiler Schallaufbaucharakteristik oder durch wiederholte unterschwellige Schalltraumata im Zeitraum der vorübergehenden Schwellenabwanderung, sodass die vollständige „restitutio ad integrum“ nicht eintreten kann. Im Audiogramm findet sich dann eine Hörschwellenabsenkung im Bereich der Schädigungsstelle der Cochlea. Die Schädigungsstelle liegt im Bereich der Frequenz, die die maximale Resonanzschwingung in der Cochlea erzeugt.

Stufe V: ab 140 dB (A) Cerebrale Störungen, Bewegungsstörungen im Sinne von Koordinationsstörungen, Schwindel, bei tiefen Frequenzen Übelkeit und Beklemmungsgefühl oder Strukturschäden im Resonanzbereich der Organe

Die medizinischen Aspekte der Schallwirkung wurden zunächst im Schädigungsbereich der Cochlea erforscht, da hier eine Dosis-Wirkungs-Beziehung nachweisbar war und gute Schutzmechanismen anwendbar waren. Die psychischen Reaktionen treten unabhängig vom Gehörschutz auf und beeinträchtigen die zentralnervöse Informationsverarbeitung. Bei geistiger Tätigkeit im Schallfeld ab 85 dB (A) lässt sich eine erhöhte Störbarkeit bei der Bildung von z.B. Arbeitsstrategien feststellen. Schall wirkt vor allem in Verbindung mit anderen Faktoren, wie z.B.:

Aufgabenmerkmale	Schwierigkeit, Dauer, Wichtigkeit, Termindruck u.a.
Äußere Arbeitsbedingungen	Temperatur, Feuchtigkeit, Lichtverhältnisse, Tageszeit, u.a.
Persönliche Voraussetzungen	Qualifikation, Verantwortungsbewusstsein, Anspannung, Ermüdbarkeit, Koordination, u.a.

12.2.4 Lärmbelastung im Flugbetrieb

Die angeführten Daten stammen überwiegend aus Messberichten der Wehrtechnischen Dienststelle für Luftfahrzeuge (WTD 61) in Manching. Kritisch angemerkt werden muss, dass keine vergleichbaren Messdaten vorliegen.

Strahlflugzeuge im Nahbereich (15 m Radius)		
PA 200 „Tornado“	Leerlauf	96 dB (A) – 124 dB(A)
	85 %	106 dB(A) – 124 dB(A)
	Vollast mit Nachbrenner	117 dB(A) – 131 dB(A)
	Im Flugzeugschutzbau	
	Leerlauf	116 dB(A) – 123 dB(A)
	85 %	129 dB(A) – 131 dB(A)
F-4 „Phantom“	Im Nahbereich (10 m Radius)	
	65 %	93 dB(A) – 110 dB(A)
	96 %	121 dB(A) – 151 dB(A)
	Im Freien (100m Radius)	
	65 %	55 dB(A) – 92 dB(A)
	96 %	88 dB(A) – 119 dB(A)
	Im Flugzeugschutzbau	
	65 %	112 dB(A) – 115 dB(A)
	80 %	129 dB(A) – 133 dB(A)
Hubschrauber	Im Nahbereich (10 m Radius)	
BO 105	Leerlauf	94 dB(A) – 114 dB(A)
	Vollast	102 dB(A) – 103 dB(A)
	Schwebeflug	100 dB(A) – 103 dB(A)
CH-53G	Im Nahbereich	
	Vollast	106 dB(A) – 108 dB(A)
	Im Freien (100 m Radius)	
	NG 83 %	81 dB(A) – 83 dB(A)
UH-1D	Im Nahbereich (10 m Radius)	
	Leerlauf	94 dB(A) – 107 dB(A)
	Vollast	101 dB(A) – 110 dB(A)
	Im Freien (100 m Radius)	
	Leerlauf	71 dB(A) – 79 dB(A)
	Vollast	74 dB(A) – 85 dB(A)
Transportflugzeuge	Im Freien (100 m Radius)	
C 160 „Transall“	Vollast	98 dB(A) – 100 dB(A)
	Nahe GTG-Hilfsaggregat	118 dB(A)

Die extraauralen Messwerte wurden in unterschiedlichen Abständen und Laststufen gemessen. Aus der Vielzahl der unterschiedlichen Lärmquellen sollen nur einige typische und weit verbreitete genannt werden, und zwar an Arbeitspositionen des beteiligten Personals soweit die Schädlichkeitsgrenze von 90 dB(A) überschritten wird. Nach den ISO-Richtlinien wird der Standlärm in dB(A) von 15 ° zu 15 ° rund um die Maschine im Umkreis von 100 Metern ermittelt, dazu treten Messwerte in bestimmten typischen Arbeitsbereichen direkt an der Maschine auf. Die angegebenen Werte variieren je nach Bodenbewuchs, Windrichtung und Stärke des Windes sowie reflektierenden Flächen. Bei Standlärm mit Volllast liegen die höchsten Schallpegel seitlich hinter der Maschine in der Strahlvermischungszone, da hier starke Turbulenzen zwischen ruhender Umgebungsluft und Hochgeschwindigkeitsschubstrahl entstehen; nach vorne zu sind die Pegel um 10 bis 20 dB geringer. Im Leerlauf liegen die Gesamtpegel wesentlich niedriger.

Angeführt seien zudem einige arbeitsmedizinisch wichtige Bodenpersonalbelastungen, sofern nicht moderne schallgedämmte Maschinen genutzt werden.

Hilfsaggregate	Anlassgerät GPE		103 dB(A)
	Startbahnenteiser	Außen	118 dB(A)
		Im Fahrerhaus	96 dB(A)

Aus den vorliegenden Messwerten geht eindeutig hervor, dass das technische Personal besonders chronisch schalltraumatisch gefährdet ist. Das Tragen von Schallschutzkleidung, Gehörschutz sowie die berufsgenossenschaftliche Überwachung (G 20 Lärm) in regelmäßigen Abständen sind deshalb erforderlich.

Geräuschpegel im Cockpit in Ohrnähe der Piloten:

Flugbetriebsdaten		Schallpegel
MiG 29	Horizontalflug 1000 km/h	112 dB(A)
	Cruising Speed 600 km/h	95 dB(A)
PA 200	Horizontalflug 472 kt	105 dB(A)
F-4F	Luftkampf – FL 340	105 dB(A)
CH-53G	Horizontalflug 170 kt / 2.500 ft	101 dB(A)
UH-1D	Horizontalflug 100 kt / 2.500 ft	98 dB(A)
BO 105	Horizontalflug 110 kt	104 dB(A)
C 160	Reiseflug 170 kt / FL 200	91 dB(A)

Die Flugzeugführer und Besatzungen tragen Helme oder Sprechgeschirre, bei denen die Hörkapseln in schalldämpfende Ohrpolster eingelassen sind. Ein Helm, der zuverlässig den Cockpitschall und den erforderlichen Sprachschallpegel auf einen akzeptablen und die Haarzellenfunktion nicht beeinträchtigenden Schalldruck reduziert, ist bisher nicht vorhanden. Für Jetflugzeuge ist nach wie vor das Tragen von Schaumgummigehörschutz unter dem Helm erforderlich, um die erforderliche Schallreduzierung zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit durch Veränderung des Verhältnisses Störschallpegel zu Sprachschallpegel zu erreichen. Die in anderen Flugzeugmustern verwendeten „headsets“ weisen eine zu geringe Schalldämmung auf, um von einer im Sprechfunkverkehr akzeptablen nicht cochleäre schädigenden Schallbelastung zu sprechen. Daher gilt auch hier, dass die Benutzung von Gehörgangsgehörschutz zur cochleären Protektion erforderlich ist. Neben dem fliegenden Personal ist aber auch das technische Personal besonderen Schallbelastungen ausgesetzt. Das Tragen von Schallschutzkleidung, Gehörschutz sowie die audiometrische Überwachung in regelmäßigen Abständen sind deshalb arbeitsmedizinisch erforderlich.

Ergänzung - Hörschäden durch Impulsschall

Impulsschall ist jeder Soldat zumindest während seiner Grundausbildung bei der Schieß- und Sprengausbildung ausgesetzt. Danach ist die Impulsschallbelastung je nach Laufbahn sehr unterschiedlich. Kennzeichen des Impulsschalls ist die sehr kurze Schallaufbauzeit im Millisekundenbereich mit hohem Schalldruck. Besonders traumatisierend sind gedeckte Schießstände, weil hier durch Schallreflexion die Druckspitzen noch verstärkt werden. Technisches Personal in Flugzeugsheltern, Ausbildungspersonal beim Schießen gehört zum besonders gefährdeten Personenkreis für chronische Impulsschallschäden mit Innenohrhaarzelldegeneration schon nach kurzer ungeschützter Expositionszeit. Typisches Zeichen einer Impulsschallschädigung ist das unmittelbare Vertäubungsgefühl mit einem Begleittinnitus. Erste Hilfemaßnahme ist die sofortige Lärmkarenz und die notfallmäßige rheologische Behandlung. (Haftungsproblem, WDB-Anspruch). Das Zeitintervall zwischen Traumazeitpunkt und Therapiebeginn ist statistisch ein wesentlicher Faktor für die „restitutio ad integrum“. Die rheologische Therapie kann ohne vorhergehende Audiometrie nach Entfernung aus dem Lärmbereich begonnen werden. Der wesentliche Unterschied zwischen einem Schalltrauma und der Komplikation bei einem Explosionsschalltrauma ist die Trommelfellzerreiung mit oder ohne Rundfenstermembranruptur. Die Innenohrhaarzellschädigung allein ist dagegen kein Unterscheidungskriterium, wohl aber ein pantonaler Hörverlust (Rundfenstermembranruptur bedenken).

Daten über Schusswaffenlärm (entnommen der Merkschrift: Lärmprobleme der Bundeswehr)

	Druckpegel [dB]	Wirkdauer [ms]
Pistole P1 am Ohr des Schützen	163 dB(A)	0,2
Leuchtpistole, je nach Patronenart	156 dB(A) – 167 dB(A)	0,5 – 0,8
Gewehr G3, am linken Ohr des Schützen	161 dB(A)	1,0
Maschinengewehr MG1 am Ohr d. Schützen	155 dB(A)	1,5 – 2,0
Panzerfaust leicht, am Ohr des Schützen	183 dB(A)	0,8 – 1,5
Panzerfaust schwer, am Ohr des Schützen	187 dB(A)	2,0
Flak 40 mm, Richtschütze	170 dB(A)	1,0
Kanone 105 mm Panzer Leopard, Luke offen	150 dB(A)	30
Kommandant und Ladeschütze, Mörser 122 mm, leicht, in Mörserträger, Luke offen, Richt- und Ladeschütze	180 dB(A) – 184 dB(A)	

Ein wirksames Hörschutzprogramm ist aus diesen Gründen im Rahmen der Streitkräfte notwendig.

Es muss umfassen:

- lärmmindernde Maßnahmen an der Schallquelle
- Benutzung von persönlichem Hörschutzmaterial wie Gehörgangshörschutz, Hörschutzkappen, Hörschutzkleidung
- audiometrische Überwachung des lärmgefährdeten Personals nach G 20 (Lärm)

Als Lärmbereich wird nach der Unfallverhütungsvorschrift der Ort bezeichnet, an dem die fachkundige Ermittlung einen ortsgebundenen Beurteilungspegel von 85 dB(A) bzw. 90 dB(A) feststellte oder der Höchstwert des nicht bewerteten Schalldruckpegels mindestens 140 dB oder mehr ergab. Werden Personen im Lärmbereich beschäftigt, ist grundsätzlich die Gefahr einer Gehörschädigung gegeben. Während bei Beurteilungspegeln von 85 dB(A) bis 89 dB(A) Gehörschäden nur bei langandauernder Lärmbelastung auftreten können, nimmt bei Beurteilungspegeln ab 90 dB(A) die Schnelligkeit der irreversiblen Innenohrhaarzellschädigung zu. Bei Beurteilungspegeln unter 80 dB(A) ist eine Schädigung nicht wahr-

scheinlich. Kritisch wird der Bereich zwischen 80 - 85 dB(A) beurteilt, da bei geringfügiger Unterschreitung von 85 dB(A) genetische Innenohrhaarzelldefekte schneller zur Ausprägung kommen können, ebenso wie man zunehmende Innenohrhaarzelldegenerationen in diesem Bereich nicht sicher bei Erkrankungen wie Hörsturz, Hörsturzrezidiv oder Morbus Meniere aber auch bei ausgedehnten Ohrradikalhöhlen und beim Stapesersatz nicht allein der Grunderkrankung anlasten darf. Bei extrem hohen Schalldrücken von mehr als 140 dB (Knalle, Explosionen) können Gehörschäden schon durch Einzelschallereignisse verursacht werden, in Einzelfällen auch bereits bei niedrigeren Schalldrücken.

12.2.5 Hörschutz

Von der Emissionsquelle breitet sich die Schallwelle aus und wirkt auf das Ohr und den menschlichen Körper. Die Schallwelle wird im Medium Luft fortgeleitet und trifft im Bereich der Ohrmuschel auf den Schalltrichter, der mit dem Gehörgang den Luftkanal zum Mittelohr bildet. Das äußere Ohr wird durch das Trommelfell vom Mittelohr getrennt. Das Trommelfell ist mit der sich anschließenden Gehörknöchelchenkette für die Transformation der luftvermittelten Schallwelle in eine mechanische Schwingung erforderlich, um eine Übertragung auf das Innenohr über die Stapesfußplatte zu ermöglichen. Die Stapesfußplatte als Endglied der mechanischen Gehörknöchelchenschwingungskette schließt den flüssigkeitsgefüllten Raum der Innenohrschnecke ab und überträgt die mechanische Schwingung als Flüssigkeitswanderwelle auf die Cochlea. Entspricht nun die Schwingungsamplitude der Wanderwelle einer Schneckenlokalisation, bei der sich ein Resonanzphänomen zeigt, so führt diese Resonanzschwingung zu Scherkräften an den an der Basilarmembran ansetzenden Innenohrhaarzellen. Die durch die Wanderwelle erzeugten Scherkräfte an den Innenohrhaarzellen sind der adäquate Reiz für die Transformation von mechanischer Energie in elektrische Energie durch Nerveneinzelzellentladungen. Die in der Cochlea erzeugten elektrischen Impulse werden in der Hörnervenbahn zu den höhergelegenen Hörzentren fortgeleitet und dort zu einem bewussten Höreindruck verarbeitet. Der Ort, an dem die mechanische Energie in elektrische Einzelpotentiale umgewandelt wird, ist unsere an der Basilarmembran anheftende Innenohrhaarzelle. Wir wissen heute, dass hier nicht eine starre Verbindung vorhanden ist, sondern die Innenohrhaarzelle aktiv auf die durch die Wanderwelle erzeugten Scherkräfte reagiert und sich kontrahieren kann, wodurch eine energiearme aber messbare retrograde Wanderwelle gegen die Stapesfußplatte erzeugt wird. Die Abstrahlungsenergie wird bei der so genannten otoakustischen Emission gemessen. Nachdem die otoakustischen Emissionen als Phänomen der Innenohrhaarzelle zweifelsfrei sich bestätigten, wurden die lärmbedingten Innenohrhaarzellschäden ebenso wie die Degeneration erklärbar. Unser Mittelohr überträgt eine Schallwelle über die Gehörknöchelchenkette nahezu energieverlustfrei bis etwa 60 dB(A). Bei einer höheren Lautstärke wirkt ein Schutzmechanismus, der die an der Stapesfußplatte übertragene Energie zum Aufbau der Wanderwelle dämpft. Wir lösen diesen Schutzmechanismus bei der Stapediusmessung aus. Der Schutzmechanismus setzt eine Impulscharakteristik voraus, auf die das Ohr reagieren kann. Entwicklungsgeschichtlich haben die heutigen technischen Schalle eine andere Charakteristik, da sie einen sehr steilen Anstieg oder eine so hohe Energie besitzen, dass dieser Schutzmechanismus versagt und die Energie des Schallereignisses bis in die Cochlea fortgeleitet wird und mechanische Zerstörung verursacht. Typische plötzliche Schallereignisse sind Explosionen oder Knallereignisse wie Schüsse oder Sylvesterknallkörperentladungen; typische Dauerschallereignisse sind Niethämmer in der Industrie oder die Abstrahlungsenergie bei der Überprüfung von Strahltriebwerken oder beim Flugzeugstart die Voll-Last-Treibwerksleistung. Treffen diese Schallenergien auf das ungeschützte Ohr sind Einzelschallereignisse mit Dauerschäden verbunden und können zu dem lästigen posttraumatischen Tinnitus führen. Der Abstand von der

Schallquelle ist dabei der entscheidende Faktor. Als eine mögliche Hypothese wird diskutiert, dass bei diesen Ereignissen die Energie der Wanderwelle so groß ist, dass die Scherkräfte die Dehnungsfähigkeit der Haarzelle übersteigen und die Verbindung zur Basilarmembran reißt, wodurch die irreversible Zelldegeneration eingeleitet wird. Kommt es bei Explosionsergebnissen zu starken Luftdruckanstiegen, so ist das elastische Schwingungssystem Trommelfell überfordert und zerreißt. Tritt dabei keine Rundfenstermembranruptur ein, so sind die Innenohrschäden oftmals geringer als bei Knallereignissen bei denen diese Rupturen auftreten. Die chronische Lärmschädigung ist auch durch die erneute Belastung in der Erholungsphase nach Lärmbelastung bedingt. Zur Verdeutlichung einige Beispiele:

Jeder von uns kennt das Phänomen der Vertäubung nach langen Autofahrten mit gleichzeitigem Radiohören. Konzentrationsarmes Hören bedeutet eine Lautstärke etwa 5 - 10 dB(A) über der Umgebungslautstärke. Steigen wir aus dem Wagen bei einer Rast, werden wir feststellen, dass die unverändert belassene Lautstärke unangenehm laut empfunden wird, und wir regelnd eingreifen. Lärmarbeiter beschreiben dieses Phänomen ebenfalls dadurch, dass sie Reaktionen der Familienmitglieder beschreiben wie z.B. die Lautstärke des Fernsehers, die als zu hoch von unbelasteten Angehörigen empfunden wird. Oder sprechen sie den walkmanhörenden Jugendlichen an, dessen Musik sie gut auf einer Straße verstehen können, so benötigen sie eine höhere Lautstärke als bei anderen Personen im gleichen Umfeld. Audiometrieren nach Lärmbelastung und nach 12 - stündiger Ruhephase lässt dieses Phänomen objektivierbar und messbar werden. Kommt es nicht zu einer vollständigen Erholung, so erfolgt die nächste Lärmbelastung in einem chronischen Überlastungsbereich der Innenohrhaarzelle. Dies führt zur schleichenden Degeneration, die im Zelluntergang mit Funktionsverlust endet, wie wir es aus anderen Bereichen der Pathophysiologie bei Überlastung kennen. Nachfolgende Tabelle zeigt die personenbezogenen Beurteilungspegel bezogen auf 85 dB(A) Äquivalenzdosis:

88	dB(A)	4	h
91	dB(A)	2	h
94	dB(A)	1	h
97	dB(A)	30	min
100	dB(A)	15	min
103	dB(A)	7,5	min

Die heutigen Walkmen erreichen diese oberen Werte, sobald man im Straßenverkehr in ca. 1 m Abstand die Musik wahrnehmen kann. Die Wirkung des Hörschutzes durch den Fliegerhelm wird durch das Tragen von Gehörganggehörschutz erhöht. Erklärbar wird daraus auch die Fehleinschätzung über den Nutzen von Hörgeräten. Die älteren Modelle verstärken ungefiltert sämtliche akustischen Signale, ohne dass eine Selektion und Abschwächung des Störschalles erfolgt. Neuere Modelle verstärken selektiv. Ungeachtet dessen bedeutet die Nutzung eines Hörgerätes die flugmedizinisch bedenkliche Situation der Einengung des akustischen Nutzfeldes durch die physikalisch bedingte Begrenzung durch den Hörgerätelautsprecher.

Das Benutzen eines Headsets bedeutet:

- Nutzung des größeren akustischen Nutzfeldes
- Nutzung der physikalisch höheren Dynamik
- Möglichkeit der Separierung von Störschall - und Sprachschallsignal ohne cochleäre Belastung

(Die Nutzung von „acoustic noise reduction“ Systemen wird durch die Darstellung der Wirkung von Gehörgangsgeschütz ebenfalls relativiert. Die derzeit erhältlichen Systeme (Stand 10/2001) können lediglich im Frequenzband bis 750 Hz bis 850 Hz einen frequenzversetzten Gegenschall produzieren, der zu einer akustischen Schallenergiereduktion führt. Im Frequenzband von etwa 750 Hz bis 1.500 Hz kommt es zu einer Schallenergieverstärkung mit einer Belastung der Cochlea zu Beginn des Hauptsprachbereiches bis zum 4-fachen der Ausgangsschallenergie. Oberhalb von 1.500 Hz sind die Systeme wirkungslos. Der subjektive Eindruck einer Schalldämmung und Sprachverstehensverbesserung beruht auf dem dichten Sitz der Kopfhörer und ihrer guten Schalldämmung wie der sehr guten Lautsprecher. Bei ihrer Integration in den Fliegerhelm wird die Halswirbelsäule mit zusätzlichem Gewicht belastet. Hier sind mit der Industrie bei der zukünftigen Helmentwicklung mit digitalisierten Stereohelmen weitere Untersuchungen zur Sprachverstehensverbesserung und mit optimalem Schallschutz erforderlich, wobei gleichzeitig die Gefahr einer elektromagnetischen Beeinflussung mit Störschallsignalausfall zu beachten wäre. Die Realisierung des Zieles, dem Einsatzpiloten einen Arbeitsplatz zukommen zu lassen, der den derzeitigen Anforderungen an seine geistige Belastung entspricht, ist derzeit nicht absehbar.)

Für den Betrieb als Arbeitsumgebung heißt es in der Unfallverhütungsvorschrift:

§ 15 Schutz vor Lärm:

- In Betriebsräumen ist der Schallpegel so niedrig zu halten, wie es nach der Art des Betriebs möglich ist. Der Beurteilungspegel am Arbeitsplatz in Arbeitsräumen darf unter Berücksichtigung der von außen einwirkenden Geräusche höchstens betragen:
- bei überwiegend geistiger Arbeit 55 dB(A)
- bei einfachen oder überwiegend mechanisierten Bürotätigkeiten und vergleichbaren Tätigkeiten 70 dB(A)
- bei allen sonstigen Tätigkeiten 85 dB(A), soweit dieser Beurteilungspegel nach der betrieblichen möglichen Lärminderung zumutbarer Weise nicht einzuhalten ist, darf er bis zu 5 dB(A) überschritten werden.
- In Pausen-, Bereitschafts-, Liege- und Sanitätsräumen darf der Beurteilungspegel höchstens 55 dB(A) betragen.

Der berufsgenossenschaftliche Grundsatz G 20 – veröffentlicht bei den Berufsgenossenschaften und für die Bundeswehr in der ZDv 46/32 - legt fest, dass an einem Arbeitsplatz bei einer täglichen Arbeitszeit von 8 Stunden und einer Wochenarbeitszeit von 38,5 Stunden mit mehr als 85 dB(A) Dauerschallpegel (Lärm Arbeitsplatz) regelmäßige Untersuchungen und Nachuntersuchungen zu erfolgen haben. Die Untersuchungszeiträume sowie die nachzuweisenden Untersuchungen sind ebenfalls dort festgelegt. Die Angabe der Grenzwerte und ausschließenden Erkrankungen gibt ein festes Entscheidungskorsett vor. Legen wir die Bestimmungen der Unfallverhütungsvorschrift und des Grundsatzes G 20 (Lärm) zugrunde, bedeutet es für unser fliegendes Personal wie Bodenbetriebspersonal eine Beschallung während der täglichen Arbeitszeit, die vegetative Reaktionen auslösen kann (Lehmann). Dabei ist neben dem hörschädigenden Lärm auch ein Frequenz- und Lautheitsspektrum zu beachten, welches Wechselwirkungen auf die Innenohrhaarzellen sowie die Druck- und Fühlsensoren unseres Körpers ausübt. Die Beeinflussung menschlicher Organe, Organsysteme und physiologischer Funktionen betreffen den Resonanzbereich des Körpers. Die Mittelwerte liegen im Infraschallbereich, aber Fühlbereich für Ganzkörpervibrationen - 4 Hz Thorako-Abdominalbereich - 5 Hz und die Wirbelsäule - 12 Hz im unteren Hörbereich für den Kopf mit - 20 Hz für das isolierte Auge - 30 Hz und den Brustkorb - 60 Hz (Dupuis 1984).

Schallereignisse und Vibrationen führen bei:

1 – 3 Hz zu Atemnot	4 – 10 Hz zu erschwerter Atmung
4 – 9 Hz zu allgemeinem Unwohlsein	4 – 12 Hz zu Rückenschmerzen
13 – 20 Hz zu Muskelverspannungen, Kopfschmerzen und Sprachbeeinflussung	

12.3 Verwendete und weiterführende Literatur

BMVg InSan I 2, Wer gut hört hat mehr vom Leben. Stand September 2001, DSK I 1408220033

Bronkhurst, A. W., Veltman J. A., van Breda L. Application of a Three-Dimensional Auditory Display in a Flight Task. In: Hum Factors, 38 (1); S. 23-33, 1996

Brüel & Kjaer. Verkehrs- und Arbeitslärm in der Nachbarschaft, 1989

Burkett, P. R., Perrin W. F. Hypoxia and Auditory Thresholds. In: Aviat. Space Environ. Med., 47 (6), S. 649-51, 1976

Curry E. T., Boys, F. Effects of Oxygen on Hearing Acuity at Simulated Altitude. Eye, Ear, Nose & Throat. In: Monthly, 35, S. 239-45, 1956

Fluur, E., Adolfson J. Hearing in Hyperbaric Air. Aerospace Medicine, 37, S. 783-85, 1966

Fowler, B., Lindeis, A.-E. The Effects of Hypoxia on Auditory Reaction Time and P300 Latency. Aviat. Space Environ. Med., 63, S. 976-81, 1992

Fowler, B., Pric, H. A Comparison of Visual and Auditory Reaction Time and P300 Latency Thresholds to Acute Hypoxia. Aviat. Space Environ. Med., 66 (7), S 645-50, 1995

Hanschke, W. Speech language hearing test results of active duty pilots failing the pure tone audiometry limits of ICAO guidelines Method, Problems and Limits to verify the waiver status. AGARD-CP-596 Audio Effectiveness in Aviation, 1997

Hoffmann, E., Lärmprobleme bei der Bundeswehr. Merkschrift im Auftrag des BMVg, 1969

Kitahara, M., Ozawa, H., Kodama, A., Izukura, H., Inoue, S., Uchida, K., Effect of Atmospheric Pressure on Hearing in Normal Subjects. Acta Otolaryngol Suppl. (510), S. 87-91, 1994

Klein, S., Mendelson, S., Gallagher, T.J., The Effects of Reduced Oxygen Intake on Auditory Threshold Shifts in a Quiet Environment. J. Comp. Physiol. Psychol., 54, S. 401-4, 1961

Klein, S., Effects of Reduced Oxygen Intake on Bone Conducted Hearing Thresholds in a Noisy Environment. Percept Mot Skills, 13, S.43-7, 1961

Lehmann, G., Handbuch der gesamten Arbeitsmedizin, I. Band: Arbeitsphysiologie, Berlin/München/Wien, 1961

Schmidtke, H., Lehrbuch der Ergonomie, München/Wien, 1981

Smith, G. M., Seitz, C. P., Speech Intelligibility Under Various Degrees of Anoxia. J. Appl. Psychol. , 30, S. 182-91, 1946

Smith, G.M.: The Effect of Prolonged Mild Anoxia on Speech Intelligibility. J. Appl. Psychol. , 30, S. 255-64, 1946

Thomas, W. G., Summit, J., Farmer, J. C., Human auditory thresholds during deep, saturation helium-oxygen dives. J Acoust Soc Am., 55 (4), 1974

Wagstaff, A., Tvette, O., Ludvigsen, B., The Effect of a Headset Leakage on Speech Intelligibility in Helicopter Noise. Aviat. Space Environ. Med., 67, S. 1034-1038, 1996

13 WÄRMEHAUSHALT UND DIE AUSWIRKUNGEN EXTREMER TEMPERATUREN

13.1 Physikalische Grundlagen

Temperatur ist eine physikalische Größe, die den Wärmezustand eines physikalischen Systems kennzeichnet. SI-Einheit der Temperatur ist „Kelvin“ (K), wobei 0 K (Kelvin) die tiefste überhaupt mögliche Temperatur darstellt (absoluter Nullpunkt). Von der Kelvin-Skala abgeleitet ist die bei uns noch immer gebräuchliche Celsius-Skala mit der Einheit „Grad Celsius“ (°C).

Es gilt folgender Zusammenhang:

$$0\text{ °C} = 273\text{ K}$$

Im Angelsächsischen wird die Temperatur oft noch in „Grad Fahrenheit“ (°F) angegeben.

Es gilt folgender Zusammenhang:

$$\text{°C} = (\text{°F} - 32) \cdot \frac{5}{9}$$

$$\text{°F} = \text{°C} \cdot \frac{9}{5} + 32$$

Beispiele:

	K	°C	°F
Absoluter Nullpunkt	0	- 273	-459,7
Gefrierpunkt Wasser	273	0	32
Siedepunkt Wasser	373	100	212

Die Temperaturschwankungen auf der Erdoberfläche bewegen sich zwischen + 58 °C und – 95 °C. Nicht nur auf der Erdoberfläche kommen extreme Temperaturen vor. Ausgehend von der Standardatmosphäre mit einer Temperatur von + 15 °C am Boden errechnet sich beispielsweise in einer Flughöhe von 30.000 ft eine Lufttemperatur von - 45 °C. Im Hinblick auf den Temperaturhaushalt wirken in diesem Zusammenhang neben der Lufttemperatur folgende Umweltfaktoren auf den menschlichen Organismus ein:

- die Luftfeuchtigkeit,
- die Luftbewegung (Windgeschwindigkeit)
- die Wärmestrahlung (IR-Strahlung) der Umgebung

13.2 Physiologische Grundlagen

Der Mensch gehört zu den homoiothermen Lebewesen, das bedeutet, er versucht unter allen Umständen seine Körpertemperatur möglichst konstant zu halten. Der Energieumsatz folgt den Gesetzen der Thermodynamik. Bei den Betrachtungen bezüglich des unterschiedlichen Verhaltens der Körperkerntemperatur steht die Wärme im Mittelpunkt. Poikilotherme Lebewesen wie z.B. Frösche passen sich in ihrer Temperaturregulation wechselnd oder bunt an, d.h. bei niedrigen Umgebungstemperaturen sind die Körperkerntemperatur und der Stoffwechsel ebenfalls niedrig. Beim homoiothermen Lebewesen, also beim Menschen, beträgt der Grundumsatz ca. 1.920 kcal pro Tag = ca 8.000 kJ pro Tag. Der Freizeitumsatz, d.h. der Umsatz eines nicht körperlich arbeitenden Mannes beträgt etwa 2.300 kcal = 9.600 kJ pro Tag, was einem Sauerstoffverbrauch von etwa 330 ml pro Minute bei einem RQ von 0,82 entspricht. Beim Schwerstarbeiter wird mit 4.800 kcal pro Tag = 20.100 kJ gerechnet.

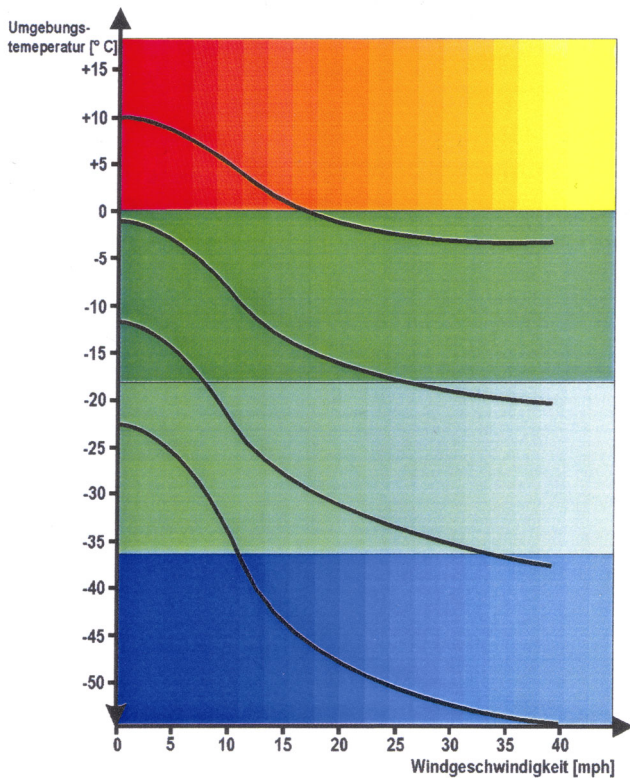


Abb. 13.1: Die zusätzliche Kühlwirkung durch Luftbewegung

Die Körperkerntemperatur bei den meisten homoiothermen Säugern liegt zwischen 36 °C und 39 °C, unabhängig von der Körpermasse (Maus, Elefant). Der Energieumsatz unter Ruhebedingungen ist eine Potenzfunktion des Körpergewichtes: $M = K \times W^N$, wobei N empirisch mit 0,75 festgelegt wurde. Diese empirischen Werte werden dadurch bestätigt, dass der Energieumsatz nicht auf die Masse bezogen werden kann, sondern auf die Oberfläche. Bezogen auf die Masseinheit $N = 1$ ist der Energieumsatz der Maus erheblich größer als der des Elefanten.

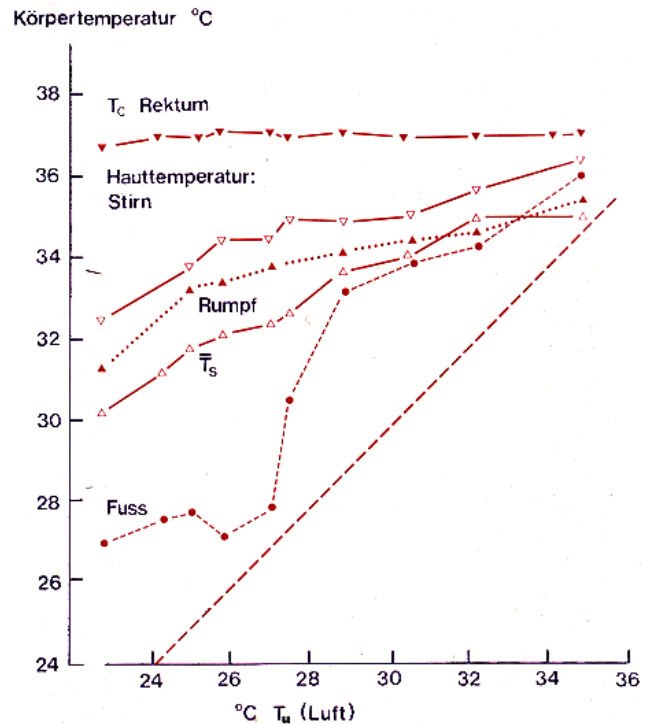
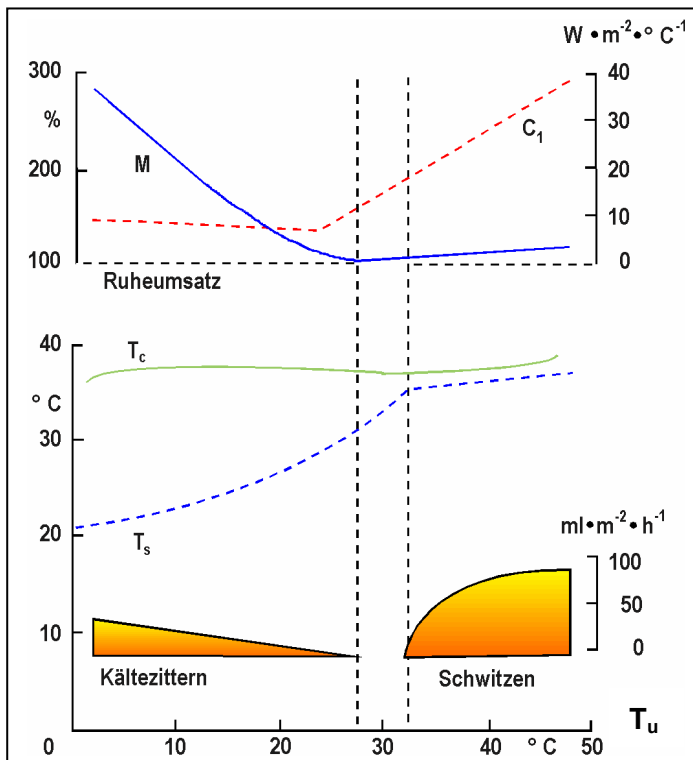


Abb. 13.2: Die zusätzliche Kühlwirkung durch Luftbewegung (M = metabolische Energieproduktion; C_i = innere Wärmedurchgangszahl; T_c = Körperkerntemperatur; T_s = mittlere Hauttemperatur; T_u = Umgebungstemperatur)



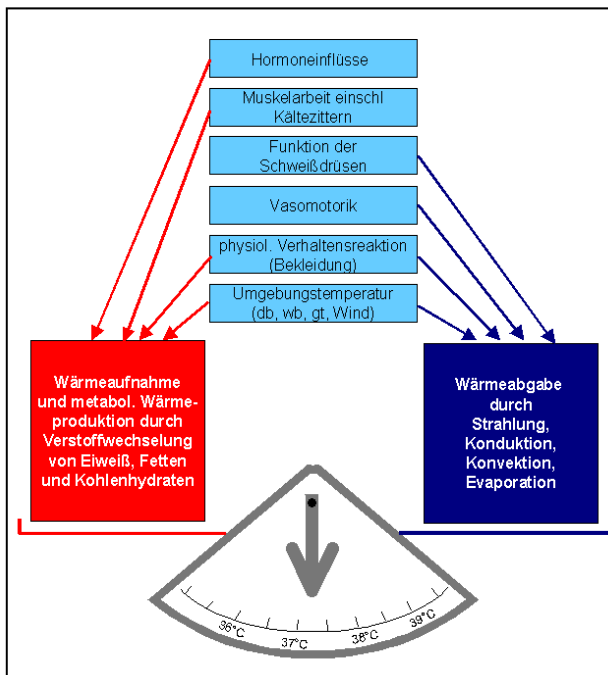
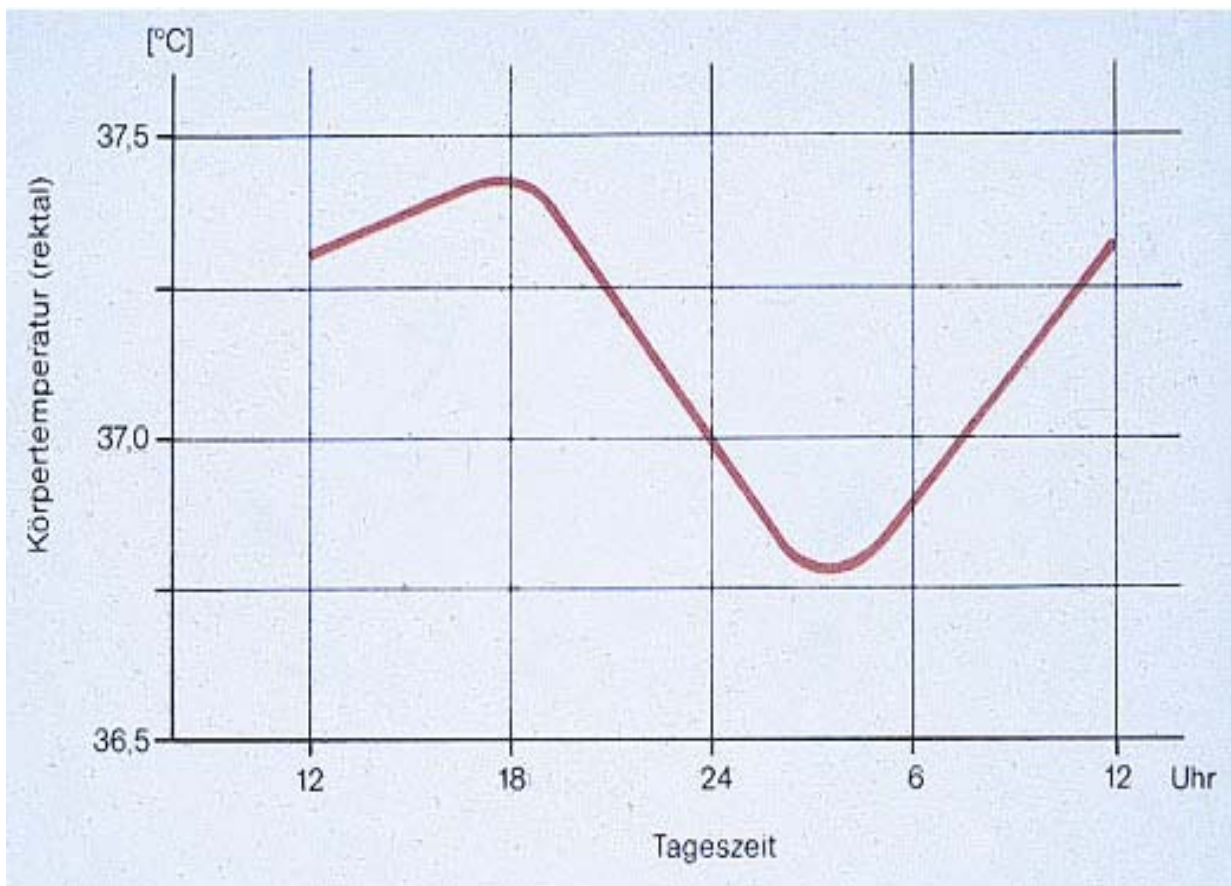


Abb. 13.3: Schematische Darstellung der thermischen Homöostase

Die Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe und die hierzu führenden Faktoren sind als Koppelung zwischen Wärmebelastung und Wärmeabgabe in Abb. 13.3 dargestellt. Zu Herz und Kreislauf gehört natürlich auch die Hautdurchblutung. Die Wärmeabfuhr durch Strahlung erfolgt nach den Gesetzen von Stephan BOLTZMANN. Bei der langwelligigen Infrarotstrahlung, die von der Haut ausgesandt wird, nähert sich der Emissionskoeffizient dem eines schwarzen Körpers. Es ist bemerkenswert, dass eine Änderung der Windgeschwindigkeit auf die Wärmeabfuhr durch Strahlung ohne direkten Einfluss bleibt. Unter Strahlungstemperatur wird die Temperatur der Strahlungsmedien wie z.B. Wände verstanden, und nicht die der umgebenden Lufttemperatur. Als praktisches Beispiel wird an die Wärmestrahlung von Hochöfen erinnert. Die Umgebungstemperatur im Hochofenbetrieb mag bei 20 °C als durchaus angenehm

empfunden werden, die Wärmestrahlung jedoch kann einen nahen Aufenthalt im Hochofenbereich unerträglich machen.



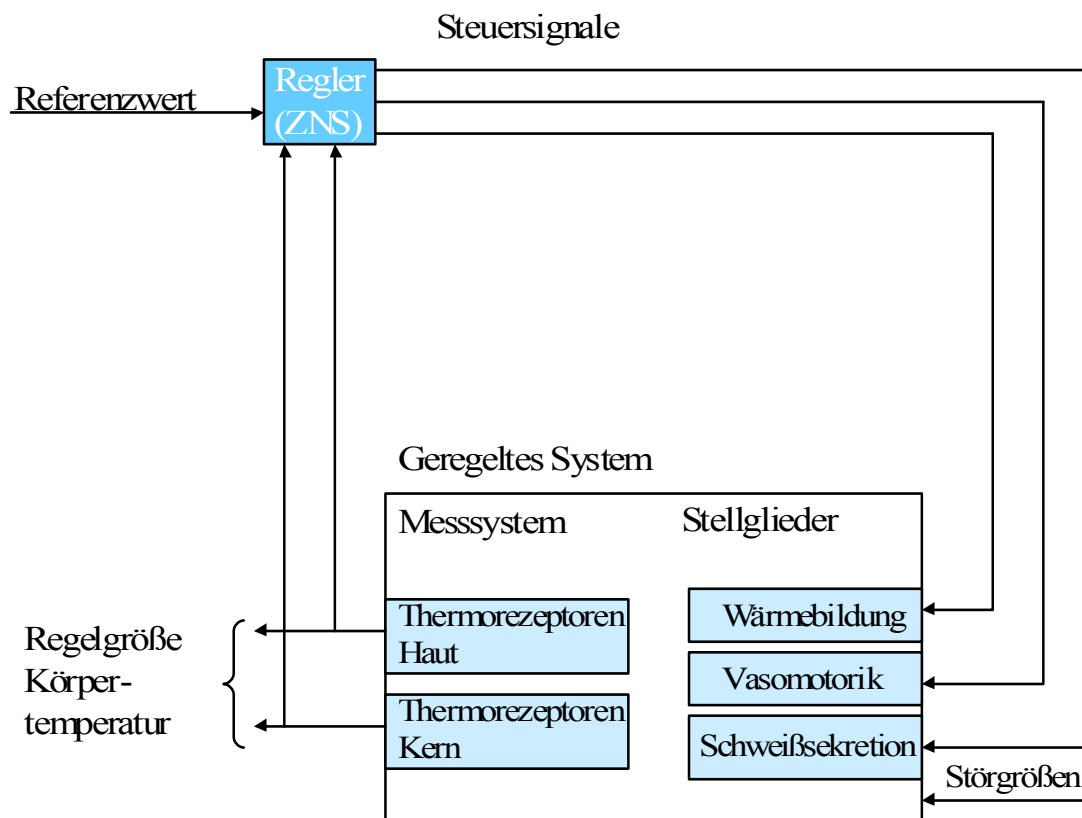


Abb. 13.6: Regelkreis

Die Umgebungstemperatur, auch „dry-bulb“ oder Trockentemperatur, liegt, z.B. in der Wüste, in der Nacht bei 30 °C. Durch den klaren Himmel wirkt jedoch die Strahlungskälte des Welt- raums und deshalb wird man selbst bei 30 °C Trockentemperatur ins Frösteln kommen. Wei- tere Möglichkeiten der Wärmeabfuhr sind die Konduktion und Konvektion. Die Konduktion wirkt im molekularen Bereich bzw. im Bereich der ruhenden Grenzschicht. Bei der Konvek- tion findet eine Wärmebewegung durch strömende Medien - im allgemeinen Luft bzw. Wasser - statt. Um der Konduktion und Konvektion entgegenzuwirken, passt sich der Mensch an die Witterungsbedingungen durch seine Kleidung an. Man spricht hier von einer Verhaltensreak- tion. Bei der Perspiration oder Evaporation wird die Wärme durch Wasserverdunstung abge- geben. Der Mensch gibt unter neutralen Bedingungen d.h., bei einer Umgebungstemperatur von 28 – 32 °C, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und bei Windstille ca. 20 % der Wärme durch Verdunstung ab. Das Wasser gelangt durch Diffusion an die Haut bzw. Schleimhautoberflächen und die evaporative Wirkung hängt von den Dampfdrücken der Haut und der Umgebungsluft sowie der Hautoberflächenkrümmung und der Windgeschwindigkeit ab. Die Wasserabgabe, die auf der Wasserdiffusion durch die Haut und Schleimhaut beruht, wird als Perspiratio insensibilis, auch als unbemerkte oder unwillkürliche Feuchtigkeitsabga- be oder extraglanduläre Wasserabgabe bezeichnet. Der erwachsene Mensch gibt ca. 10 ml pro Stunde durch die Perspiratio insensibilis ab. Über die Ausatemluft gibt er bei normaler Atmung ca. 15 ml pro Stunde ab. Der extraglandulären Wasserabgabe wird die glanduläre (über cholingere Sympathikusefferenzen) Wasserabgabe gegenübergestellt.

Diese ist steuerbar. Die Effektivität der Schweißdrüsensekretion ergibt sich durch die höhere Verdunstungswärme des Wassers, die ca. 580 kcal pro 1 Liter Wasser = 2.421 kJ pro 1 Liter Wasser beträgt. Durch Verdunstung von einem Liter Wasser kann beim Menschen 1/3 der Ruhewärmeproduktion des Tages abgegeben werden. Pro Stunde kann 1 Liter optimal verdampft werden. Die Schweißdrüsen können kurzfristig mehrere Liter Schweiß pro Stunde produzieren. Der Schweiß enthält 0,25 % gelöste Substanzen wie z.B. Natriumchlorid. Bei ausgeglichener Wärmebilanz strömt die produzierte Wärme über die Körperoberfläche zur Umgebung ab. Die oberflächennahen Teile des Körpers haben niedrigere Temperaturen als die zentralen Teile. In den Extremitäten, wie Beinen und Armen, bilden sich Temperaturgefälle in Längsrichtung aus, daneben besteht ein radiales Temperaturgefälle. Durch die unregelmäßige Gestaltung des Körpers ergibt sich deshalb ein kompliziertes Temperaturfeld. Die Abbildung 13.8 zeigt die Temperaturfelder des menschlichen Körpers bei warmer und kalter Umgebung. Die Körperkerntemperatur ist weder räumlich noch zeitlich konstant. Die Unterschiede sind 0,2 °C – 1,2 °C. Selbst das Gehirn weist ein radiales Temperaturgefälle von mehr als 1 °C auf. Die höchsten Temperaturen werden im Rektum und nicht, wie lange angenommen, in der Leber gefunden. Es gibt keine Festwerte. Für die Praxis reicht es aus, die an einem bestimmten Ort gemessenen Temperaturen als repräsentativ für die Körperkerntemperatur zu erklären, da es meist nur um Temperaturänderungen geht. Die Ösophagustemperatur entspricht am ehesten auf Höhe des rechten Ventrikels der wirklichen Körperkerntemperatur. Weitere Messstellen für die Körperkerntemperatur sind der äußere Gehörgang oder die Trommelfelltemperatur, die Mundbodentemperatur, die Axillartemperatur und die Rektaltemperatur. Die Temperaturen unterliegen auch einer circadianen Rhythmik (Abb. 13.5), das bedeutet, dass die Kerntemperatur in der Nacht um ca. 0,3 °C absinkt, die Hauttemperaturen sind dann leicht erhöht. Abb. 13.6 zeigt, dass es sich bei der Körperkerntemperatur um ein geregeltes System handelt. Der Regler wird durch den Hypothalamus und z.T. durch das Rückenmark dargestellt. Die Regelgröße ist die Körperkerntemperatur. Die Steuersignale werden sowohl über das spinale und supraspinale motorische System, als auch über das sympathische Nervensystem weitergegeben. Das motorische System aktiviert die Muskulatur und dient damit der Wärmebildung. Das sympathische Nervensystem wirkt auf das Vasomotorenzentrum und auf die Schweißdrüsen. Die Stellglieder sind die Wärmebildung, die Vasomotorik und die Schweißsekretion. Die Messwerterfassung oder das Messsystem besteht aus den Thermorezeptoren in der Haut und dem Körperkern. Dieses Regelkreisschema ist der Technik entliehen und arbeitet nach dem Prinzip der negativen Rückkopplung oder der Gegenkopplung. Die Funktion ist die eines Proportionalreglers. Das biologische Korrelat des Soll-Werts und der Körperkerntemperatur ist unbekannt. Das Phänomen der Anpassung passt nicht in den Regelkreis, obgleich natürlich zahlreiche Regelkreise im Körper miteinander in Beziehung gesetzt sind. Außer durch Information der peripheren und zentralen Temperaturrezeptoren wird die Area hypothalamica posterior auch über neuronale Verbindungen zwischen Hypothalamus und Formatio reticularis bzw. das limbische System beeinflusst. Auf diesem Weg können auch psychische Faktoren wie Aufmerksamkeit, Motivation etc. Einfluss auf das Temperaturempfinden und die kurzzeitige Temperaturanpassung ausüben.

Der menschliche Organismus hält seine Körperkerntemperatur weitgehend unabhängig von Schwankungen der Umgebungstemperatur auf einem relativ konstanten Niveau. Diese **Regelung der Körperkerntemperatur** erfolgt durch eine Reihe von unwillkürlich ablaufenden physiologischen Mechanismen, der Produktion von Stoffwechselwärme oder des Wärmestroms aus dem Organismus.

Diese physiologischen Regelmechanismen werden beim Menschen noch durch bestimmte Verhaltensweisen unterstützt (Kleidung, Wohnung, Heizung, kalte oder warme Getränke). Bei langsam erfolgender Zerstörung des Hypothalamus (z.B. durch krankhafte Prozesse) kann die Temperaturregulation teilweise auch von der Medulla oblongata und dem Rückenmark übernommen werden. Die Temperaturregulation erfolgt also nicht nur von einem umschriebenen Areal aus, sondern muss als ein hierarchisch aufgebautes System mit partiell eigenständiger Funktion und dem Hypothalamus als oberstem Koordinationszentrum verstanden werden. Das Temperaturregelzentrum erhält Informationen über die Umgebungstemperatur und über die Körperkerntemperatur. Zur Feststellung der Umgebungstemperatur dienen periphere Kälte- und Wärmerezeptoren im Bereich der Haut. Informationen über die Bluttemperatur (= Körperkerntemperatur) werden übermittelt von zentralen Rezeptoren wie der Area praeoptica des Hypothalamus und einigen Bereichen des Rückenmarks und der Medulla oblongata. Weicht die so festgestellte Körperkerntemperatur vom Sollwert ab, so reagiert der Organismus mit den physiologischen Mechanismen der Wärmebildung oder der Wärmeabgabe. Dies geschieht sowohl über das autonome Nervensystem (Vasomotorik, Schweißsekretion) wie auch über das willkürliche Nervensystem (Kältezittern), vgl. Abb. 13.2.

13.3 Die Einwirkung von Kälte

13.3.1 Reaktion auf Kälte; Kälteadaptation

Unter Kälteadaptation versteht man die Anpassung der Thermoregulation an niedrigere Umgebungstemperaturen. Sie geschieht durch eine vermehrte Wärmebildung und durch eine verminderte Wärmeabgabe.

Wärme wird durch den bei körperlicher Arbeit hohen Stoffwechsel gebildet. Der Wirkungsgrad der Muskelarbeit liegt in der Regel unter 25 %. Somit werden mehr als 75 % der umgesetzten chemischen Energie als Wärme freigesetzt.

Die produzierte Wärme wird hauptsächlich mit dem Blutstrom im gesamten Körper verteilt, wodurch die Körpertemperatur ansteigt.

Diese Tatsache nutzt der Organismus bei der Wärmebildung durch „Kältezittern“: Zunächst wird nur der Skelettmuskeltonus gesteigert, ohne daß es zu äußerlich sichtbaren Bewegungen kommt. Bei fortschreitender Kältebelastung geht die Tonuserhöhung in sichtbares Kältezittern über. Die so über Muskelarbeit produzierte Wärme führt zu einem Anstieg der Körpertemperatur.

Ein anderer Mechanismus der Kälteadaptation bewirkt eine verminderte Wärmeabgabe: Durch Vasokonstriktion der Blutgefäße in der Peripherie, vor allem der Haut, kommt es zu einer verminderten Durchblutung der Körperoberfläche und damit zu verminderter Wärmeabgabe über die Haut.

Eine physiologische Kälteadaptation liegt beim Menschen im Allgemeinen nicht vor. Er passt sich durch sein Verhalten wie Kleidung, Behausung, Heizung etc. an die äußeren Umgebungsbedingungen an und kann so als tropisch-subtropisches Lebewesen auch in extremen Klimazonen überleben. Untersuchungen an Gruppen, die besonders kälteexponiert waren, zeigten jedoch, daß eine spezielle Form der Kälteadaptation in einigen Fällen nachgewiesen werden konnte. So wird von einer Toleranzadaptation bei den ethnischen Gruppen australischer Eingeborener und koreanischer Perltaucherinnen gesprochen. Die Zitterschwelle ist zu niedrigeren Auslösewerten verschoben. Ein Absinken der Zitterschwelle läßt sich schon durch mehrmalige 30 – 60 minütige Belastung innerhalb weniger Tage hervorrufen.

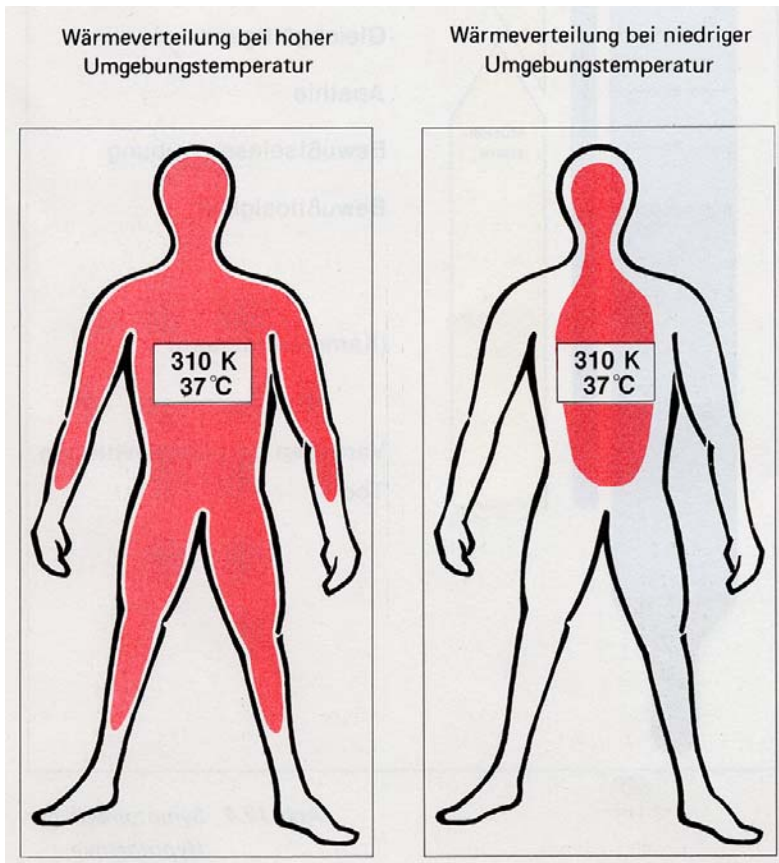


Abb. 13.7: Prinzip der Temperaturverschiebung im menschlichen Körper

Die metabolische Adaptation, d.h. eine Erhöhung des Grundumsatzes von 25 – 50 % konnte bei ethnischen Gruppen (Alakaluffindianer der Westpadagonischen Inseln und bei Eskimos) nachgewiesen werden.

Von lokaler Adaption spricht man nach wiederholten Kälteexpositionen z.B. der Hände, bei denen bei gut isoliertem Körper ein lokaler Kälteschmerz vermindert auftritt. Die Adern sind vermehrt durchblutet, wobei eine Erklärung für den abgeschwächten Kälteschmerz bisher noch diskutiert wird.

13.3.2 Pathophysiologie und Symptomatik von Kälteschäden

Bei den Kälteschäden unterscheidet man zwischen allgemeiner Unterkühlung und lokalen Erfrierungen.

13.3.2.1 Unterkühlung (Hypothermie)

Bei Körperkerntemperaturen zwischen 36 °C und 34 °C zeigt der Patient Symptome des sog. Erregungsstadiums wie z.B. Verwirrtheit oder Desorientierung. Das Kältezittern ist maximal gesteigert, und die damit verbundene extreme Stoffwechselsteigerung führt zur totalen Erschöpfung. Im Erschöpfungsstadium bei Körperkerntemperaturen zwischen 34 °C und 30 °C wird der Unterkühlte dann apathisch und teilnahmslos. Das Kältezittern nimmt ab; der Patient zeigt zunehmende Muskelstarre. Bradycardie Herzrhythmusstörungen werden in diesem Stadium gehäuft beobachtet.

Bei Körperkerntemperaturen unter 30 °C geht die Unterkühlung in das Lähmungsstadium über mit zunehmender Bewusstseinsbeeinträchtigung bis zur Bewusstlosigkeit und schließlichem Versagen der Vitalfunktionen. Im Verlauf einer Unterkühlung kommt es zu einer metabolischen und respiratorischen Azidose und zu Elektrolytverschiebungen.

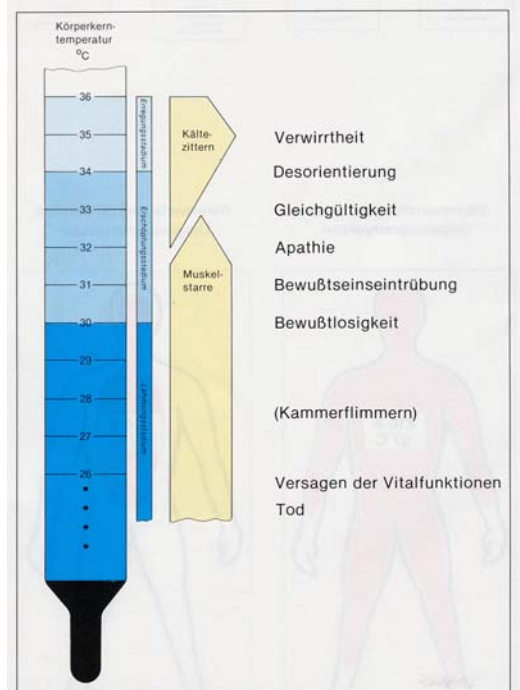


Abb. 13.8: Symptomatik der Hypothermie

Besonders gefährlich sind die Veränderungen im Elektrolythaushalt bei ca. 27 °C, da sie am Herzen zum vermehrten Auftreten von Kammerflimmern führen (vgl. Abb. 13.9).

13.3.2.2 Lokale Erfrierungen

Durch örtliche Einwirkung von Kälte kommt es zu einer Vasokonstriktion der Blutgefäße im betroffenen Gebiet. Die verminderte Durchblutung führt einmal zu einem reduzierten Wärmetransport auf dem Blutweg, zum anderen zu einem lokalen Sauerstoffmangel. Schädigung der Gefäßwände, Störung der Gefäßpermeabilität mit Ödem- und Blasenbildung sind die Folge. Ferner kommt es zu einer intravasalen Erythrozytenaggregation mit der möglichen Komplikation von Venenthrombosen.

Zelltod im Bereich der erfrorenen Gewebe tritt nicht nur als Folge der Minderdurchblutung auf, sondern auch nach Bildung intrazellulärer Eiskristalle mit nachfolgender Freisetzung von Lysozymen. Die subjektiven Symptome lokaler Erfrierungen sind Kältegefühl, Bewegungshemmung und Gefühlsstörungen. Im Frühstadium kommen starke Schmerzen hinzu; im Spätstadium einer Erfrierung lassen die Schmerzen nach bis zur totalen Schmerzlosigkeit.

Anhand der objektiven Zeichen lassen sich drei Schweregrade einer Erfrierung unterscheiden:

- **Erfrierung 1. Grades:**
Blässe, Schwellung, Empfindungsstörungen
- **Erfrierung 2. Grades:**
Blasenbildung, Schwellung, blaurote Haut
- **Erfrierung 3. Grades:**
Bildung von Nekrosen

13.3.3 Die Behandlung von Kälteschäden

13.3.4 Erste-Hilfe-Maßnahmen bei allgemeiner Unterkühlung

- Um weitere Auskühlung zu vermeiden, sollte der Unterkühlte in einen warmen Raum, zumindest aber in eine windgeschützte und trockene Umgebung gebracht werden.
- Bei Reanimation oder bei unzureichender Spontanatmung ist die Mund-zu-Mund bzw. Mund-zu-Nase-Beatmung einer Beatmung mit dem Atembeutel vorzuziehen (angewärmte Beatmungsluft).
- Feuchte Kleidung sollte gewechselt werden.
- Warme Getränke (kein Alkohol!) können gegeben werden, sofern der Bewußtseinszustand des Unterkühlten dies zuläßt.
- Das Anlegen einer vorgewärmten Infusion bewirkt eine unmittelbare Erwärmung des Körperkerns.
- Wenn möglich, sollte bereits im Rahmen der Ersten Hilfe eine Wärmepackung angelegt werden:

Bei der feuchten Wärmepackung nach HIBLER wird ein mehrfach zusammengelegtes Tuch mit heißem Wasser von innen her angefeuchtet und auf die Unterwäsche von Brust und Bauch gelegt. Die Kleidung wird darübergezogen. Anschließend wird der Rumpf (ohne Extremitäten) in eine Wärmeschutzfolie gewickelt. Zum Schluß wird der gesamte Körper einschließlich Arme und Beine in mehrere Decken straff eingewickelt.

Als Wärmepackung sind auch chemische Wärmebeutel geeignet, die in eine Decke eingeschlagen und auf den Rumpf aufgelegt werden. Insbesondere bei längerem Transport ist die Anwendung von diesen chemischen Wärmebeuteln (trockene Wärme) von Vorteil.

Die Wärmepackungen müssen nach ca. 1 Stunde erneuert werden.

Unterkühlung im Wasser ist besonders gefährlich, da auf Grund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Wasser die Wärmeabgabe im Wasser wesentlich größer ist als an der Luft.

Bei Aufenthalt in kaltem Wasser (z.B. nach einer Notwasserung) sollte deshalb die Kleidung anbehalten werden!

13.3.4.1 Erste-Hilfe-Maßnahmen bei lokalen Erfrierungen

- Patienten mit Erfrierungen sollten in eine warme Umgebung (z.B. geheizter Raum) gebracht werden und dort warme Getränke zu sich nehmen.
- Der frostgeschädigte Körperteil sollte möglichst schnell aufgewärmt werden, z.B. durch Eintauchen in warmes Wasser von ca. 42 °C Wassertemperatur.
- Ein Warmreiben der erfrorenen Hautpartie sollte wegen der Gefahr zusätzlicher Hautschäden vermieden werden.
- Bei Hautschäden sollte ein keimfreier/keimarmer, nicht haftender Verband angelegt werden.

13.3.4.2 Weitergehende ärztliche Maßnahmen bei Kälteschäden

Für die weiterführende Behandlung der allgemeinen Unterkühlung gilt:

- Infusion von angewärmten Glukoselösungen (40 – 42 °C).
- Langsame oder schnelle Wiedererwärmung des Rumpfes (ohne Extremitäten!) im Wasserbad. Die schnelle Wiedererwärmung mit Anfangstemperaturen von 40 bis 43 °C hat gegenüber der langsamen Wiedererwärmung den Vorteil, dass der wegen möglichen Kammerflimmerns gefährliche Temperaturbereich um 27 °C schneller überschritten wird.
- Auch Magenspülungen mit 40 - 42 °C warmen Lösungen werden empfohlen.
- Bei tiefer Unterkühlung empfiehlt sich der Einsatz einer Herz-Lungen-Maschine. Mit ihr lassen sich auch schwere Schockzustände (z.B. infolge unzureichender Myokardkontraktilität) beherrschen.
- Medikamentös wird eine Systemheparinisierung empfohlen, sofern nicht z.B. schwere Verletzungen mit drohender Massenblutung eine Kontraindikation darstellen.
- Prophylaktisch können 100 mg Dexamethason gegeben werden.

Als **weitergehende** ärztliche **Maßnahmen** bei lokalen Erfrierungen seien genannt:

- Empfehlung: Keine Medikamente!
- Bei offenen Wunden sollten Antibiotika gegeben werden.
- Zur Verbesserung der rheologischen Eigenschaften des Blutes werden Dextran-Infusionen (angewärmt auf ca. 38 °C) empfohlen.
- Je nach Schweregrad der Symptome kann die Gabe von Analgetika oder eine Sedierung erforderlich werden.

13.3.5 Vorbeugende Maßnahmen zur Verhütung von Kälteschäden

- Bewegung führt zu Wärmeproduktion durch Muskelarbeit sowie zu einer Steigerung der Durchblutung. An Land ist sie deshalb ein wichtiges Mittel zur Verhütung von Kälteschäden. Bei drohenden Kälteschäden im Wasser sind allerdings nur leichte Bewegungsübungen der Gliedmaßen sinnvoll, da im Wasser der Wärmeverlust (Wärmeleitfähigkeit!) die Wärmeproduktion durch Muskelarbeit überwiegt.
- Die Bekleidung soll die vom Körper abgegebene Wärme speichern. Geeignet ist daher dicke, lockere und windundurchlässige Kleidung einschließlich wasserdichter Schuhe.
- Feuchte oder nasse Kleidung erhöht die Wärmeleitung und damit den Wärmeverlust des Körpers. Daher Schutz vor Niederschlag (Regen, Schnee) suchen oder herstellen und auf trockene Bekleidung achten.

- Die Kleidung darf die Blutzirkulation nicht beeinträchtigen. Abschnürende Strümpfe, enge Schuhe oder enge Handschuhe sind zu vermeiden.
- Luftströmung erhöht die Wärmeabgabe des Körpers. Daher Windschutz suchen oder herstellen.
- Nach Notwasserung kann die Überlebenszeit deutlich verlängert werden durch das Tragen spezieller Kälteschutzanzüge (vgl. Kap. 7).
- Nach Möglichkeit sollen warme Speisen und warme Getränke zu sich genommen werden.
- Alkohol ist bei drohender Unterkühlung in kalter Umgebung unbedingt zu vermeiden. (Alkoholbedingte Weitstellung der Hautgefäße führt sonst zu gesteigertem Wärmeverlust des Körpers).
- Rauchen führt zu Vasokonstriktion und zu einer Hypoxie im Gewebe. (Hb wird vermehrt durch CO blockiert). Deshalb steigert Rauchen die Gefahr lokaler Erfrierungen.
- Hände und Füße müssen in kalter Umgebung besonders geschützt werden. Sorgfältige Fußpflege (Trocknen, Reinigen, häufiger Strumpfwechsel) beugt Kälteschäden vor.
- Im Notfall kann die Anwendung durchblutungsfördernder Salben an Händen und Füßen erwogen werden.
- Eiskaltes Metall darf nicht mit bloßen Händen angefasst werden, da die Gefahr sofortigen Anfrierens besteht.

13.4 Die Einwirkung von Hitze

13.4.1 Hitzeadaptation

Die Fähigkeit zur Hitzeadaptation ist beim Menschen besonders gut entwickelt. Die physiologische Wärmeadaptation wird auch als Akklimatisation bezeichnet. Diese kann bei Wärmeeinwirkung innerhalb weniger Tage anhaltend oder intermittierend ausgebildet werden.

Beim Aufenthalt in den Tropen oder im Wüstenklima, aber auch bei stärkeren körperlichen Belastungen im gemäßigten Klima kann es zu einer Hitzeadaptation in Form zunehmender Schweißsekretion kommen. Die Sekretionsrate kann sich etwa auf das Doppelte erhöhen und bei hoch Trainierten 2 Liter pro Stunde erreichen. Bemerkenswert ist, daß die Schweißsekretion bereits bei einem niedrigeren, mittleren Hauttemperaturwert bzw. Kerntemperaturwert auszulösen ist. Die Abnahme des Elektrolytegehalts wird auf die Aldosteronwirkung im Verlauf der Hitzeadaptation zurückgeführt, so wirkt die Salzretention der Reduktion im extrazellulären Volumen entgegen. Die Zunahme des Plasmavolumens und des Plasmaprotein-gehalts sowie das Phänomen der verstärkten Aufnahme von Wasser und die Abnahme der Schweißsekretionsrate nach einer Phase des profusen Schwitzens (Hydromayosis) sind andere Phänomene der physiologischen Adaptation bzw. Akklimatisation. Als Toleranzadaptation bezeichnet man die Vermeidung von stärkeren körperlichen Belastungen in den Tropen.

13.4.2 Pathophysiologie und Symptomatik von Hitzeschäden

13.4.2.1 Hitzeerschöpfung

(auch: Hitzekollaps, Hitzekrämpfe)

Die Flüssigkeitsverluste durch Schwitzen (bis zu zwei Liter pro Stunde) und die Flüssigkeitsumverteilung durch vermehrte Durchblutung der Haut führen zu einem Mangel an zirkulierender Blutflüssigkeit.

Die Diskrepanz zwischen Gefäßkapazität (weitgestellte Hautgefäße) und zirkulierender Blutmenge (absoluter Flüssigkeitsverlust durch Schwitzen und relativer Flüssigkeitsmangel durch Blutumverteilung) führt zu Kreislaufsymptomen, dem sog. Hitzekollaps. Gefördert wird diese Symptomatik durch langes Stehen (Orthostase!) und durch körperliche Arbeit (weitgestellte Blutgefäße in der Muskulatur!).

Zusätzlich kommt es zu Symptomen aufgrund des Elektrolytverlustes durch Schwitzen. Störungen im Elektrolythaushalt führen zu Muskelzuckungen oder Verkrampfungen, vor allem an Armen und Beinen. Diese Symptomatik wird als Hitzekrämpfe bezeichnet. Patienten mit Hitzeerschöpfungen klagen über Schwächegefühl, Schwindel und Durst. Sie zeigen eine blasse Haut, schnelle und flache Atmung, evtl. Bewusstseinsstörungen oder Unruhe, evtl. Muskelzuckungen oder Verkrampfungen im Sinne o.g. Hitzekrämpfe.

Bei der Untersuchung findet sich ein schneller Puls und ein niedriger Blutdruck. Laboruntersuchungen (Hinweise auf Dehydratation und Elektrolytveränderungen) ergänzen die Diagnostik in schweren Fällen. Gelegentlich lassen sich bei der körperlichen Untersuchung auch verbleibende (stehende) Hautfalten als Zeichen der Dehydratation nachweisen.

13.4.2.2 Hitzschlag

Bis zu einer Körperkerntemperatur von ca. 41 °C funktionieren die Temperatur-Regelmechanismen des Körpers. Ab ca. 41 °C Körperkerntemperatur kommt es zu einer Schwellung des Gehirngewebes mit nachfolgender, zunächst reversibler Schädigung des Gehirns. Lebensgefahr besteht ab ca. 43 °C Körperkerntemperatur.

Beim Hitzschlag kommt es zu einem Ausfall der körpereigenen Temperaturregulation. Die Schweißproduktion wird eingestellt. Die Körpertemperatur folgt passiv der Umgebungstemperatur. Es kommt zu Symptomen aufgrund o.g. Beeinträchtigung des ZNS.

Patienten mit Hitzschlag klagen über Schwindel, Übelkeit und Kopfschmerzen. Sie zeigen eine trockene, gerötete und sehr warme Haut. Bewusstseinsstörungen, evtl. Muskelkrämpfe (DD: Hitzekrämpfe!) und Unruhezustände kommen vor. Bei der Untersuchung finden sich Körpertemperaturen von mehr als 40 °C rectal sowie ein beschleunigter Puls. Das Blutdruckverhalten ist untypisch je nach Art der ZNS-Beeinträchtigung.

13.4.2.3 Sonnenstich

Der sog. Sonnenstich ist eine (meist weniger schwerwiegende) Form des Hitzschlages. Durch direkte Sonnenbestrahlung des unbedeckten Kopfes kommt es zu einer meningealen Reizung mit nachfolgender Schwellung des Gehirngewebes.

Patienten mit Sonnenstich klagen, wie auch beim Hitzschlag, über Kopfschmerzen, Übelkeit und Schwindelgefühl.

Sie weisen einen hochroten, sehr warmen Kopf auf. Bewusstseinsstörungen kommen in Abhängigkeit von der Schwere der Erkrankung ebenfalls vor. Bei der Untersuchung findet sich eine Tachycardie und evtl. Zeichen der meningealen Reizung (Nackensteife, etc.).

Die Körpertemperatur ist normal bis leicht erhöht.

13.4.3 Die Behandlung von Hitzeschäden

13.4.3.1 Erste Hilfe bei Hitzeerschöpfung

- Der Patient sollte möglichst schnell in eine kühle, schattige Umgebung gebracht werden.
- Seine Kleidung sollte geöffnet werden.
- Falls erforderlich, muß der Patient in Schocklagerung gebracht werden.
- Für die orale Flüssigkeitszufuhr empfehlen sich kühle Getränke mit 2 TL NaCl pro Liter.

13.4.3.2 Erste-Hilfe-Maßnahmen bei Hitzschlag

- Patienten mit Hitzschlag sollten ebenfalls möglichst schnell in eine kühle, schattige Umgebung gebracht und dort weitgehend entkleidet werden.
- Passive Abkühlung durch Luftzug oder durch Bespritzen der Haut mit kühlem, Wasser wird empfohlen.
- Die Lagerung sollte mit erhöhtem Kopf erfolgen.
- Cave: Lebensgefahr! Notärztliche Behandlung und Transport in Klinik erforderlich!

13.4.3.3 Erste-Hilfe-Maßnahmen bei Sonnenstich

- Patienten mit Sonnenstich sollten vor weiterer Sonnenbestrahlung geschützt und in eine kühle und schattige Umgebung gebracht werden.
- Ihre Kleidung sollte geöffnet werden.
- Vor allem der Kopf dieser Patienten ist passiv zu kühlen (Luftzug, kühle Kompressen auflegen o.ä.).
- Je nach Schweregrad der Symptomatik kann notärztliche Behandlung oder Kliniktransport erforderlich werden.

13.4.3.4 Weitergehende ärztliche Hilfe bei Hitzeschäden

Als weitergehende ärztliche Maßnahmen bei **Hitzeerschöpfung** kommen in Frage:

- Eine parenterale Flüssigkeitszufuhr (z.B. isotone NaCl-Lösung).
- Bei Unruhezuständen kann die Sedierung (z.B. Diazepam 5 -10 mg i.m.) erwogen werden.

Als weitergehende Behandlungsmaßnahmen bei **Hitzschlag** seien genannt:

- Sauerstoffgabe
- Infusion gekühlter Infusionslösungen
- Hirnödemp Prophylaxe durch Gabe von z.B. Dexamethason 100 mg i.v., Diuretika etc.
- Sedativa wie Diazepam o.ä. sollten möglichst nicht gegeben werden, da sonst mögliche Bewusstseinsveränderungen nicht sicher beurteilbar sind.

Für die weiterführende Behandlung bei **Sonnenstich** gilt:

- Auch bei Sonnenstich sollte Hirnödemprophylaxe (z.B. Dexamethason 100 mg i.v.) durchgeführt werden.
- Nach Möglichkeit sollte Sauerstoffgabe erfolgen.
- Möglichst keine Anwendung von Diazepam o.ä., da sonst mögliche Bewusstseinsveränderungen nicht sicher beurteilbar sind.

13.4.4 Vorbeugende Maßnahmen zur Verhütung von Hitzeschäden

- Bei hohen Umgebungstemperaturen sollten größere körperliche Belastungen oder längeres Stehen vermieden werden. Dies gilt insbesondere bei Kombination von Hitze mit Windstille oder hoher Luftfeuchtigkeit.
- Eine übermäßige direkte Sonneneinstrahlung auf den Körper, insbesondere auf den Kopf, ist zu vermeiden. Dies kann durch Aufenthalt in schattiger Umgebung oder durch Tragen geeigneter Kopfbedeckung erreicht werden.
- Da Luftbewegung (Wind) den Wärmeverlust des Körpers steigert (vgl. 13. 1), sollte bei hohen Umgebungstemperaturen für ausreichenden Luftzug gesorgt werden.
- Prophylaktisch sollte die orale Flüssigkeitszufuhr ca. 1/2 - 1 Liter Flüssigkeit pro Stunde betragen. Dieser Flüssigkeit sollte 1 TL NaCl pro Liter zugefügt werden. Die Mahlzeiten sollten etwas stärker als üblich gesalzen werden.
- Alkohol ist bei hohen Umgebungstemperaturen unbedingt zu vermeiden. (Die alkoholbedingte Vasodilatation der Hautgefäße fördert die Entstehung des Hitzekollapses. Ferner führt die alkoholbedingte Beeinträchtigung des Bewusstseins zu einer schlechteren Beurteilbarkeit der ZNS-Symptomatik bei Hitzeschäden).
- Die Kleidung sollte den Temperaturverhältnissen angepasst sein: Zur Verhinderung eines Wärmestaus empfiehlt sich eine dünne und luftdurchlässige Bekleidung.

13.5 Verwendete und weiterführende Literatur

Beiratsvoten von 1964 – 1999. Wissenschaftlicher Beirat für das Sanitäts- und Gesundheitswesen der Bundeswehr beim Bundesminister der Verteidigung, Bonn, 2000

Carlson, L. D., Hsieh, A. C. L. Cold. In: Edholm, O. G., Bacharach, A. L. (eds) The physiology of human survival, chap 2. Academic Press, London, 1965

Flight surgeon's check list. 6. ed. Society of USAF Flight, Surgeon's Education and Training Committee, Brooks AFB, 2000

Fox, R. H. Heat. In Edholm, O. G., Bacharach, A. L. (eds) The physiology of human survival, chap 3. Academic Press, London, 1965

Koch, P., Kohlfahl, M. Unterkühlung im Seenotfall. Deutsche Gesellschaft zur Rettung Schiffbrüchiger, Cuxhaven, 1982

Maidment, G. The thermal environment and human heat exchange. In: Ernsting, J., Nicholson, A. N., Rainford, D. J. (eds) Aviation medicine, part 1: aviation physiology and aircrew systems, chap 14, repr., 3. ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000

Maidment, G. Thermal physiology. In: Ernsting, J., Nicholson, A. N., Rainford, D. J. (eds) Aviation medicine, part 1: aviation physiology and aircrew systems, chap 15, repr., 3. ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000

Montheith, J. L., Mount, L. E. Heat loss from animals and man. 1. publ. Butterworths, London, 1974

Nunneley, S. A. Thermal stress. In: DeHart, R. L. (ed) Fundamentals of aerospace Medicine, sect 2, physiology in the flight environment, chap 12, 2. ed., Baltimore, 1996

Silbernagl, S., Despopoulos, A. Wärmehaushalt und Thermoregulation. In: Silbernagl, S., Despopoulos, A. Taschenatlas der Physiologie, Kap 9, 5. Aufl. Thieme, Stuttgart, 2001

Simon, E. Wärmehaushalt und Temperaturregelung. In: Schmidt, R. F., Thews, G., Lang, F. (Hrsg.) Physiologie des Menschen, Teil 7: Energiewechsel, Arbeit und Umwelt, Altern. Kap 30, 28. Aufl., Springer, Berlin, 2000

14 BIOLOGISCHE RHYTHMEN, ZEITVERSCHIEBUNG UND ERMÜDUNG

14.1 Definitionen

Rhythmus:

Ereignisse, die sich in ungefähr gleichen Zeitabständen in ungefähr gleicher Weise wiederholen, werden als rhythmische Phänomene bezeichnet (vgl. dagegen Takt, bei dem sich genau Gleiches in genau gleichen Zeitabständen wiederholt, z.B. Arbeitstakt am Fließband).

Phasenlänge:

Die Zeit vom ersten bis zum zweiten Wiedereintreten eines Ereignisses (z.B. Wiederanstieg der Körpertemperatur) heißt Phasenlänge.

Circadian:

(circa = ungefähr, dies = der Tag) etwa 24-stündig

Freilaufender Rhythmus:

Damit wird der biologische Rhythmus bezeichnet, der sich einstellt, wenn kein Zeitgeber auf den Organismus einwirkt. Seine Phasenlänge ist beim Menschen im Allgemeinen länger als 24 Stunden (um 25 Stunden). Vergleiche auch „Innere Uhr“.

Zeitgeber:

Damit werden Ereignisse bezeichnet, die geeignet sind, den freilaufenden Rhythmus in einen circadianen Rhythmus zu verwandeln, z.B. Wechsel von Hell und Dunkel (besonders in der Tierwelt), oder die Uhr, nach der wir Menschen unseren Tag gestalten.

Innere Uhr:

Sie ist kein „Gerät“, sondern eine jedem biologischen Organismus innewohnende, in ihrer Ursächlichkeit nicht näher beschreibbare Fähigkeit, einen freilaufenden Rhythmus zu entwickeln.

Synchronisation:

Der Vorgang, in dem sich ein biologischer Organismus in seinem Rhythmus den Vorgaben eines Zeitgebers (die meistens im Takt erfolgen) anpasst, heißt Synchronisation. Die „Elastizität“ eines jeden lebenden Organismus macht es ihm möglich, dass er sich in seinem biologischen Verhalten den Bedingungen des Zeitgebers anpasst, wenn dessen Phasenlängen nicht zu stark von seinem freilaufenden Rhythmus abweichen.

Phasengleichheit:

Wenn zwei (oder mehr) Ereignisse rhythmisch gleichsinnig verlaufen, besitzen sie Phasengleichheit.

Desynchronisation:

Phasenungleichheit zwischen biologischem Rhythmus und Zeitgeber.

Resynchronisation:

Erneute Synchronisation (s.o.) nach Desynchronisation.

Zeitzone

Die Erdoberfläche ist geographisch in 360 Längengrade aufgeteilt. Das Licht wandert in vier Minuten um einen Längengrad nach Westen und somit bilden 15 Längengrade einen Zeitunterschied von einer Stunde, entsprechend einer Zeitzone. Es existieren 24 Zeitzonen. Fliegt man also eine Strecke von mehr als 15 Längengraden in West/Ostrichtung, so ändert sich die Zeitzone. Da die Erdrotation in östlicher Richtung stattfindet, nimmt die aktuelle Tageszeit in Ostrichtung zu und entsprechend in Westrichtung ab.

14.2 Die „Innere Uhr“, eine biorhythmische Beobachtung

14.2.1 Periodische Grundphänomene

Beim 24-Stunden-Rhythmus des Menschen handelt es sich um einen komplexen, den ganzen Organismus umfassenden Vorgang, über den hier nur ein Einblick mit gewissem Schwerpunkt fliegerärztlicher Belange gegeben wird. Bezüglich der praktischen Bewertung dieser Rhythmen ist zu betonen, dass den vielen, scheinbar unterschiedlich schwankenden Einzelgrößen im funktionellen Zusammenhang des Organismus doch weitgehend gemeinsame Funktionstendenzen zugrunde liegen. Die rhythmischen Funktions- und Verhaltensweisen sind beim Menschen mit der Geburt noch nicht gegeben, sondern werden erst im Laufe der Zeit erworben. So lehrt die Erfahrung, dass jeder Säugling zunächst ein recht unregelmäßiges, kurzfristiges Nahrungsaufnahme- und Schlafbedürfnis hat, in dem die Tageszeit nicht „berücksichtigt“ wird. Nach etlichen Wochen stellt sich dann ein etwa vierstündiger Schlaf-Wach-Rhythmus ein, der im Weiteren von einer 6- bis 8-stündigen Nachtruhe, also von durchschlafener Nacht, modifiziert wird. Der kurzfristige Schlaf-Wach-Wechsel am Tage wird dabei noch länger beibehalten, ja, u.U. mit dem Mittagsschlaf zum lebenslangen biologischen individuellen Merkmal. Diese Anpassung an den Hell-Dunkel-Wechsel (stärkstes Stimulans) und an das Verhalten der Eltern (Tagaktivität-Nachtruhe), also an das soziale Umfeld, ist durchaus positiv zu verstehen, hängen doch, wie noch gezeigt wird, Gesundheit und Leistungsfähigkeit von einem angemessenen, d.h. den ererbten Anlagen zum rhythmischen Verhalten folgenden, ausgewogenen Wechsel zwischen Wachen und Schlafen ab. Der biologische Tag-Nacht-Rhythmus ist nur ein schmales Band im Spektrum der rhythmischen Funktionen, die im menschlichen Organismus festgestellt werden können. Zu diesen zählen (vgl. Abb. 14.1) Nervenaktionen, Schwankungen im EEG, Puls, Atmung, aber auch Nierensekretion und komplexe vegetative Steuerungen, die eine gewisse Abstimmung aufeinander nachweisen lassen und wie eine „Innere Uhr“ funktionieren.

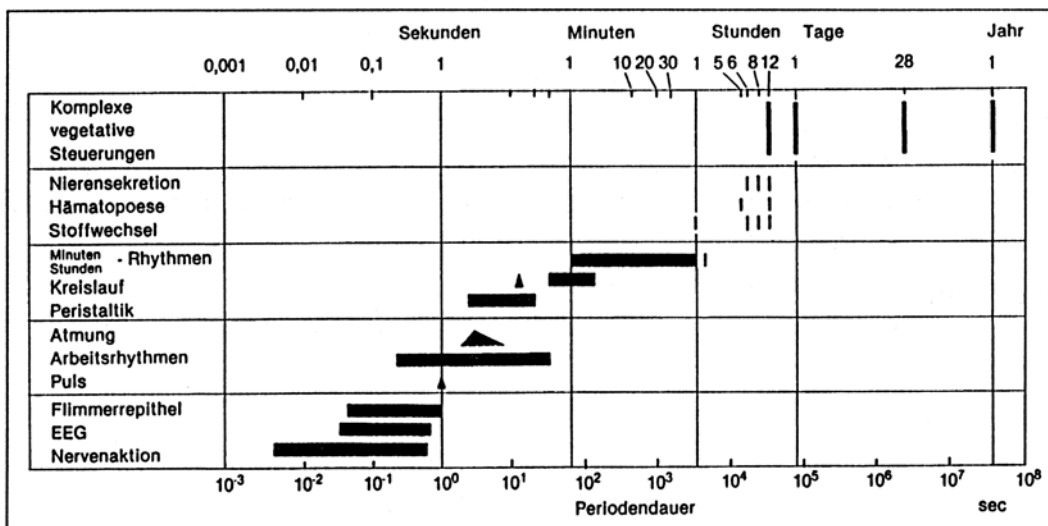


Abb. 14.1: Gesamtspektrum der Periodendauer menschlicher Rhythmen

Am 24-stündigen Rhythmus sind sämtliche Körperfunktionen beteiligt, von denen eine Reihe in Abb. 14.2 dargestellt ist. Diese Verläufe sind unter konstant gehaltenen Bedingungen, wie Bettruhe und gleichmäßig verteilter Nahrungsaufnahme, ermittelt worden. Es sind nur sinus-ähnliche Verläufe, denen unterschiedlich starke Schwankungen überlagert sind (vgl. z.B. den O₂-Verbrauch und die Atemfrequenz) dargestellt. Überdies ist ihre Phasengleichheit - mit Ausnahme der Hauttemperatur - bemerkenswert. Allein die Hauttemperatur zeigt eine um 180 ° gegenläufige Phase.

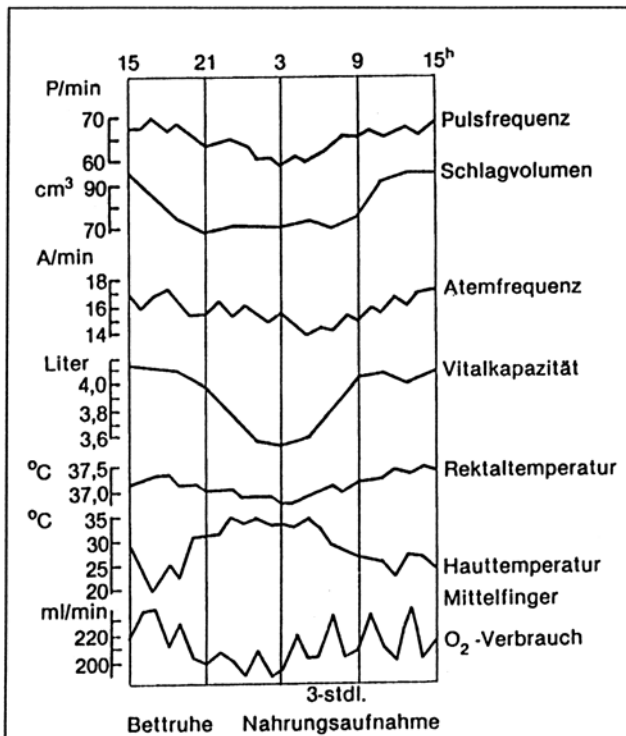


Abb.14.2: Beispiele für Tagesgänge verschiedener Funktionsgrößen bei Betruhe und gleichmäßig verteilter Nahrungsaufnahme

Diese Gegenläufigkeit der Hauttemperatur passt jedoch sehr wohl in das eingangs genannte Bild gemeinsamer Funktionstendenzen, beruht doch das nächtliche Absinken der Rektaltemperatur weit weniger auf der Drosselung des Grundumsatzes als auf der vorwiegend akralen Wärmeabgabe an die Umgebung, bzw. ihr Wiederanstieg am Vormittag auf deren Drosselung.

14.2.2 Beeinflussbarkeit der Rhythmen

Es ist die individuelle Erfahrung eines jeden einzelnen, dass der Mensch, wenn er seinem inneren Wunsch nach Wohlbefinden folgt, seine Aktivitäten in die Tagesstunden legt, wenn es auch den noch zu erläuternden Unterschied zwischen Morgen- und Abendtyp gibt. Der entwicklungs geschichtlich entscheidende Grund dafür ist, dass er nachts bei weitem nicht so gut sehen kann wie am Tage (im Gegensatz zum nachaktiven Tier) und deshalb diese Zeit besser zur Erholung nutzt.

Die moderne Welt, die sich der Mensch geschaffen hat, erlaubt es aber leicht, ja fordert es in vielen Bereichen, dass diese natürlichen Gegebenheiten „auf den Kopf gestellt“ werden. Die Arbeit wird zur Schichtarbeit, es werden Nachtschichten verlangt und Erholungszeiten am hellen Tag aufgezwungen. Die Untersuchungen über die Auswirkungen, besonders hinsichtlich gesundheitlicher Langzeitbeeinträchtigungen, sind noch bei weitem nicht abgeschlossen. Abb. 14.3 zeigt dazu rhythmologische Veränderungen am Beispiel der Rektaltemperatur (Abweichung vom 24-Stunden-Mittel) nach länger durchgeführter Nachtschicht und nach Erholung davon. Die deutlichen Veränderungen haben sich allmählich eingestellt und lassen im oberen Beispiel als wichtigstes Anpassungsmerkmal an die Nachtaktivität eine Phasenverschiebung um 180° (entsprechend ca. 12 Stunden) erkennen. Dazu kommt eine Amplitudenabflachung, die geeignet ist, die Diskrepanz zwischen Aktivitätsverhalten und vegetativer Einstellung abzuschwächen. Im mittleren Verlauf war die Reaktion auf Nachtarbeit nur eine Phasenverschiebung von etwa 90° (oder etwa 6 Stunden). Man könnte sie unvollständig nennen. Im Weiteren ist hier - wie im Beispiel des unteren Kurvenpaares - die Amplitude nach Nachtdienst erhöht, ein Ausdruck der Reagibilität des sich anpassen wollenden Systems. Dazu kommt als weitere Reaktionsmöglichkeit im unteren Beispiel eine Verdopplung der Frequenz, also ein „Umschalten“ von der circadianen 24-Stunden-Periodik auf eine 12-stündige, eine sog. Frequenzmultiplikation. Auch 6- oder 8-stündige Perioden können als Umstellungsreaktionen beobachtet werden. Bei der Frage der „Störanfälligkeit“ des Menschen auf Belastungen durch Nachtarbeit hat man gefunden, dass Abend- und Morgentypen unterschiedlich reagieren. - Diese beiden Typen sowie der weit häufigere Übergangstyp lassen sich anhand eines Fragebogens ermitteln. Zur oben besprochenen Amplitudenabflachung haben danach die Abendtypen die deutlichere Fähigkeit, während die Morgentypen eher mit einem Aufschwingen der Amplitude und

einer Frequenzmodulation reagieren. Die Phasenverschiebung als bestmögliche Form der Anpassung lässt somit den Abendtypen als den geeigneteren für Nachtarbeit erscheinen. Der Zeitbedarf für eine solche Phasenanpassung beträgt allerdings 7 bis 10 Tage, so dass dieser Anpassungsmechanismus für einen Wechselschichtdienst nicht nutzbar ist. Mit dem vorstehenden Beispiel der Schichtarbeit und den vegetativen Reaktionen des menschlichen

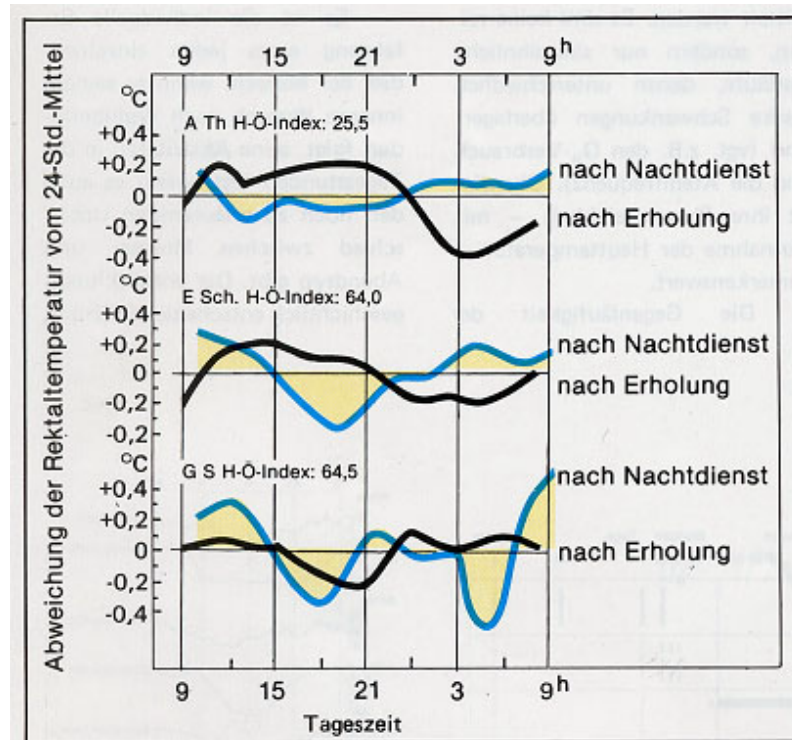


Abb.14.3: Drei Beispiele für den Tagesgang der Körpertemperatur unmittelbar im Anschluss an eine Nachtarbeitsperiode und nach längerer Erholungszeit mit normaler Lebensweise, jeweils unter Klimakammerbedingungen. Zum Niveaueausgleich der jeweils zu vergleichenden Kurvenpaare geben die Ordinaten die Abweichung vom individuellen 24 Stunden-Mittel der Körpertemperatur an. (nach Engel und Mitarb., 1981)

Organismus wurde ein sehr wichtiges, wenn auch nicht natürliches, sondern durch die Struktur der Arbeitswelt bedingtes Anpassungsverhalten gestreift. Es gibt jedoch auch Anpassungen, die auf Änderungen der Umwelt hin erfolgen. Man weiß seit einer Untersuchung von Gibson u.a. im Jahre 1905 anlässlich einer Schiffsreise halb um die Erde, dass die Phasenlage des circadianen Rhythmus unter natürlichen Bedingungen von der Ortszeit abhängig ist. In diesem Falle wurde der Nachweis erbracht, dass sich der Tagesgang (Rhythmus) der Körpertemperatur während dieser Reise kontinuierlich und damit zum Ende der Reise um 180 ° in seiner Phasenlage gegenüber demjenigen am Ausgangsort der Reise verschoben hatte. Diese Anpassung war mit dem Ende der Reise wegen der langsamen Verschiebung der Ortszeit vollständig. Dass stattdessen heute die raschen transmeridianen Flüge Probleme aufwerfen, wird später noch besonders behandelt. Aber nicht nur die Verschiebung der Ortszeit beeinflusst die biologischen Fähigkeiten oder Verhaltensweisen. Auch mit Änderung der Jahreszeit ändern sich etliche Größen subjektiv praktisch unbemerkt. So zeigt Abb. 14.4 eine statistisch gesicherte Änderung der optischen Reaktionszeit, deren praktische Relevanz jedoch ein hier nicht zu behandelndes Thema ist. Dasselbe gilt für die muskuläre Trainierbarkeit (Abb. 14.5), die auch einen Jahreszyklus aufweist. Diese beiden Beispiele zeigen, dass zum einen eine innewohnende Fähigkeit (Reaktionszeit) und zum anderen die Reaktionsfähigkeit des menschlichen Organismus auf einen äußeren Reiz (Muskeltraining) jahres-

zeitlich bedingt schwanken. Fragen der praktischen Nutzung dieser und analoger jahreszeitlicher Verhaltensweisen des Organismus gehören vor allem in den Bereich der Balneologie.

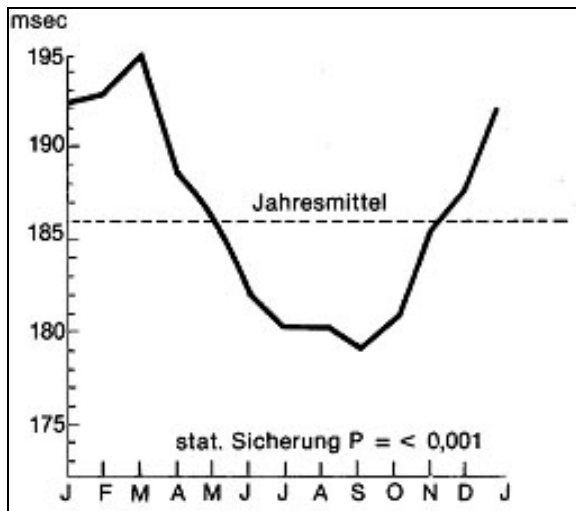


Abb.14.4: Mittlerer Jahrgang der optischen Reaktionszeit aus 20336 täglichen Messungen an 6 Versuchspersonen

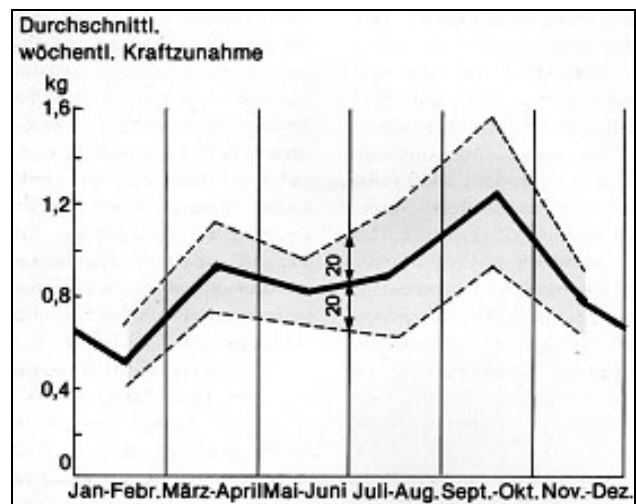


Abb.14.5: Mittlerer Jahrgang der Trainierbarkeit beim isometrischen Muskeltraining (nach Hettinger u. Müller, 1981)

Das arbeitsmedizinisch bedeutsame jahreszeitlich schwankende Verhalten der Schweißsekretion ist hier noch anzusprechen.

Man weiß, dass der menschliche Organismus das ökonomische Schwitzen mit Beginn der warmen Jahreszeit jedes Jahr aufs neue zu „lernen“ hat, indem er - unter gleichen Bedingungen - den zunächst überstarken und intervallartigen Schweißverlust auf eine gleichförmige und weniger verlustreiche Hautwasserabgabe reduziert. Dabei minimiert er zugleich den Salzverlust, indem er die Salzkonzentration des Schweißes von zunächst ca. 50 auf etwa 10 % derjenigen reduziert, die im Blutserum ansteht. Schließlich kennt man den Menstruationszyklus der Frau und mit diesem die Tatsache, dass Körpertemperatur und Ruhepulsfrequenz schwanken, dass sich aber auch optische und akustische Reaktionszeit statistisch gesichert verändern. Im Zusammenhang mit letzterer haben aber Untersuchungen über die Leistungsfähigkeit der Frau am Arbeitsplatz oder im Sport keine gesicherten entsprechenden Schwankungen aufgezeigt. Man hat also stets zwischen signifikanten Befunden biologisch rhythmischer Grunddaten und entsprechend rhythmisch schwankenden Leistungsdaten, die unter Laborbedingungen gefunden wurden und deren praktischer Bedeutung in der Arbeitswelt zu unterscheiden. Dieser Umstand hat für die Fragen der Praxis, der Arbeitswelt, zur Konsequenz: Werden Leistungsschwankungen beobachtet, deren Ursache(n) man klären will, ist auch der Frage nachzugehen, ob und wie groß der Einfluss schwankender biologischer Grundgrößen - etwa der des periodischen Phänomens der Ermüdung - ist. Diese sind auch nur dann von alleinigem Einfluss, wenn man alle Arbeitsbedingungen (Arbeitsumgebung und Leistungsanforderungen) über den Beobachtungszeitraum als absolut gleichbleibend abgesichert hat. Wenn nicht alle Arbeitsbedingungen gleichbleiben, ist die schwierigere Frage zu lösen, welchen Anteil die rhythmische Veränderung biologischer Voraussetzungen (Daten) im anstehenden Zusammenhang hat. Danach könnte eine praktische Frage nach einem Unfall etwa lauten: War zunehmende Ermüdung (oft als „menschliches Versagen“ zusammengefasst) bei steigender Leistungsanforderung im Zeitraum des Unfalls (etwa bei einem Landeanflug) beteiligt oder ausschlaggebende Ursache?

14.2.3 Ermüdung - eine besondere biorhythmische Größe

Auf dem komplexen Gebiet der Ermüdung lassen sich zwei Formen unterscheiden, nämlich die Muskel- und die zentralnervöse Ermüdung. Die Muskelermüdung entwickelt sich infolge Muskelbeanspruchung eindeutig lokal und wird auch so empfunden. Sie ist hier nicht Gegenstand der Erörterung. Im folgenden wird die Rede von der zentralnervösen Ermüdung sein, im weiteren kurz Ermüdung genannt, die sehr unterschiedliche Ursachen haben kann, die jedoch alle ein gleichartiges Ermüdungsgefühl auslösen. Zu diesen Ursachen zählen u.a. Arbeiten mit anhaltenden Anforderungen an Konzentration, Entscheidungswillen, Geschicklichkeit und Verantwortung. Variieren diese Bedingungen nicht oder nur wenig, spricht man von Monotonie, die belastungserhöhend hinzukommt. Ungünstige Umgebungsbedingungen wie Klima, Beleuchtung, Arbeitsplatzgestaltung, aber auch Ernährungsfehler beschleunigen das Eintreten der Ermüdung. Bei Berücksichtigung all dieser, in der ergonomischen Betrachtungsweise relevanten Größen, läuft man jedoch leicht Gefahr, eine zu übersehen, die auch bei Optimierung aller übrigen wirksam bleiben wird, nämlich die Zeit in ihrem bloßen Ablauf mit ihrem Tag-Nacht-Wechsel. Allein schon durch diese Einflussgröße „Zeit“ wird Ermüdung von jedermann täglich aufs neue erlebt, die, durch Schlaf reversibel, wieder in den Zustand des Erholtseins, der vollen Leistungsfähigkeit überführt wird. Was macht nun die Ermüdung zu einer besonderen Größe in der Ergonomie? Das Besondere liegt darin, dass sie nur beschreibbar, aber nicht messbar ist. Dementsprechend bleibt ihre Bewertung eine Angelegenheit des Betroffenen und entzieht sich der objektiven Beurteilung von außen. Dieser Umstand aber macht Ermüdung wegen ihrer möglichen Folgen zu einem Problemfaktor aus der Sicht der Ergonomie. Die Tagespresse nennt bei Unfallmeldungen im Straßenverkehr häufig menschliches Versagen als Ursache oder auch, dass die Ursache nicht erkennbar war. Man geht jedoch sicher in der Annahme, dass in vielen dieser Fälle Ermüdung mit oder gar entscheidend im Spiel war. In *Abb. 14.6* ist dargestellt, wie sich die Gefahr des Einschlafens am Steuer über den Tag verteilt. Wie zu erwarten, vergrößert sich die Wahrscheinlichkeit in den Stunden um und nach Mitternacht. Aber auch in den ersten Nachmittagsstunden findet sich eine Häufung (vgl. auch 14.2.1, „Mittagsschlaf“).

Diese Beobachtung an sich stellt noch keine Gefahr dar, wohl aber die Tatsache, dass die Symptome des Ermüdens, die dem Einschlafen vorangehen, häufig mit Ehrgeiz und Willen überspielt und nicht mit der biologisch geforderten Konsequenz, eine erholsame Schlafperiode einzulegen, befolgt werden.

Auf den militärischen Bereich übertragen, bedeutet dies, dass etwa bei „Sustained Operations“, also z.B. bei längeren Manövern, mit solchen Situationen zu rechnen ist. Es tritt Ermüdung ein, die bewusst verdrängt wird und mit zwangsläufig fortschreitendem Stadium zu verlustreichen Folgen führen kann. Nachtoperationen allein sind in diesem Zusammenhang kritischer zu sehen, als wenn sie am Tage abgehalten würden - besonders dann, wenn ein normaler Arbeitstag ohne Schlafpause voranging. Die Bemühungen, Gefahren durch Ermüdung im Zusammenspiel mit Ehrgeiz und von außen empfundenen Zwang zu minimieren, bedienen sich der Vorschriften über maximale Arbeits- und zwangsläufige Ruhezeiten. Wenn es aber darum geht, die Frage des momentanen Ermü-

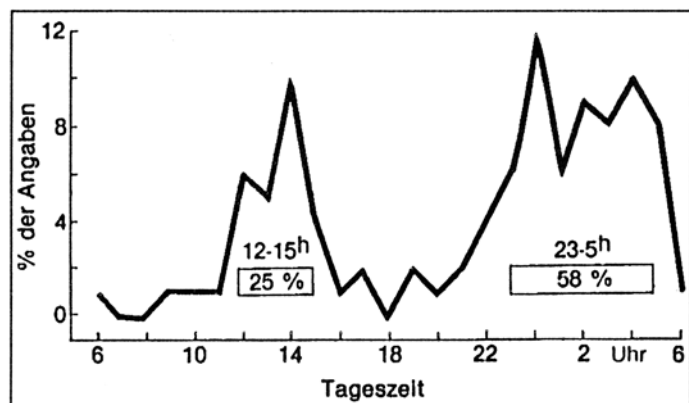


Abb.14.6: Tageszeitliche Verteilung des Einschlafens

ungsgrades individuell zu klären, geht dies nur mit Hilfe eines Fragebogens, einer Bewertung der momentanen Leistung durch einen darin Erfahrenen oder durch Beurteilung nach Augenschein, etwa durch den Fliegerarzt. Die Subjektivität des letzteren mag - bei entsprechender Erfahrung - in vielen Fällen ausreichen, wird aber kritisch, wenn er selber ermüdet ist, etwa, weil er mit den zu Beurteilenden über den ganzen Operationszeitraum „mitgelaufen“ ist. Analoges gilt übrigens auch für die Urteilsfähigkeit in leitenden Kommandostellen.

14.2.3.1 Ermüdung als flugmedizinisches Problem

In diesem Zusammenhang sei bemerkt, dass General Flugsicherheit darauf hingewiesen hat, dass sich die Arbeit im fliegerischen Bereich nach Optimierung der Lage im rein technischen Bereich nun auf den Ursachenbereich „Personal“ konzentrieren müsse. Gerade in diesem Bereich darf das Problem „Ermüdung“ nicht unterschätzt werden. Besonders in der Flugmedizin spielt Ermüdung der Besatzung eine Hauptrolle der „Human-Factors“, die zu Flugzwischenfällen oder gar - Unfällen führen. Fliegerärztlicherseits müssen Ursachen und Symptome der Müdigkeit bekannt sein, um Besatzungen aufklären und vorbeugend beraten zu können.

14.2.3.2 Ursachen der Ermüdung

- *Mangel an erholsamem Schlaf*
„Erholsam“ ist das Schlüsselwort. Nur eine physiologisch einwandfreie Schlafperiode garantiert den Erholungszustand.
- *Physische Überanstrengung*
Diese generiert eine muskuläre Ermüdung, die relativ rasch auch geistige Ermüdung nach sich zieht.
- *Dehydratation*
Oft übersehen ist dies eine häufige Situation im Cockpit. Sie führt über vielerlei biochemische Prozesse zu zentraler und körperlicher Müdigkeit.
- *Koffein*
Als „Akut“ Stimulans genutzt, wird oft der nachfolgende „Entzug“ übersehen, welcher sich auf die nächste Schlafphase negativ auswirkt und für weitere Desynchronisation sorgen kann.
- *Alkohol*
Desynchronisiert den physiologischen Schlafablauf und führt zu qualitativ minderwertiger Schlaferholung.
- *Lärm und Vibration*
Beide Größen wirken als physischer und mentaler Stress und führen zu genereller Ermüdung.
- *Erkrankungen*
Auch banale grippale Infekte können die Fähigkeiten zur Resynchronisation der Bio-rhythmen erheblich einschränken.
- *Selbstmedikation*
Die Auswirkungen und vor allem die Langzeitwirkungen von Stimulanzien (z.B. Anabolika) oder Sedativa aller Art auf den individuellen biologischen Rhythmus können von Ungeschulten nicht beherrscht werden. Auch der Einsatz von Melatonin gehört dazu, obwohl er derzeit empirisch in Studien eingesetzt wird, um Resynchronisationsvorgänge zu beschleunigen. Generell gilt für die militärische und zivile Flugmedizin die Vorgabe, keinerlei Medikamente im Flugdienst anzuwenden.

- *Hypoglykämie*
Die gefährlichste Folge von selbstinduzierter Hypoglykämie durch unausgewogene oder gar ausgelassene Mahlzeiten im Cockpit ist die zentrale Vigilanzeinschränkung und Müdigkeit.
- *Hypoxie*
Häufig das erste, in jedem Fall auch das bedeutendste Zeichen für Hypoxie ist eine rasche Zunahme der Müdigkeit bis hin zum völligen Versagen zentraler Mechanismen.
- *Unzureichende Visuskorrektur*
Die mitunter zu beobachtende Eitelkeit älterer Piloten trotz Verschreibung keine Brille zu tragen, führt aufgrund der zentralen und peripheren Kompensationsversuche von Gehirn und Augen zur Müdigkeit.
- *Thermoregulation*
Aufenthalt in anormalen Temperaturzuständen (Wärme oder Kälte) führt rasch zur Ermüdung und hält auch bei Erreichen normaler Temperatur noch an.
- *Flicker - Effekte*
Stroboskopartige Flickereffekte in Hubschraubern können zur zentralen Ermüdung führen, wobei mitunter sogar Zustände der räumlichen Desorientierung beschrieben wurden.
- *Langeweile*
Piloten werden durch moderne Cockpit-Ausstattung oft zum passiven Computer-Manager, vor allem bei Langstreckenflügen. Physische und mentale Inaktivität leisten der Ermüdung Vorschub.
- *Veränderungen der circadianen Rhythmik*
Wie oben beschrieben führt die Kombination von Reisedauer und Desynchronisation zur Ermüdung, dem größten Problem langdauernder Zeitzoneflüge.
- *Übermotivation*
Eine häufig beobachtete Quelle der Ermüdung entsteht aus dem Konflikt eines Piloten, seine Aufgaben perfekt durchzuführen, ohne die Überschreitung der Grenzen seiner körperlichen und mentalen Grenzen zu bemerken.
- *Tyrosinhaltige Stoffe*
Schokolade, Rotwein und bestimmte Weichkäse enthalten besonders reichhaltige Mengen des postulierten Melatoninantagonisten Tyrosin. Dieser Inhaltsstoff hat eine nicht zu unterschätzende Desynchronisationspotenz für chronobiologische Rhythmen.
- *Unverarbeiteter psychischer Stress*
Die Verarbeitung von mentalem oder psychischem Stress geschieht auf einer häufig unbemerkten Bewusstseinssebene. Sie bedeutet aber gleichwohl eine zusätzliche Belastung, die eine schnellere Ermüdung verursachen kann.

14.2.3.3 Symptome der Ermüdung

- *Verlängerte Reaktionszeit*
Die Reaktionen auf akute Probleme können erheblich verlängert sein, auch das Abrufen von Routine-Prozeduren kann verzögert oder gar fehlerhaft ablaufen.
- *Kanalisierung*
Ermüdete Piloten neigen zur Fokussierung oder Kanalisierung eines bestimmten Problems (oft auch nur eines einzigen Instrumentes) und verlieren die Gesamtübersicht über ihren Auftrag
- *Kurzzeitgedächtnisschwäche*
Wichtige Anweisungen z.B. von ATC oder andere Informationen werden nicht mehr suffizient verarbeitet.

- *Eingeschränkte Urteilsfähigkeit*
Resultiert aus dem ermüdungsinduzierten Verlust der Übersicht
- *Ablenkbarkeit*
Die Prioritäten verschiedener Vorgänge werden unter Müdigkeit häufig nicht mehr korrekt eingeordnet
- *Abgeschwächtes visuelles Erkennen*
Fokussierung (Akkommodation) und anschließende zentrale Verarbeitung visueller Reize kann unter Müdigkeit erhebliche Zeitverzögerungen beinhalten
- *Verlust der Initiative*
Müdigkeit kann zu mentaler Blockierung und Passivität führen.
- *Depression, Einstellung und Persönlichkeit*
Müdigkeit kann Depressionen verursachen, welche die generelle Einstellung und Persönlichkeit eines Piloten im schlimmsten Falle fatal verändern können.

14.2.3.4 Vermeidung von Müdigkeit

Fliegerarzt, Besatzungen, Psychologen und Ergonomen haben gemeinschaftlich die Ursachen der Müdigkeit (siehe dort) zu bekämpfen. Besonders in Cockpits, die mehrköpfige Besatzungen fordern, kann durch gezieltes Crew Resource Management und sinnvolle Vorbereitung auf Desynchronisationsvorgänge der Ermüdung als Gefahrenquelle begegnet werden.

14.2.4 Nacht- und Schichtarbeit

Die Abb. 14.7 zeigt den Tagesgang der Leistung im 24-Stunden-Schichtdienst mit ausgeruhten Leuten am Beispiel der Fehler bei Ablesungen in einem Gaswerk. Hier wurden Ablesungen (eine gleichförmig durchzuführende Arbeit) ausgewertet, die über 12 Jahre zusammengetragen worden waren. Die Kurve zeigt die Mittelwerte zweier Maxima, gleichbedeutend mit zwei Zeitabschnitten verminderter Leistung (erhöhte Zahl Ablesefehler). Diese Schwankungen werden auf die Änderung physischer und psychischer Größen zurückgeführt, die sich jedoch nicht so messen lassen, dass damit die Ermüdung quantitativ darstellbar wäre. Angenommen nun, eine gleichförmige Aufgabe führt (analog zu Abb. 14.7) im 24-Stunden-Verlauf nicht zu unverträglich großen oder zahlreichen Fehlern, so ist doch leicht vorstellbar, dass eine ungleichförmige Aufgabe, die normalerweise beherrscht wird, (etwa das Fliegen mit seinen erhöhten Anforderungen beim Landeanflug) zur entsprechenden Tageszeit im ungünstigen Fall zu Überforderung und so u.U. zum Unfall führen kann.

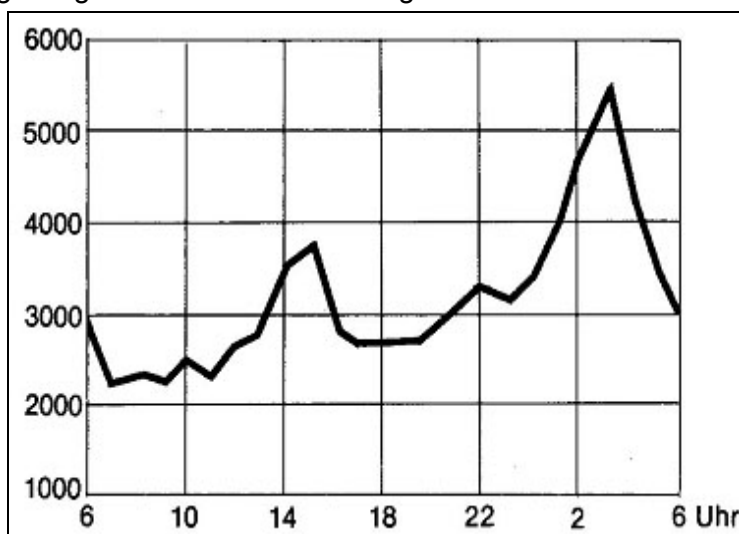


Abb.14.7: Fehlerzahl bei Anschreibungen von Gasanstaltsarbeitern

Dies zeigt, dass Tageszeit und Aufgabe die Leistung beeinflussen. In der Praxis wirkt sich diese Einsicht so aus: Weil der Schichtbetrieb gefordert wird und die Aufgabe festliegt, bleibt aus ergonomischer Sicht nur noch die Möglichkeit, über den Faktor „Gefahr der Ermüdung“ auf die Leistung Einfluss zu nehmen. Das aber heißt zu fordern: Der Dienst, besonders der Spät- und Nachtdienst muss ausgeschlafen angetreten werden, um den negativen

Einfluss der Tageszeit zu minimieren, um auf der sicheren Seite zu bleiben. Über das Schlafverhalten bei Schichtarbeitern ist bekannt, dass, jeweils im Mittel, vor der Frühschicht 7,5 Stunden, nach der Spätschicht 9,5 Stunden und nach der Nachtschicht nur etwa 4- 6 Stunden geschlafen wird. In diesem Zusammenhang ist zu erinnern, dass das natürliche Schlafbedürfnis individuell nicht unbeträchtlich variiert und auch vom Lebensalter abhängt. Die Schlafzeitverkürzungen nach der Nachtschicht erklären sich aus der Verschiebung des Schlafes in die rhythmus-physiologisch ungünstige Tagzeit und aus Störungen durch die aktive Umwelt (Lärm). Dass durch diese unphysiologischen Belastungen im Nachtbetrieb Störungen auftreten können, wie Appetitlosigkeit (bei ca. 40 % der Dauernachtschichtarbeiter) oder Magen-Darm-Beschwerden (bei 50 %), ist ein sozial zu berücksichtigendes Faktum. Hierbei kommt den Frauen der betroffenen Arbeiter eine wesentliche Aufgabe zu, das Leben der Familie darauf insgesamt abstimmen zu helfen (Planung von Mahlzeiten und Freizeit). Jedoch zeigte eine Mortalitätsstudie bei 1578 Todesfällen unter 8603 Personen über einen Zeitraum von 13 Jahren keine Häufigkeitsunterschiede zwischen Schicht- und Nichtschichtarbeitern (Rutenfranz et al.).

Ein erhöhtes Erkrankungsrisiko lässt sich wenigstens vermindern, wenn nicht vermeiden, wenn man Schichtarbeit liberal handhabt, medizinische Ausschlusskriterien berücksichtigt, wie z.B. Magenerkrankungen, Diabetes, schlechte Schlafbedingungen, und Überwachungsuntersuchungen durchführt.

Zur Nachtschicht ist abschließend noch generell zu bemerken:

- Schlafstörungen kann man nicht mit Geld kompensieren, sondern nur damit, dass man schallgeschützte Räume zum Schlafen anbietet.
- Störungen sozialer Kontaktmöglichkeiten sind durch mehr freie Wochenenden und durch mehr Urlaub auszugleichen.
- Eingestreute Nachtschichten werden weit besser vertragen, als viele hintereinander. Dabei sollte jeder Nachtschicht eine arbeitsfreie Zeit von 24 Stunden folgen.
- Die Länge einer Schicht sollte von der Arbeitsschwere abhängig gemacht werden.
- Auch bei kontinuierlicher Schichtarbeit sollten möglichst viele freie Wochenenden mit zwei zusammenhängenden Freischichten vorgesehen werden.

14.3 Zeitverschiebung und Desynchronisation

14.3.1 Transmeridiane Flüge - Jet Lag

Während im vorigen Kapitel die Probleme der Schichtarbeit in der Industrie umrissen worden sind, kann man bei transmeridian verlaufenden Flügen von einer Erweiterung dieser Problematik sprechen, denn bei Flügen in alle Welt handelt es sich ebenfalls um Schichtarbeit, ja bei 50 % der kommerziellen Flüge handelt es sich um Nachtflüge, also um Nachtarbeit, bei der - im Vergleich zur Industriearbeit - die Folgen der Ortszeitverschiebung dann hinzukommen, wenn Meridiane nach Osten oder nach Westen hin überflogen werden. Wie bereits ausgeführt, passen sich die vitalen Äußerungen des menschlichen Organismus der jeweiligen Ortszeit an. Dieses Anpassungsbestreben ist also eine biologische Grundeigenschaft, die sofort einsetzt und die Wirkung einer jeden Desynchronisation aufzuheben versucht (Resynchronisation). In dem Beispiel der genügend langsamen Ortszeitveränderung während einer Schiffsreise (14.2.2) gelingt dies mühelos und vollständig mit der Zeitveränderung. Bei raschem Ortszeitwechsel mit Meridianüberschreitung aber, beispielsweise durch Transatlantikflüge, wirkt sich die Desynchronisation mehr oder weniger lange nachweisbar aus. So ist die 6-stündige Zeitverschiebung nach einem Flug von Köln nach Washington D.C. (oder um-

gekehrt) spürbar und objektiv nachweisbar. Es kommt zu Rhythmusstörungen infolge der Desynchronisation, die subjektiv unterschiedlich stark empfunden werden und die sich überwiegend in vorübergehenden Schlafstörungen und/oder Verdauungsbeschwerden äußern. Es wurde beobachtet, dass Transmeridianflüge in Ost-West-Richtung wesentlich verträglicher sind als in Gegenrichtung. Teilweise wird dies durch die Bewegung „mit der Sonne“ begründet, da Tageslicht ein wesentlicher Zeitgeber für die physiologischen Rhythmen darstellt. Objektiv bedürfen u.a. Pulsfrequenz und Körpertemperatur der rhythmischen Wiederanpassung, aber auch die Produktionsphasen der verschiedenen Hormone resp. die Sekretionsverläufe verschiedener Stoffe muss der Organismus bei einer solchen Umstellung „mitziehen“. Eine solche Wiederherstellung der inneren „zeitlichen Ordnung“ und Abstimmung bei einem 6-Stunden-Zeitsprung (Beispiel Köln-Washington) benötigt nachweislich bis zu 9 Tagen (s. Abb. 14.8). Vergleichbares gilt auch für verschiedene geforderte Leistungen, nicht nur für die psychomotorischen. Zur Bestimmung des Zeitbedarfs für die Resynchronisation lässt sich als Faustregel angeben: Innerhalb von jeweils zwei Tagen am neuen Ort verringert sich der Phasenwinkel zwischen „alter“ und „neuer“ Ortszeit um 50 %, also bei einem Desynchronisationssprung von 6 Stunden nach zwei Tagen auf 3 Stunden, nach weiteren 2 Tagen auf 1 1/2 Stunden usw., um so rasch an praktischer Relevanz zu verlieren. Diesen Angaben ist hinzuzufügen, dass die Toleranz gegenüber Unterbrechungen bzw. Störungen der Circadian-Rhythmik mit zunehmendem Alter abnimmt. Im allgemeinen stellt das auftretende Schlafdefizit die größte Belastung für den Flugreisenden dar. Generell ist der menschliche Organismus innerhalb von fünf Tagen, mit individuellen Abweichungen, vegetativ auf den neuen Zeitstand angepasst. Insbesondere in den ersten zwei Tagen kann mit Hilfe von Durchschlafmitteln nach Ost-West Flügen, bzw. mit Hilfe von Einschlafmitteln nach West-Ost Flügen größeren Schlafdefiziten vorgebeugt werden.

14.3.2 Transmeridiane Flüge und Dauermedikation

Zur Betreuung von Flugpassagieren betreffen die häufigsten Fragestellungen die Umstellung von Diabetikern, die Einnahme von Ovulationshemmern („Pille“), Antikoagulantien (Medikamente zur Blutverdünnung) und allgemeiner Medikation, die (1-3 mal/die) zur optimalen Wirkung einen gewissen konstanten Spiegel ohne größere Dosischwankung erfahren soll. Generell gilt, dass die „heimischen“ Einnahmezeitpunkte eingehalten werden sollen, sofern die Zeitzone Reisen weniger als fünf Tage dauern. Bei längeren Aufenthalten in einer neuen Zeitzone ist eine Umstellung der Einnahmezeiten innerhalb der ersten drei Tage empfehlenswert. Es gilt hierbei, die Abstände in der heimischen Zeitzone zu berechnen und diese in der neuen Zeitzone wieder zu erreichen. Beim Transfer sollten die Einnahmezeitpunkte bereits vorbereitend verschoben werden, um eine rasche Umstellung in der neuen Zeitzone zu ermöglichen. Je nach Medikament sind dabei die entsprechenden Wirkspiegel und Zeitpuffermöglichkeiten zu berechnen, um etwa einschleichend im Stundenbereich die Einnahmeabstände zu verlängern bzw. zu verkürzen, je nach Reiserichtung. Unbedingt sollten die entsprechenden Werte (z.B. Quick bei Antikoagulantienumstellung, BZ bei Diabetikern) während der Zeitumstellung häufiger kontrolliert werden.

Diabetiker können bei guter Schulung problemlos Zeitzone Reisen durchführen, am einfachsten ist im Falle insulinpflichtiger Diabetiker das Basis-Bolus Konzept durchzuhalten. Aufgrund der Tatsache, dass sich dieses Insulinkonzept wie auch die oralen Antidiabetikakonzepte an den Mahlzeiten orientieren, besteht die größte Hypoglykämiegefahr während der ersten Nächte nach der Zeitverschiebung. Entsprechend sollten die zu erwartenden höheren Blutzuckerschwankungen durch häufigere BZ-Messungen überwacht werden, damit Hypoglykämien durch zusätzliche Mahlzeiten und Hyperglykämien durch vorsichtiges Nachspritzen von Normalinsulin (erst oberhalb 200 mg/dl) entgegengewirkt werden kann.

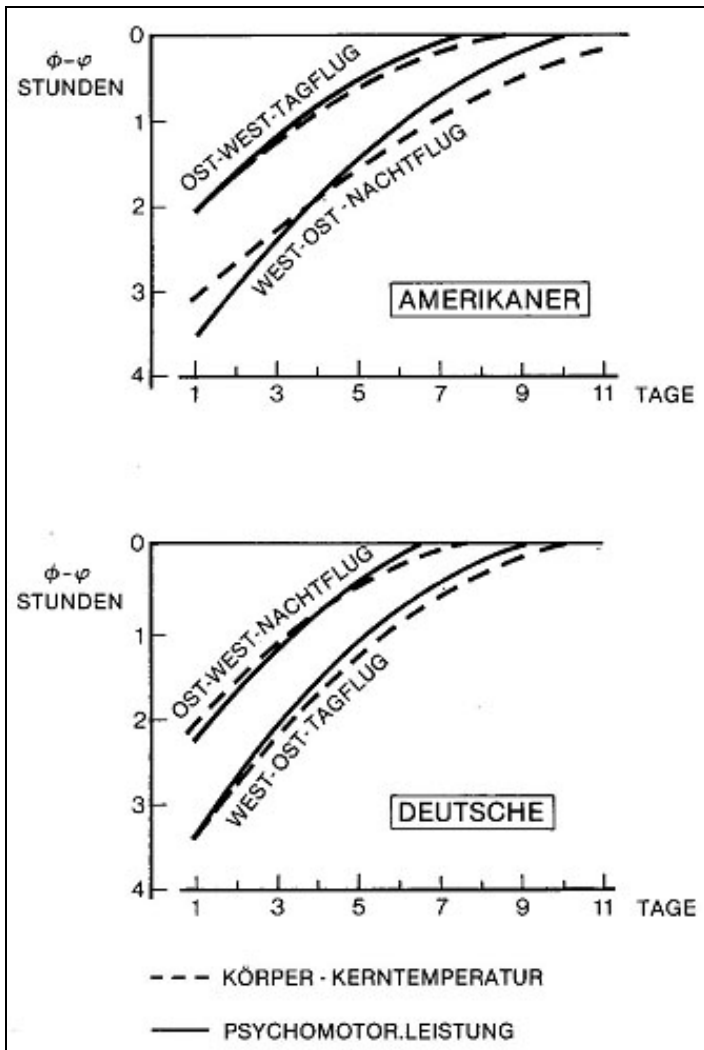


Abb.14.8: Innere Dissoziation. $\phi - \varphi$ = Phasendifferenz zwischen neuer Ortszeit und „innerer Uhr“ in Stunden nach Flügen in W-O bzw. O-W-Richtung. Die innere Dissoziation nach dem ersten Tag (Beginn der Messungen) entspricht schon nicht mehr dem erfolgten Zeitzonensprung von hier 6 Stunden. Die Dauer der Resynchronisation in Tagen hängt nur von der Richtung ab, in der die Zeitzonen überquert werden, jedoch z.B. nicht, ob „gut synchronisierte“ Amerikaner oder Deutsche zunächst in Richtung Osten bzw. Westen fliegen. Dies gilt für die biologische Anpassungsleistung des Menschen (z.B. Körperkerntemperatur) wie auch für andere (z.B. psychomotorische) Leistungen. (nach H.M. Wegmann und K.E. Klein, 1973)

14.3.3 Leistungsflüge und Raumflüge

Transmeridiane Flüge sind zwar von der Beanspruchung des Menschen her gesehen auch Leistungsflüge, aber hier sollen solche Langstrecken- und Nachtflüge besprochen werden, für die u.U. zusätzlich folgendes gilt:

- Fliegen aus der Bereitschaft heraus, d.h. Start zu einer Mission u.U. gegen Ende einer Schicht, die nur Warten bedeutet hatte, die aber dennoch allein durch den Ablauf der Zeit ermüdet haben kann.
- Fliegen in einer Maschine, die stundenlang zum Sitzen zwingt (Kampfflugzeuge beim Überführungsflug, Hochleistungssegelflugzeug) und ggf. das Fliegen mit der Maske erfordert. Menschliche Bedürfnisse wie Nahrungsaufnahme und Ausscheidungen werden dann zumindest behindert, wenn nicht für die Dauer des Fluges unmöglich.

Allgemein bekannt ist jedoch, dass vor solchen Leistungsflügen

- ausgeschlafen werden soll (möglich, soweit der Einsatz vorhersehbar ist),
- blähende Nahrung zu vermeiden ist und
- nicht unnötig viel getrunken werden soll

Ähnliche Vorbereitungen gelten auch für Raumflüge. Astronauten bzw. Kosmonauten werden z.T. bewusst in dehydriertem Zustand in Raumfahrtmissionen geschickt, um das Problem der Ausscheidungen für extrem lange Zeiträume zu umgehen. Der Aufenthalt an Bord der russischen Sojus-Transportsysteme bis zur Kopplung an die Raumstation MIR oder ihre Nachfolgerin ISS kann bis zu 3 Tagen dauern. Entsorgung oder Speicherung von Ausscheidungen sind für den Aufenthalt an Bord dieser Transportsysteme bisher nicht vorgesehen und müssen demnach durch entsprechende Vorbereitungen vermieden werden.

Bei größeren Raumfahrtmissionen werden zur Sicherung der maximalen Auslastung der Laboreinheiten mehrere Schichten von den Crewmitgliedern gebildet. Diese Schichten werden vor dem Raumflug durch exakt berechnete Desynchronisation in zwei verschiedene physiologische Zeitzonen gebracht, deren Ablauf bis zum Ende der Missionen durchgehalten werden. Hierbei ist zu beachten, dass sowohl zum Start als auch zur Landung alle Crewschichten wach sein müssen und der ca. 45-minütige Wechsel von Tag/Nacht im Orbit die physiologischen Zeitgeber möglichst nicht beeinflussen soll. Ist ein Leistungsflug mit Zeitverschiebung verbunden und kein längerer Aufenthalt am Zielort geplant, empfiehlt sich der Rückflug nach einem gründlichen Erholungsschlaf, um so die Wirkung der einsetzenden bio-rhythmischen Anpassung an die neue Ortszeit weitgehend zu unterbinden. Ist ein längerer Aufenthalt am Zielort geplant, ist das Hauptaugenmerk auf die Anpassung an die Ortszeit zu richten, ehe wieder erhöhte Leistung verlangt wird. Die Umstellung wird dann am raschesten und am besten erreicht, wenn bewusst versucht wird, den Tagesablauf am neuen Ort sofort „mitzuleben“ - auch wenn es anfangs schwer fällt. Es wird also empfohlen, wach zu bleiben, wenn „man dort wach ist“, und zu schlafen zu versuchen, wenn „man dort schläft“.

14.4 Verwendete und weiterführende Literatur

Allmers, H. Zirkadiane Rhythmik bei der Simulation des D2-Weltraumfluges. DGLR, Köln, (DGLR-Forschungsbericht, 92-27), 1992

Aschoff, J., Günther, B., Kramer, K. Energiehaushalt und Temperaturregulation. (Physiologie des Menschen, Bd 2) Urban und Schwarzenberg, München, 1971

Engel, P., Hildebrandt, G., Attia, M., Henze, W. Arbeitsmedizinische Untersuchungen mit einem Ganzkörperkühlzug bei extremer Hitzebelastung. Z Arbeitswiss 35 (1), 15-22, 1981

Gustaffson, C., Genner, M., Örnhagen, H., Derefeldt, G. Effects of normobaric hypoxic confinement on visual and motor performance. Aviat Space Environ Med 68 (11), 985-992, 1997

Hartmann, B. O. An overview of human factors in aircraft accidents and investigative techniques. In: Human factors aspects of aircraft, AGARD, Neuilly-sur-Seine, AGARD lecture series No 125, 1982

Lagarde, D., Batejat, D., Mourareau, C., Vigneron, J. P., Walkowiak, P. Simulated sustained flight operations and effects on vigilance and performance. In: Neurological limitations of aircraft operations, session 7: fatigue and sleepiness, 36. Neuilly-sur-Seine, AGARD-CP-579, 1996

Lauschner, E., Pongratz, H. Arbeitsmedizinische Probleme bei Flugreisen. In: Coenen, W. et al. (Hrsg.) Arbeitsmedizin und Arbeitsschutz aktuell, Fach 19, Lfg. 35/94, Stand: Mai 2000. Fischer, München, 2000

Mueller, B., Heftinger, Th. Interpretationsverfahren und Bewertungsverfahren arbeits- wissenschaftlich-ergonomischer Felddaten. Z Arbeitswiss 35 (2), 82-86, 1981

Porcu, S., Bellatreccia, A., Mambro, G., Napolitani, I. Fatigue: operational and clinical issues. In: Neurological limitations of aircraft operations, session 7: fatigue and sleepiness, 32. AGARD, Neuilly-sur-Seine, AGARD-CP-579, 1996

Reinhart, R. O. Sleep, jet lag and fatigue. In: Reinhart, R. O. Basic flight physiology, chap 11, 2. ed. McGraw-Hill, New York, 1996

Schmülling, R.-M., Pfohl, M., Renn, W., Hardin, H., Grashoff, B. et al. Flugreisen trotz Diabetes?. In: Landgraf, H., Rose, D.-M., Aust, P. E. (Hrsg.) Flugreisemedizin, Teil 2: klinische Flugmedizin, Kap 9, Blackwell, Berlin, 1996

Spinweber, C. L. Sedating and nonsedating sleeping aids in air operations. In: Biochemical enhancement of performance, 11. AGARD, Neuilly-sur-Seine, AGARD-CP-415, 1987

Wegmann, H. M., Klein, K. E. Internal dissociation after transmeridian flights. In: XXI. Internationaler Kongress für Luft- und Raumfahrtmedizin, session 3: innere Dissoziation und Desynchronisation circadianer Systeme. München, 1973

15 GESUNDHEITLICHE RISIKOFAKTOREN UND DEREN VERMEIDUNG

15.1 Gesundheit und Fliegen

Das Fliegen, insbesondere das Fliegen moderner Hochleistungsflugzeuge, fordert den Besatzungsangehörigen physische und psychische Höchstleistungen ab, die an die Grenze dessen stoßen, was ein gesunder, durchschnittlich trainierter Mensch eben noch zu leisten in der Lage ist. Alle tatsächlichen und drohenden Abweichungen von dieser „Normalform“ müssen deshalb als Risikofaktoren für die Flugsicherheit angesehen werden und als solche von den Besatzungsangehörigen und den verantwortlichen Fliegerärzten bekämpft werden.

Der Fliegerarzt muss in seiner Sorge um die Gesundheit der Lfz-Besatzungsangehörigen nicht nur kurativ, sondern **präventiv** tätig werden. In erster Linie sind hier natürlich die jährlich wiederkehrenden (WFV-) Untersuchungen auf Fliegertauglichkeit zu nennen mit dem Ziel der speziellen Früherkennung von häufig vorkommenden, zunächst schleichend verlaufenden Krankheiten mit sich allmählich entwickelnden Schäden an bestimmten Organen oder Funktionssystemen (arterielle Hypertonie, Arteriosklerose, Hyperurikaemie, etc.).



Abb. 15.1 : Risikofaktoren nicht nur für den Flugzeugführer

Dazu gehört auch, allgemein anerkannte und vermeidbare Gesundheitsrisiken auszumerzen, die auch zu einem hohen Prozentsatz für die Gesamtmorbidität unserer Bevölkerung verantwortlich sind, wie Rauchen, Übergewicht, Bewegungsmangel, Alkohol- und Medikamentenkonsum. (s. Abb.15.1).

Denn obschon angehende Piloten vor Beginn ihrer Ausbildung einem strengen medizinischen Auswahlverfahren unterworfen werden, entwickeln sich doch im Laufe ihrer fliegerischen Karriere akute oder chronische Erkrankungen wie bei ihren nicht fliegenden Altersgenossen. Prävention in diesem Sinne umfasst nicht nur den Schutz vor möglichen Erkrankungen durch Aufklärung, Erziehung und Früherkennung, sondern hat darüber hinaus noch eine Steigerung der Belastbarkeit, der Leistungsfähigkeit und des Wohlbefindens zum Ziel. Re-

zepte für ein gesundes Leben und eine gesunde Ernährung gibt es heute fast in jeder Tages- oder Wochenzeitung, werden angepriesen von den verschiedensten Gesundheitsaposteln oder -Gurus.

Manchmal sind diese Ratschläge sinnvoll, häufig sind sie es nicht. Hat man alle Rezepte verdaut, kann man sie mit zwei Worten zusammenfassen: **Mäßigkeit und gesunder Menschenverstand**. Auf fliegende Besatzungen angewandt, liegt so die Forderung nach ausreichenden Ruhepausen vor fliegerischen Einsätzen, angemessenem körperlichem Training, Einschränkung von Alkohol- und Tabakkonsum sowie ausreichender und richtiger Ernährung auf der Hand.

15.2 Die Bedeutung richtiger Ernährung

Bei der normalen deutschen Kost, so wie sie auch in den Truppen- bzw. Pilotenküchen und Kantinen der Bundeswehr zubereitet wird, sind Mangelerscheinungen bzw. Unterernährung selten. Vielmehr gehören Übergewicht und die Frage nach der physiologischen Gewichtsreduktion zu den Problemkreisen, mit denen sich Truppen- und Fliegerärzte zu beschäftigen haben. **Übergewicht** ist kein kosmetisches Problem. Bei lange bestehender Adipositas kann es zu Bluthochdruck mit einer Myokardhypertrophie mit Zunahme der Ruheherzfrequenz kommen. Es entsteht ein Minutenvolumenhochdruck, sowohl in Ruhe als auch bei Belastung. Adipositas zählt zu den Risikofaktoren der koronaren Herzerkrankung. An der Lunge lassen sich oft gemischt restriktiv-obstruktive Ventilationsstörungen nachweisen. Die Folgen für die Leber bestehen zunächst in einer Zunahme des Fettgehaltes mit Funktionsstörung des Organs. Adipöse haben ferner häufiger Gallensteine als Normalgewichtige. Durch die Hypertrophie des Fettgewebes selbst wird eine endokrine Störung ausgelöst, die in direkter Abhängigkeit von der Höhe des Übergewichts zu stehen scheint und sich nach Gewichtsreduktion wieder zurückbildet. Diese Hormonstörung zeichnet sich durch Erhöhung der Nüchterninsulinwerte und Gesamtkortikoidausscheidung als Ausdruck eines erhöhten Plasmakortisolumsatzes aus. Eine mit dem Übergewicht einhergehende Verminderung der kardiopulmonalen Leistungsbreite lässt sich mit Hilfe von Belastungstests im maximalen bzw. submaximalen Leistungsbereich (z.B. Ergospirometrie, Ergometrie) nachweisen. Eine Einschätzung des Übergewichtes lässt sich unter Zuhilfenahme der Formel **Normalgewicht in Kilogramm = Körpergröße in cm minus 100** nur annähernd vornehmen. Mit berücksichtigt werden müssen außerdem Konstitutionstyp bzw. auch die Dicke des Unterhautfettgewebes.

Für die Behandlung des Übergewichtes kommt natürlich in erster Linie in Frage, einfach die zugeführten Kalorien zu reduzieren (Rezept „F.d.H.“). Dabei ist allerdings zu beachten, dass es nicht zu einem Defizit an essentiellen Baustoffen wie Vitaminen, Mineralien, essentiellen Aminosäuren und ungesättigten Fettsäuren kommt. Daneben kann jede rapide Gewichtsreduktion zu unerwünschten Nebenwirkungen wie allgemeiner Schwäche, zunehmender Nervosität, ungewohnter Reizbarkeit und Nachlassen des Antriebs und der gesamten vitalen Funktionen bis hin zur diätinduzierten Impotenz führen. Übergewicht an sich und die von Besatzungsangehörigen vor der WFV-Untersuchung häufig geübte Praxis, noch schnell mit Hilfe von Null-, Fett-, und sonstigen Diäten an Gewicht abzunehmen, ist daher vom flugmedizinischen Standpunkt aus als untauglicher Weg abzulehnen. Eine genaue Erhebung der Ernährungsanamnese ist ein wichtiger erster Schritt der Behandlung. Ein vom Patienten ausgefülltes ausführliches 7-Tage-Protokoll mit Mengenangabe der verzehrten Lebensmittel deckt häufig genug den Überkonsum von Kohlenhydraten in Form von gesüßten Getränken, Fruchtsäften, Alkohol oder eine relative Überernährung mit Fetten auf.

Reduktion dieser Nahrungsanteile, verbunden mit regelmäßigem körperlichem Ausdauertraining unter Aufsicht, führt gesetzmäßig und zugleich schonend zu einem Abfall des Körpergewichtes auf konstitutionsgerechtes Normalmaß.

15.3 Die Rolle eines ausreichenden körperlichen Trainings

Das Fliegen mit modernen Hochleistungskampfflugzeugen stellt an das Herzkreislaufsystem höchste Anforderungen. Für die psychophysische Fitness des Piloten ist deshalb eine ausreichende kardiopulmonale Leistungsbreite Voraussetzung. Körperliches Training für Lfz-Besatzungsangehörige ist aus mindestens zwei Blickwinkeln zu betrachten: zum einen das Training zur Verbesserung bzw. Erhaltung der kardiokorporalen Leistungsfähigkeit, zum anderen das Training zur Verbesserung der G-Toleranz. Um den Herzmuskel effektiv zu trainieren, muss man ihn wie jeden anderen Muskel auch gleichmäßig über eine entsprechende Zeit im submaximalen Leistungsbereich beanspruchen. Der Pumpmuskel Herz aber wird dann optimal belastet, wenn er gleichzeitig möglichst viele Muskelgruppen mit genügend Blut versorgen muss. Sportarten, die dieser Anforderung genügen, sind z.B.

- Laufen
- Radfahren,
- Schwimmen und Rudern.

Dieser Mehranforderung kommt das Herz zunächst mit einer Steigerung des Auswurfvolumens, dann aber mit der Steigerung der Schlagfrequenz nach. Anhaltspunkt für ein hinreichendes Training ist also die erreichte Herzfrequenz. Ein verhältnismäßig geringer Aufwand genügt, um eine ausreichende Herzkreislauf-Leistungsfähigkeit zu erreichen. Faustformeln wie „Herzfrequenz 170 minus Lebensalter über 20 Minuten dreimal in der Woche“ als zu erreichende Herz- und Trainingsfrequenz haben sich bewährt. Keinesfalls sollte jedoch statt der Herzfrequenz und der Trainingsdauer Kilometer- oder Wattvorgaben benutzt werden, da gerade in der Anfangsphase des Trainings Selbstüberschätzung zu vorzeitigem Abbruch, Muskelkater und Unlust am Training führt. Auf der anderen Seite kommt es bei hochausdauertrainierten Sportlern zu einer ausgeprägten Vagotonie und Reduzierung der Effektivität der Blutdruckregulierung. Dies führt bei ihnen bei Abnahme des Carotis-Sinus-Druckes infolge von G-Kräften nur zu einer unzureichenden Gegenregulation des arteriellen Mitteldruckes und der Herzfrequenz. Untersuchungen der Auswirkung eines reinen Lauftrainings („Läufer“) und eines ausschließlichen Krafttrainings („Gewichtheber“) auf die Zunahme der G-Toleranz zeigten eine signifikant höhere Zunahme der G-Toleranz bei der Gruppe der Gewichtheber. Die Zunahme der G-Toleranz der „Läufer“ lag sogar noch etwas unter der der Kontrollgruppe, deren Zunahme der G-Toleranz ebenfalls in dem Untersuchungszeitraum auf einer Humanzentrifuge ermittelt wurden. Ein optimales Training für Lfz-Besatzungsangehörige beinhaltet also sowohl eine Ausdauer- als auch eine Kraftsportkomponente, um auch wiederholte, teilweise lang andauernde G-Belastungen ertragen zu können. Die positive Wirkung des körperlichen Trainings auf das Körpergewicht und auf Störungen des Fettstoffwechsels sei nur am Rande erwähnt.

15.4 Medikamente und Fliegen

Die Verschreibungspraxis von Medikamenten für Lfz-Besatzungsangehörige innerhalb der Bundeswehr ist in der BesAnGenArztLw 707, Ziff. 644 ff und ZDV 46/6 Ziff. 351/4 grundsätzlich geregelt. Die erste Überlegung in diesem Zusammenhang muss sein, ob der betreffende Lfz-Besatzungsangehörige überhaupt mit der Erkrankung, weswegen er das Medikament erhält, flugdienstfähig ist, d.h. ein Flugzeug sicher führen kann bzw. seine Aufgabe an Bord des Luftfahrzeugs erfüllen kann, ohne seine Gesundheit, andere und damit die Flugsicherheit zu gefährden. Die zweite Überlegung gilt der Wirkung, Nebenwirkung und Halbwertszeit des verordneten Medikamentes.

Bei vielen Medikamenten müssen Nebenwirkungen wie:

- Abnahme der Sehschärfe,
- Beeinträchtigung der Koordination,

- Verlängerung der Reaktionszeit,
- Müdigkeit oder das Orthostasesyndrom,

berücksichtigt werden, die schon für sich allein genommen nicht mit dem Flugdienst vereinbar sind. Zu diesen Medikamenten zählen z.B. Antihistaminika, Anticholinergika, Spasmolytika, Tranquilizer, Sedativa, Antihypertensiva und Analgetika. Der größte Anteil aller verschriebenen Medikamente fällt unter eine dieser Kategorien. Natürlich kann es nicht Aufgabe dieser Übersicht sein, Hunderte von verschiedenen Medikamenten im einzelnen zu diskutieren, abgesehen davon, dass unser Wissen um Interaktionen und Interferenzen gleichzeitig eingenommener Medikamente noch beschränkt ist. Das sicherste - und vorgeschriebene - Vorgehen sieht zunächst die vorübergehende Befreiung vom Flugdienst während der Medikamenteneinnahme vor. Sollte das Medikament nebenwirkungsfrei vertragen werden und ist aufgrund der Krankheit und der Hauptwirkung des Medikaments keine Gefährdung der Flugsicherheit gegeben, so kann der **Fliegerarzt einen Antrag auf Genehmigung der Dauermedikation** mit Therapieplan und Stellungnahme an den Leiter der zuständigen Fachgruppe der Abteilung I des FIMedInstLw stellen. Nach Genehmigung kann der betreffende Besatzungsangehörige wieder zum Flugdienst zugelassen werden. Dies ist in der Regel z.B. bei der Behandlung der blanden Struma mit Thyroxin oder der Behandlung einer milden Hypertonie mit Diuretika der Fall. Dieses Vorgehen darf allerdings auf keinen Fall verwechselt werden mit der Verfahrensweise bei Erkrankungen, die zu dem Urteil „dauernd wehrfliegerverwendungsunfähig“ führen. Der hier mögliche Antrag auf Sondergenehmigung wird vom Leiter des FIMedInstLw entschieden. Ungelöst ist damit leider noch das Problem einer Verschreibungspraxis von Medikamenten durch in der Flugmedizin unerfahrene Ärzte bzw. der Selbstmedikation der Piloten, die sich Kopfschmerztabletten von ihrer Ehefrau „ausleihen“ oder sich Grippetabletten vom Freund aus der Drogerie bringen lassen. Hier hilft nur das regelmäßige Briefing des fliegenden Personals über die dabei auftretende Gefährdung ihrer eigenen Sicherheit und der Aufbau eines guten Vertrauensverhältnisses zwischen den Fliegenden Besatzungen und „ihrem“ Fliegerarzt, so dass sie mit buchstäblich all ihren „Wehwehchen“ zu ihm kommen.

15.5 Andere Noxen

Trotz aller Aufklärungskampagnen über die Wirkung von **Alkohol** auf Wachheit und Reaktion von Gerätebedienern, - ob Autofahrer, ob Piloten -, bleibt doch der Alkohol unzweifelhaft eine führende Einzelursache bei Unfällen. Bedenkt man, dass selbst geringste Mengen Alkohol (0,2 ‰) zu einer Beeinträchtigung der Reaktionszeit führen können, so drängt sich einem der Schluss, dass Alkohol im Cockpit nichts zu suchen hat, förmlich auf. Selbst nach vollständiger Metabolisierung des Alkohols kann es infolge der Hang-over-Symptome, wie Kopfschmerzen, Müdigkeit und Beeinträchtigung des normalen Denkvermögens, zu einer ernsthaften Gefährdung der Flugsicherheit kommen.

Das oben Gesagte gilt in gleicher Weise für alle Arten von **Rauschgiften**. Die Gefahr der Gewöhnung/Sucht und die Sekundärschäden in den einzelnen Organsystemen durch Alkohol und Rauschgifte seien hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Nicht erst seit der FRAMINGHAM-Studie (1950) ist es erwiesen, dass Rauchen schädlich ist. Krebs, Arteriosklerose und chronische Bronchopneumopathien sind Folgen dieser „schlechten Angewohnheit“, die schon seit Jahrhunderten in unserer Kultur gepflegt wird. Das sollte eigentlich für einen Fliegerarzt Grund genug sein, seinen Patienten das Rauchen abzugewöhnen. Wie schon in den Kapiteln 2 und 3 beschrieben, kommt hier noch hinzu, dass mit dem Rauch eingeatmetes CO mit seiner 250 mal größeren Affinität zum Hämoglobin den Sauerstoff aus seiner Bindung verdrängt und zu einer milden Hypoxie führt, die zwar unter Normalbedingungen in Meereshöhe zu keiner klinischen Symptomatik führt, aber in der hypoxischen

Umwelt des Fliegers fatale Folgen haben kann. Nimmt der Fliegerarzt „seine Raucher“ einzeln ins Gebet, ist die Erfolgsquote meist sehr gering, vor allem, wenn es bei keinem der Betroffenen bisher zu negativen Auswirkungen geführt hat oder er persönlich - entgegen aller Statistik - andere Erfahrungen vorweisen kann („Mein Großvater hat bis zu seinem 81.Lebensjahr geraucht, und er war nie krank!“). Ein solches Bemühen ist insbesondere dann frustrierend, wenn der Fliegerarzt selbst raucht. Von mehr Erfolg gekrönt sind Bemühungen, das Rauchen in der Gruppe aufzugeben, insbesondere wenn Familienmitglieder - Ehefrau u.a. - sich beteiligen und positive Verstärker wie die bevorstehende Geburt eines Kindes o.a. einen Anreiz geben.

15.6 Möglichkeiten des autogenen Trainings

Autogenes Training als Form einer Entspannungsübung wird heute von sehr vielen Spitzensportlern vor entscheidenden Wettkämpfen durchgeführt. Nach der Rücknahme der Entspannung erreichen sie dann eine erhöhte Konzentration.

Diese Entspannungsübungen sind zwar kein Ersatz für fehlenden Schlaf, können aber helfen, das Schlafbedürfnis für eine gewisse Zeit gleichsam aufzuschieben. Nach entsprechender Übung lassen sich sonst nur dem autonomen Nervensystem unterworfenen Regelleistungen (Hauttemperatur, Herzfrequenz und Blutdruck) günstig beeinflussen. Es lassen sich - den Sportlern vergleichbar - innerhalb des fliegerischen Dienstes leicht Situationen finden, in denen Lfz-Besatzungsangehörigen vor ihrem Einsatz durch eine solche Entspannungsübung eine Steigerung ihrer Konzentration erfahren könnten. Solche Unterfangen scheitern jedoch meistens an der bis zum Einsatz verbleibenden Zeit und den räumlichen Gegebenheiten. Dem anderen Aspekt des autogenen Trainings, nämlich die **willkürliche Beeinflussung autonomer Regulationen**, wird heute bei fliegenden Besatzungen vermehrt Beachtung geschenkt, so vor allem bei dem sympathikotonen Typus, der, leicht erregbar, zum Aufbrausen neigt und häufig unter hypertoner Blutdruckregulation leidet. Regelmäßig ausgeübtes autogenes Training zeigt hier einen günstigen Effekt mit Dämpfung des Sympathikus und Wiederherstellung einer normotonen Reaktionslage. Während vorbeugender Heilverfahren haben fliegende Besatzungen in vielen Kuranstalten die Möglichkeit, zumindest die ersten Schwere- und Wärmeübungen des autogenen Trainings zu lernen. Dies wird noch begünstigt durch ein verändertes psychosoziales Umfeld während der Kurmaßnahme.

15.7 Verwendete und weiterführende Literatur

Carretta T. R. et al. U.S. AirForce Pilot Selection Tests: What is Measured and What is Predictive?. Aviat. Space Environ. Med. 67 (3), 1996

First European workshop in aviation cardiology. European Heart Journal (13) (Supplement H), 1992

Guohua L. Pilot-Related Factors in Aircraft Crashes: A Review of Epidemiologic Studies. Aviat. Space Environ. Med. 65 (10), 1994

Hauner, H., Berg. A Körperliche Bewegung zur Prävention und Behandlung der Adipositas. Deutsches Ärzteblatt 97 (12), 2000

Lauschner, E., Pongratz, H., Arbeitsmedizinische Probleme bei Flugreisen. In: Coenen, W. et al. (Hrsg.) Arbeitsmedizin und Arbeitsschutz aktuell, Kap. 19.1, Fischer Verlag, Stuttgart, 2000

Schalch D., Scharmann A. Strahlenexposition bei Flugreisen. Deutsches Ärzteblatt 93 (22), 1996

Shvartz E. Endurance Fitness and Orthostatic Tolerance. Aviat. Space Environ. Med. 67 (10), 1996

Werchan, P. M. Physiologic Bases of G-Induced Loss of Consciousness (G-LOC). Aviat. Space Environ. Med. 62 (7), 1991

16 Belastung, Beanspruchung, Stress, Stressoren

16.1 Belastung und Beanspruchung

In den deutschsprachigen Arbeitswissenschaften (Arbeitsmedizin, Arbeitspsychologie, Ergonomie) hat sich in den siebziger Jahren eine klare Trennung zwischen den Begriffen „*Belastung*“ und „*Beanspruchung*“ durchgesetzt. Im **Belastungs-/Beanspruchungskonzept** (Rohmert, 1984, Rohmert & Rutenfranz, 1975) wird **Belastung** analog zur Terminologie in der Mechanik als die Summe der auf den Menschen von außen einwirkenden Größen und Faktoren definiert. Rohmert (1973) unterscheidet weiter zwischen „*Belastungsgrößen*“ und „*Belastungsfaktoren*“. **Belastungsgrößen** sind im naturwissenschaftlichen Sinne exakt messbare Einflüsse (Strahlen, Schall, Schwingungen, mechanische Kräfte etc.), während **Belastungsfaktoren** als Einwirkungen aus dem psychosozialen Umfeld des Menschen verstanden werden (Zeitdruck, Arbeitsorganisation, Zwang zur Kooperation etc.), die sich einer streng naturwissenschaftlichen Messung entziehen. *Belastungen* jeglicher Art werden durch ihre *Belastungshöhe* (Intensität) und ihre *Belastungsdauer* (Zeit) determiniert.

Beanspruchung beschreibt demgegenüber die Auswirkungen der *Belastung* auf den menschlichen Organismus und das Verhalten. Damit wird die Verarbeitung der Belastungsfaktoren bzw. der „energetische Aufwand angesprochen, der erbracht werden muss, um die Belastungen zu bewältigen“ (Braun et al., 1999). Die *Beanspruchung* eines Menschen ist abhängig von der Quantität der einwirkenden *Belastungen*, ihrer Qualität (Zeitdauer und Intensität) sowie von den individuellen Eigenschaften des Menschen (Anlagen, Fähigkeiten, Fertigkeiten, Alter, Geschlecht, Trainingszustand) und seiner temporären Befindlichkeit (psychophysische Fitness, Motivation, Stimmung etc.). Demnach kann die gleiche *Belastung* bei verschiedenen Menschen zu einer völlig unterschiedlichen *Beanspruchung* führen (interindividuelle Betrachtung). Aber auch intraindividuell ist die *Beanspruchung* des Menschen durch die gleiche *Belastung* zu unterschiedlichen Zeitpunkten und/oder unter verschiedenen Rahmenbedingungen keineswegs konstant. Bei der Auswahl von Personen für einen Arbeitsplatz (→ Eignungsfeststellung) wird deshalb versucht, die individuellen arbeitsplatzrelevanten Eigenschaften (Eignungsmerkmale) eines Bewerbers zu ermitteln und seine Beanspruchung in verschiedenen anforderungsbezogenen Situationen (Tests, Arbeitsproben) zu beobachten. In der Betrachtungsweise des Menschen als Teil eines „Mensch-Maschine-Systems“ wird *Belastung* zusammenfassend als die anforderungsbezogene und damit „objektive“ Seite und *Beanspruchung* als die personenbezogene, „subjektive“ Seite des Systems verstanden. Der begrifflichen Klarheit im deutschsprachigen Raum hinsichtlich der Unterscheidung von *Belastung* und *Beanspruchung* stehen im englischsprachigen Bereich relativ widersprüchliche Definitionen gegenüber. Der Begriff „**Workload**“ wird bei verschiedenen Autoren sowohl im Sinne von *Belastung* als auch von *Beanspruchung* definiert. Für den Begriff *Beanspruchung* gibt es in den englischsprachigen Arbeitswissenschaften keine eindeutige Entsprechung. Hingegen wird „**Strain**“ in der Mechanik eindeutig im Sinne von *Beanspruchung* verwendet.

16.2 Stress, Stressreaktion

Der Begriff **Stress** hat nicht nur Eingang in die Arbeitswissenschaften gefunden, sondern er ist auch eines jener Modewörter geworden, die in der Umgangssprache besonders häufig verwendet werden. Viele Menschen fühlen sich heutzutage „gestresst“ oder klagen über den „Stress“ in der Familie, Schule bzw. Ausbildung, am Arbeitsplatz oder durch die Umweltbedingungen. Über Stress gibt es unzählige seriöse und weniger seriöse Publikationen und nahezu ebenso viele Theorien. Einigkeit über die Definition von Stress besteht bei den Wissenschaftlern nicht. Im folgenden soll deshalb nur auf die bekanntesten Ergebnisse der Stressforschung eingegangen werden. Nach Selye (1974) wird Stress als (unspezifische) Reaktion

des Menschen auf beliebige Belastungen (Stressoren) verstanden. Die Stressreaktion ist das Bindeglied zwischen dem Stressor und stressbedingten Störungen (Erkrankungen in individuell unterschiedlichen Körperbereichen (Zielorgan)).

Stressor → Stressreaktion → stressbedingte Störung

Stress ist nicht in jedem Fall als unerwünscht oder gefährlich zu betrachten. Vielmehr führt eine zunehmende stressbedingte Erregung zur maximalen Leistungsfähigkeit des Menschen. Ein derartiger Zustand wird z.B. von Sportlern bewusst angestrebt. Dieser positive (motivierende) Stress wird als „Eustress“ bezeichnet. Bei weiterer Erregung sinkt die Leistungsfähigkeit bis zur Funktionsstörung/Krankheit wieder ab. Dieser (negative) Anteil des stressbedingten Erregungsverlaufs heißt „Distress“. Der Zusammenhang zwischen Erregung und Leistungsfähigkeit ist in Abb. 16.1 dargestellt.

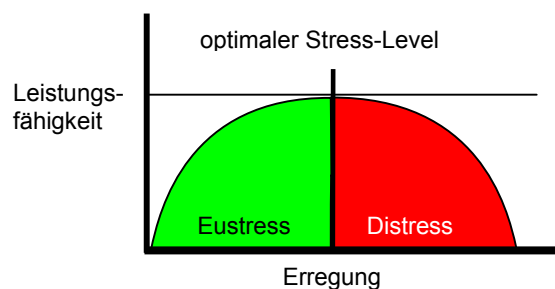


Abb. 16.1: Eustress/Distress

16.3 Allgemeines Anpassungssyndrom

Als Student der Medizin beobachtete Hans Selye bei Patienten mit unterschiedlichen Krankheiten ein stereotyp auftretendes Symptombild, das er als „Syndrome of just being sick“ beschrieb. Später wurde dieses Phänomen als „General Adaptation Syndrome (GAS)“ beschrieben. Demnach läuft die Stressreaktion immer in drei Stufen ab:

Stufe 1: In der Alarmphase (Alarm Stage) mobilisiert der Organismus seine Reserven („call to arms“), um sich gegen den Stressor zu verteidigen.

Stufe 2: In der Widerstandsphase (Stage of Resistance) versucht der Körper, sich an die Belastungen anzupassen und sein Gleichgewicht (Homöostase) wiederzufinden.

Stufe 3: Bei exzessiver oder länger andauernder Belastung brechen die Bewältigungsmechanismen des Körpers zusammen und es kommt zur Erschöpfung (Exhaustion Stage), im Extremfall sogar zum Tod.

16.4 Stressoren

Stressoren können physikalischer (Temperatur, Lärm, Vibrationen, mechanische Einwirkungen etc.) bzw. physiologischer (Einwirkung von biochemischen Substanzen) Natur sein. Daneben gibt es „psychosoziale Stressoren“. Sie bewirken im Gegensatz zu den oben erwähnten Stressoren nicht direkt eine Stressreaktion. Vielmehr liegt es an der individuellen Bewertung durch den Menschen, welcher Reiz für ihn zum Stressor wird. Selye beschrieb dies wie folgt: „It is not what happens to you that matters, but how you take it“. Psychosoziale Stressoren, denen wir ständig ausgesetzt sind, bewirken erst dann eine Stressreaktion, wenn sie subjektiv als bedeutungsvoll und potenziell herausfordernd, belastend oder aversiv bewertet bzw. interpretiert wurden. Dabei hängt die Bewertung/Interpretation von den Persönlichkeitseigenschaften und der individuellen Lerngeschichte des Menschen ab. Nach In-

terpretation eines Reizes als Stressor kommt es zu einer Aktivierung von Emotionen, die dann die eigentliche Stressreaktion auslösen. Auf die physiologischen Abläufe der Stressreaktion kann hier aufgrund ihrer Komplexität nicht eingegangen werden. Abb. 16.2 zeigt ein einfaches Modell der Zusammenhänge zwischen Ereignis (Stressor) und den daraus resultierenden Folgen.

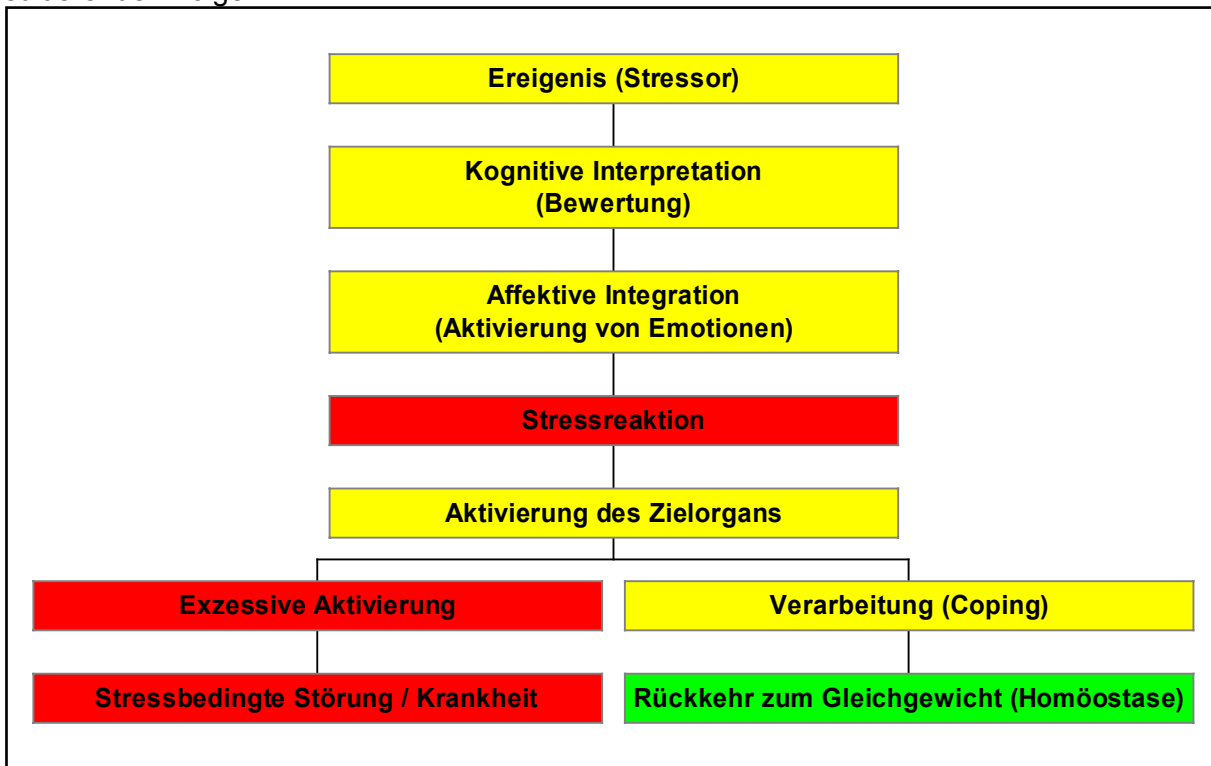


Abb.16.2: Ein Modell der Stressreaktion (nach Mitchell und Everly, 1993)

16.5 Individuelle Unterschiede bei der Reaktion auf Stress

Zumindest bei einem Teil der Stressforscher besteht Einigkeit darüber, dass das Vermögen, Stress zu ertragen bzw. zu bewältigen, bei den Menschen unterschiedlich ausgeprägt ist. Dieses Verhaltensmerkmal wird als „Stressresistenz“, „Stresstoleranz“, „Stressanfälligkeit“ oder „Belastbarkeit“ bezeichnet. Ob es sich dabei um ein habituelles Persönlichkeitsmerkmal handelt, d.h. ob dieses Merkmal in verschiedenen Situationen gleiches oder ähnliches Verhalten bewirkt, ist umstritten. Es scheint vielmehr wahrscheinlicher, dass das Ausmaß der individuellen Stressreaktion in starkem Masse von der jeweiligen Situation abhängt. Beispiele dafür kennt jeder: Jemand, der sich bei einer freien Rede vor Zuhörern derart belastet fühlt, dass er seinen Redetext vergisst, ist vielleicht ein mutiger Bergsteiger oder ein umsichtiger Katastrophenhelfer, der selbst unter hohen Belastungen ruhig und effektiv arbeitet. Und mancher von uns hat sich schon über einen Mitmenschen gewundert, den er eher für ängstlich und wenig belastbar hielt, als dieser plötzlich in einer „echten“ Belastungssituation über sich hinauswuchs. Festzuhalten ist, dass das individuelle Verhalten in Stresssituationen von einer Vielzahl von Faktoren bestimmt wird, die sowohl in den Rahmenbedingungen der Situation als auch in der Person und Situation liegen.

16.6 Stressbewältigung: das „Coping-Konzept“

Das Coping-Konzept befasst sich mit der Bewältigung von Anforderungen, die vom Individuum als belastend oder als überfordernd angesehen werden (z.B. Bedrohung, Schädigung, Herausforderung). Nach Folkman und Lazarus (1980) kann man die Copingmechanismen in problemorientierte und emotionsorientierte Vorgehensweisen einteilen. Beim problemorien-

tierten Coping versucht der Mensch, Belastungen aktiv durch Veränderungen bei sich und oder in seinem Umfeld zu bewältigen und impulsive und voreilige Handlungen zu vermeiden. Als Beispiel für eine derartige Strategie kann die Technik des „Mentalen Trainings“ angeführt werden. Dabei geht es darum, den Handlungsablauf einer bevorstehenden Anforderung (z.B. sportlicher Wettkampf oder fliegerisches Manöver) in der Vorstellung - ggf. unter Einbeziehung motorischer Bewegungsabläufe – derart einzuüben, dass eine positive Transferwirkung auf die reale Anforderungssituation eintritt. Emotionsorientiertes Coping zielt auf die Reduzierung der emotionalen Beanspruchung ab, die aus nicht beeinflussbaren Stressbedingungen resultiert. Durch dieses Vorgehen werden zwar die stressauslösenden Bedingungen nicht beseitigt oder verändert, aber das Individuum fühlt sich besser (Monat und Lazarus, 1991). Das Verdrängen oder Negieren einer drohenden Gefahr zählt beispielsweise zu den emotionsorientierten Coping-Strategien. Die Ähnlichkeit zu den Abwehrmechanismen der Tiefenpsychologie liegt auf der Hand. Das von Meichenbaum (1991) entwickelte Stressimpfungstraining zielt auf die Vermittlung von Bewältigungsstrategien ab, die den Menschen vor allem in die Lage versetzen sollen, eine Stresssituation neu zu bewerten. Dabei ist es nach Meichenbaum in manchen – unkontrollierbaren Situationen – durchaus sinnvoll, die Belastung hinzunehmen oder gar zu verleugnen. Es ist nicht verwunderlich, dass sich die Wissenschaft intensiv mit der Frage beschäftigt hat, ob sich die Menschen hinsichtlich ihrer Vorgehensweise bei der Bewältigung von Stress (Copingstrategien) unterscheiden. Ein Teil der Forscher geht davon aus, dass es ebenso wie vererbte bzw. erworbene Persönlichkeitsmerkmale individuelle Verhaltensmuster bei der Belastungsbewältigung gibt (Coping-Stile). Coping-Stile lassen sich durch geeignete Testverfahren „messen“. Dadurch wird es – nach Ansicht der Testautoren - möglich, das Verhalten eines Individuums in Belastungssituationen zu prognostizieren. Die bislang nachgewiesenen Zusammenhänge zwischen Testverhalten und Verhalten in realen Situationen sind allerdings eher unbefriedigend. Andere Forscher (Folkman und Lazarus, 1980, 1985, 1988a) betonen mehr den situativen Aspekt sowie den Prozesscharakter der Belastungsbewältigung. Demnach setzt der Mensch in Belastungssituationen keineswegs ein festes Verhaltensmuster ein; vielmehr hängt es von der Vielzahl interner und externer Bedingungen ab, wie ein Mensch in einer konkreten Situation tatsächlich reagiert. Während der Versuch, individuelle Copingstrategien durch Testverfahren zu erfassen, bislang wenig erfolgreich verlief, erhofft sich die Wissenschaft durch „in vivo“ Beobachtung von Verhaltensabläufen in Belastungssituationen differenziertere Aufschlüsse über Copingstrategien.

16.7 Critical Incident Stress Management (CISM/nach Mitchell) Maßnahmen zur akuten Krisenintervention und zur Prävention posttraumatischer Belastungsstörungen

Von Soldaten, Angehörigen von Polizei, Feuerwehr und Rettungsdiensten und vergleichbaren Personengruppen wird allgemein und mit größter Selbstverständlichkeit erwartet, dass sie aufgrund ihrer Zugehörigkeit zu einer dieser Gruppen mit außergewöhnlichen Situationen besser umgehen und diese besser bewältigen können als Menschen, die nicht Angehörige einer dieser Gruppen sind. In der Regel ist dieser Personenkreis aufgrund seiner besonderen Persönlichkeitsstruktur, seiner Ausbildung und Erfahrung und eines bewusst oder unbewusst veränderten normativen Bezugssystems auch in der Lage, dieser Erwartungshaltung gerecht zu werden. Aus dem gewohnten Einsatzspektrum herausragende Ereignisse (Critical Incidents), wie zum Beispiel Ereignisse mit vielen Toten oder Schwerstverletzten, Tod oder schwere Verletzung von Kindern oder Kameraden, Schusswaffengebrauch mit Verletzungs- oder Todesfolge, Bedrohung von Leib und Leben oder die Erfahrung von Geiselnahme oder Gefangenschaft, beinhalten aber selbst für diesen Personenkreis ein erhebliches traumati-

sierendes Potential. Massive posttraumatische Stressreaktionen bis hin zur Entwicklung einer Post-Traumatischen-Stress-Disorder (PTSD; gem. DSM IV u. ICD 10; WDB-fähig) sind nicht selten die Folge solcher Ereignisse oder Einsätze. Zu dieser Art von Ereignissen gehören ohne Zweifel auch Flugunfälle, bei denen Besatzungsangehörige und/oder gegebenenfalls Passagiere ums Leben kamen oder schwerste Verletzungen davontrugen. Bis zum Hubschrauberabsturz bei Dortmund im Juni 1996, bei dem 3 Soldaten und 10 zivile Passagiere ums Leben kamen, wurden nach Flugunfällen in der Bundeswehr keinerlei psychologische Betreuungsmaßnahmen für Rettungsdienste, sonstige Beteiligte oder den betroffenen Verband durchgeführt. Die Gründe hierfür dürften zum einen in der Tatsache zu suchen sein, dass die Angehörigen der betroffenen Berufs- und Personengruppen dies aufgrund ihres, wie man heute weiß, unangemessenen beruflichen Selbstverständnisses gar nicht gewollt oder sogar rigoros abgelehnt hätten, zum anderen stammen die wissenschaftlichen Erkenntnisse, die in der Bundeswehr zur Erstellung entsprechender Konzepte geführt haben, erst aus den 80-iger und frühen 90-iger Jahren. Zwei Faktoren haben zudem mit Sicherheit dazu beigetragen, dass das Problem und die möglichen Konsequenzen häufig nicht erkannt oder aber bagatellisiert wurden. Einerseits hatten (und haben diese zum Teil heute noch) viele Betroffene eine anerzogene und nicht selten durch Vorgesetzte noch verstärkte Scheu, über psychische und/oder psychosomatische Störungen oder Probleme zu sprechen. Andererseits war bisher kaum bekannt, dass die entsprechenden Symptome häufig erst Tage, Wochen oder Monate nach dem Unfall oder außergewöhnlichen Ereignis auftreten können, weshalb sie wegen des großen zeitlichen Abstandes mit diesem gar nicht in Verbindung gebracht wurden. Auch nach dem Absturz bei Dortmund wurde zunächst kein Krisen-Interventions-Team (KIT) angefordert. Erst nachdem bei einigen Angehörigen des fliegenden Personals, der Technik und des Sanitätsdienstes ca. drei bis vier Wochen nach dem Bergungseinsatz massive psychische Störungen und Probleme aufgetreten waren, die zum Teil sogar zur Dienstunfähigkeit führten, wurde durch den Fliegerarzt ein KIT unter Leitung eines Fliegerpsychologen angefordert. Aufgrund der überwiegend positiven Resonanz und des Erfolges der durchgeführten Maßnahmen (ein Critical Incident Stress Debriefing/CISD und mehrere Einzelgespräche) wurden seither auf Weisung GenArztLw bei jedem Flugunfall mit Todesfolge sofort entsprechende Maßnahmen eingeleitet. Dabei mussten leider in einzelnen Fällen die entsandten Interventionsteams die bedauerliche Erfahrung machen, dass sich eine, zum Teil auch laut geäußerte, negative Einstellung höherer Vorgesetzter gegenüber solchen Maßnahmen auch äußerst nachteilig auf die Akzeptanz bei den Betroffenen auswirkt. Da jedoch davon ausgegangen werden muss, dass jeder Unfall mit Toten oder Schwerstverletzten für die am Unfall selbst oder bei Rettungs- und Bergungsmaßnahmen unmittelbar Beteiligten ein erhebliches traumatisierendes Potential beinhaltet, sollte es für jeden Vorgesetzten im Rahmen der Fürsorgepflicht selbstverständlich sein, dem betroffenen Personenkreis die Teilnahme an den angebotenen Betreuungsmaßnahmen nahe zu legen oder zumindest zu ermöglichen.

Kriterien, die eine erfolgreiche Stressbewältigung generell beeinträchtigen oder verhindern und somit immer ein erhebliches traumatisierendes Potential in sich bergen, sind

- **das Gefühl der Hilflosigkeit/Machtlosigkeit der Situation und den eigenen Reaktionen gegenüber**
- **berechtigte oder irrationale Schuldgefühle**
- **außergewöhnliche Dimension und/oder Intensität von Ereignissen**
- **hoher Grad der Identifikation und/oder persönlichen Betroffenheit**
- **Bedrohung von Leib und Leben (des eigenen und dessen anderer)**

Immer dann, wenn eines oder mehrere dieser Kriterien vorliegen, muss bei den Betroffenen von einer mehr oder minder starken Traumatisierung ausgegangen werden. Dies bedeutet aber nicht zwangsläufig, dass jeder davon Betroffene auch psychische Störungen oder Probleme entwickeln muss. Nach bisherigen Erfahrungen innerhalb und außerhalb der Bundeswehr sind im Durchschnitt etwa zwei Drittel dieser Personen aufgrund ihrer Persönlichkeitsstruktur, Ausbildung, Erfahrung und ihres aktuellen psycho-physischen Befindens auch ohne fremde Hilfe in der Lage, durch mehr oder weniger bewusste Veränderung ihres *normativen Bezugssystems* („Weltbildes“), das heißt ihrer Einstellungen, Normen und Werthaltungen und durch *Erweiterung und Anwendung der individuell verfügbaren Bewältigungskompetenz* mit einer solchen Erfahrung und ihren eigenen Reaktionen darauf angemessen umzugehen. Ohne die Durchführung von Krisen-Interventionsmaßnahmen muss aber bei einem Drittel kurz-, mittel- oder langfristig mit dem Auftreten von posttraumatischen Stressreaktionen unterschiedlicher Ausprägung gerechnet werden. Bei etwa 8 – 15 % aller Betroffenen führen ohne Intervention diese erfahrungsgemäß zur Ausprägung einer Post-Traumatischen Stress-Disorder (PTSD; auch: Post-Traumatische Belastungs-Störung/PTBS). Hierbei handelt es sich um die schwerste und lähmendste Form aller menschlichen Stressreaktionen, weshalb diese auch seit 1994 von der Weltgesundheitsorganisation WHO als eigenständige Krankheit anerkannt wurde. Diese kann in letzter Konsequenz zur Berufs- oder Erwerbsunfähigkeit sowie auch zu hirnganischen Veränderungen führen. Bedauerlicherweise gibt es bis heute keine gesicherten Kriterien für eine Prognose, zu welcher der beiden Gruppen der einzelne Betroffene mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit gehört.

16.7.1 Maßnahmen zur Krisenintervention

Die von *Prof. Mitchell* entwickelten mehrstufigen und integrativen Methoden und Techniken des **Critical Incident Stress Management (CISM)** wirken einer solchen Entwicklung durch unmittelbare, akute Krisenintervention entgegen. Dabei handelt es sich mit Ausnahme der vorbeugenden Unterrichts- und Trainingsmaßnahmen durchweg um Maßnahmen der Sekundärprävention. Durch nachsorgende Betreuung nach besonders belastenden Ereignissen in strukturierten Einzel- oder Gruppengesprächen wird gleichzeitig der Entwicklung möglicher Spätfolgen vorgebeugt. Betont werden muss aber, dass es sich bei keiner der Techniken um therapeutische Maßnahmen handelt. Im einzelnen umfasst das CISM - Modell folgende Maßnahmen:

1. Vorbeugende Unterrichts- und Trainingmaßnahmen

- je nach Zielgruppe unterschiedlich umfangreiche Module

2. Individuelle Krisenintervention

- psychologische Selbst- und Kameradenhilfe vor Ort oder unmittelbar nach Einsatzende für einzelne Traumatisierte durch entsprechend geschultes Personal

3. Critical Incident Stress Defusing

- strukturiertes Gruppengespräch mit kleinen Gruppen (ca. 5 - 8 Teilnehmer)
- Durchführung möglichst innerhalb von 12 bis 24 Stunden nach Ende des Einsatzes/Ereignisses
- Dauer ca. 30 - 60 Minuten

4. Critical Incident Stress Debriefing (CISD)

- strukturiertes Gruppengespräch mit in der Regel ca. 4 - 20 Teilnehmern
- Durchführung frühestens 72 Stunden und spätestens ca. 4 Wochen nach Ende des Einsatzes/Ereignisses
- Dauer ca. 3 Stunden

5. Demobilisierung/(Groß-)Gruppen-Information

- Großgruppen - Briefing unmittelbar nach Ende eines Einsatzes/Ereignisses zur Information über mögliche Reaktionen und Folgen sowie über Möglichkeiten/Angebote für weitere Unterstützung
- psychologisches Briefing eines erweiterten Personenkreises (z.B. ganzer Organisationen/Einheiten) vor der Durchführung von Critical Incident Stress Debriefings mit den potentiell Traumatisierten

6. Familien-/Organisations - Unterstützung

- Unterstützung, Beratung und Schulung der Familien von besonders gefährdeten Personengruppen oder Betroffenen
- Unterstützung, Beratung und Schulung von besonders gefährdeten Organisationen/Einheiten

7. Nachsorge/Überweisung (Follow-up)

- falls erforderlich weitere Kontakte bzw. Angebot, Vermittlung und Durchführung weiterführender Maßnahmen (z.B. Therapie)
- bei Fortbestehen deutlicher Symptome nach Durchführung einzelner oder mehrerer der o.g. Maßnahmen
- Durchführung durch Fachärzte und/oder klinische Psychologen

Gemeinsame Ziele aller CISM - Maßnahmen sind:

- **schnelle Reduktion der sich aufschaukelnden, heftigen affektiv-emotionalen Reaktionen**
- **allen Betroffenen das häufig empfundene Gefühl der „Einzigartigkeit“ ihrer Situation („uniqueness“) zu nehmen**
- **„Normalisierung“ der als außergewöhnlich („nicht normal“) empfundenen Erfahrung, Empfindungen und Reaktionen**
- **Herstellung des gleichen, möglichst vollständigen Informations- und Wissensstandes bei allen Beteiligten**
- **Reaktivierung durch das Ereignis beeinträchtigter kognitiver Funktionen und Prozesse**
- **Informationsvermittlung über Maßnahmen zur Stressbewältigung und über möglicherweise noch zu erwartende Reaktionen und Symptome**
- **Einschätzung der Notwendigkeit weiterer Unterstützung/Maßnahmen**
- **Herstellung persönlicher Kontakte zu geschultem Personal und der Bereitschaft zur Inanspruchnahme weiterer Unterstützung**
- **schnellstmögliche Wiederherstellung der Einsatz- und Funktionsfähigkeit (!)**

Seit Anfang 1996 wurden in der Bundeswehr CISM - Maßnahmen mit allen aus dem Einsatz zurückkehrenden UN – Beobachtern und nach fast allen Dienstunfällen mit Todesfolge (Flugunfälle, Schießunfälle usw.) im In- und Ausland erfolgreich durchgeführt. Auch die meisten der bei der ICE - Katastrophe von Eschede eingesetzten Soldaten wurden nach dem Einsatz durch mehrere Kriseninterventionsteams betreut. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass nach rechtzeitiger und fachgerechter Durchführung dieser Maßnahmen der Anteil derjenigen, die weiterer Nachsorge/Therapie bedürfen, deutlich niedriger (ca. 1-2 % aller Betroffenen) liegt, als vor deren Einführung (nach Berichten aus Streitkräften anderer Nationen erfahrungsgemäß ca. 8-15% aller Betroffenen).

16.8 Verwendete und weiterführende Literatur

- Braun, P. Belastungen fliegendes Personal. BMVg, Bonn, 1999
- Everly, G. S., Mitchell, J. T. Critical incident stress management – CISM. Chevron, Ellicott City, 1999
- Folkman, S., Lazarus, R. S. An analysis of coping in a middle-aged community sample. *J Health Soc Behav* 21, 219-239 1980
- Folkman, S., Lazarus, R. S. Coping as mediator of emotion. *J Pers Soc Psychol* 54, 466-475, 1988
- Folkman, S., Lazarus, R. S. If it changes it must be a process. *J Pers Soc Psychol* 48, 150-170, 1985
- Frieling, E., Sonntag, K. Lehrbuch der Arbeitspsychologie. 2. Aufl. Huber, Bern, 1999
- Gerathewohl, S., Leitfaden der militärischen Flugpsychologie. Verlag für Wehrwissenschaften, München, 1987
- Gerbert, K., Gutachterliche Stellungnahme zum Problem der Belastung. FIMedInstLw, Fürstenfeldbruck, 1979
- Gerbert, K., Einführung in die Flugpsychologie. FIMedInstLw, Heft 14, 1966
- Gerbert, K., Abriss der Flugpsychologie. In: Handbuch der Angewandten Psychologie, Verlag Moderne Industrie, Landsberg a. Lech, 1981
- Gerbert, K. und Kemmler, R.: The causes of causes - Determinants and background variables of human factor incidents and accidents. Vortrag beim 3. Symposium "Aviation Psychology", Ohio, 1985
- Hansen, H. D., Anforderungsgerechte Auswahl von fliegendem Personal. Dissertation, Wien, 1986
- Knobloch, M. Stressbewältigung unter psychomotorischer Belastung am Beispiel von Piloten. Heidelberg, 1999
- Meichenbaum, D. Intervention bei Stress. Huber, Bern, 1991
- Mitchell, J. T., Everly, G. S. Critical incident stress debriefing. 3. ed. Chevron, Ellicott City, 2001
- Mitchell, J. T. & Everly, G. S., Critical Incident Stress Debriefing. An Operations Manual for the Prevention of Traumatic Stress Among Emergency Services and Disaster Workers. Ellicott City, MD, USA: Chevron Publishing Corporation, 1997
- Monat, A., Lazarus, R. S. (eds) Stress and coping. 3. ed. Columbia Univ. Press, New York, 1991
- Rohmert, W. Arbeitswissenschaft, Teil 1. 16. Aufl. Inst., für Arbeitswiss., Darmstadt, 1986
- Rohmert, W., Rutenfranz, J. Arbeitswissenschaftliche Beurteilung der Belastung und Beanspruchung an unterschiedlichen Industriearbeitsplätzen. Bundesmin. für Arbeit und Sozialordnung, Bonn, 1975
- Rohmert, W. Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. *Z Arbeitswiss* 38, 193-200, 1984
- Schmidtke, H. (Hrsg.) Ergonomie. 3. Aufl. Hanser, München, 1993
- Schönpflug, W. Beanspruchung und Belastung bei der Arbeit. In: Graumann, C. F., Birbaumer, N. (Hrsg.) Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich D: Praxisgebiete, Ser 3: Wirtschafts-, Organisations- und Arbeitspsychologie, Bd. 1: Kleinbeck, U. (Hrsg.) Arbeitspsychologie. Hogrefe, Göttingen, 1987
- Seifert, R. Leistungsmessung und Arbeitsbelastung in Mensch-Maschine-Systemen. In: Handbuch der angewandten Psychologie, Bd 1: Neubauer, R., Rosenstiel, L. Arbeit und Organisation, Kap 6: Arbeitsgestaltung und Leistungsverhalten. Verlag Moderne Industrie, Landsberg am Lech, 1980
- Selye, H. Stress without distress, 4. print., Lippincott, Philadelphia, 1974

17 KURZER ABRISS DER FLUGPSYCHOLOGIE

17.1 Die Gegenstandsgebiete der Flugpsychologie, abgeleitet aus den Anforderungen der fliegerischen Tätigkeit

In den vorangegangenen Kapiteln wurden im Wesentlichen die mit dem Fliegen verbundenen Veränderungen der Umwelt und deren Einfluss auf die psychophysische Leistungsfähigkeit des Menschen behandelt. Neben diesen physikalischen Störfaktoren müssen die *mentalen Anforderungen* und die *emotionalen Belastungen*, die aus der *fliegerischen Aufgabe* erwachsen, einer gesonderten Betrachtung unterzogen werden.

Die fliegerische Tätigkeit ist ihrem Wesen nach vorwiegend eine nichtkörperliche Arbeit, ein Komplex aus sensorisch-perzeptiven, kognitiven, gedächtnisbasierten, psychomotorischen und motivationalen Vorgängen. Der Militärpilot und die Besatzungsmitglieder sind mit der Ausübung folgender Funktionen befasst:

- 3-Achsen-Fluglageregelung, d.h. Lenkung und Geschwindigkeitskontrolle des Luftfahrzeugs;
- Navigation und Einhaltung eines meist schon vor Antritt des Fluges in vielen Details festgelegten Flugablaufplans;
- Überwachung und Einstellung einer großen Anzahl von technischen Größen (Triebwerkswerte, Fahrwerks- und Flügelzustand, elektrische und hydraulische Energie, Display-Modes u.a.);
- Erfüllung der eigentlichen „Mission“ (Identifizierung und ggf. Bekämpfung von Luft- und Bodenzielen mit dem entsprechenden Computer-, Sensoren-, Waffen-, Kamera- und THREAT-Management; SAR-Einsätze, taktische Lufttransportaufgaben usw.);
- Interpersonale Kommunikation (Funksprechverkehr usw.)

Bei der Ausübung dieser vielfältigen Funktionen sind die Besatzungen einer Reihe schwieriger psychologischer Bedingungen ausgesetzt:

1. Die Unzahl von Informationen, die aus cockpit-internen und -externen Quellen zufließen, muss unter hohem Zeitdruck aufgenommen, unter dem Gesichtspunkt der aktuellen Relevanz „gefiltert“, mit Gedächtnisinhalten verglichen, ggf. gespeichert und - nach entsprechenden Beurteilungs- und Entscheidungsprozessen - in Einzelhandlungen oder eine Sequenz von Handlungen umgesetzt werden.
2. Typisch für die fliegerische Tätigkeit ist der Wechsel zwischen weitgehend determinierten Handlungsabläufen (PROCEDURES) und in bestimmten Flugsituationen plötzlich geforderten adaptiven, flexiblen Verhaltensweisen.
3. Die Besatzungen unterliegen (natürlich in Abhängigkeit von der eigenen Disposition und der Flugerfahrung) einem mehr oder weniger massiven Risikoerleben. Der Ausfall technischer Systeme oder menschliches Versagen „bedrohen“ den Flieger ständig. Nach einer statistischen Erhebung, die einen Zeitraum von 8 Jahren umfasst, kann man hochrechnen, dass im Verlauf seines Fliegerlebens jeder 2. Strahlflugzeugführer einen ernststen Luftnotfall erlebt, jeder 7. einen Flugunfall erleidet, jeder 16. einen Rettungsversuch mit dem Schleudersitz unternehmen muss, jeder 23. bei einem Flugunfall Verletzungen davonträgt und jeder 31. durch einen Flugunfall zu Tode kommt.
4. Der Verantwortungsdruck (im Sinne der Verantwortlichkeit für Menschenleben und hohe Sachwerte), der besonders auf dem Piloten lastet, ist außerordentlich groß.

Die beispiellosen psychologischen Anforderungen an die Piloten fliegender Waffensysteme gehen aus verschiedenen experimentellen Untersuchungen hervor. So wurde während einer Serie von siebenminütigen, vergleichsweise „einfachen“, Platzrundenflügen mit dem STARFIGHTER eine Handlungsfrequenz für den Piloten von durchschnittlich 28 Aktivitäten in der Minute festgestellt (sensomotorische und kognitive Operationen). Bei Luftkampfmanövern, Luft-Boden-Waffeneinsätzen, terrestrisch navigierten Flügen in geringer Flughöhe über dem Grund sowie bei Landungen auf einem Flugzeugträger wurden über 60 Aktionen und Reaktionen pro Minute errechnet. Die Komplizierung und Verdichtung der mentalen Arbeitsprozesse des Menschen im Cockpit wird verständlich, wenn man sich vergegenwärtigt, dass schon der Pilot eines konventionellen Kampfflugzeugs rund 80 Anzeigen und Bedienelemente laufend, periodisch oder sporadisch überwachen bzw. betätigen muss. Ein extremes Beispiel für die Informationsüberladung in supermodernen Jagdflugzeugen ist die F/A-18 „HORNET“. Im Cockpit dieser Maschine befinden sich drei Bildschirme, von denen jeder Informationen in 40 verschiedenen Darstellungskonfigurationen anbieten kann. Diese Konfigurationen greifen jeweils einen bestimmten Set von Zeichen aus einem Repertoire von insgesamt 177 Symbolen und 675 Akronymen (Sprachkürzel) heraus. Die Symbole können wiederum in vier unterschiedlichen Größen dargeboten werden. Außerdem geben die drei Bildschirme noch 73 Bedrohungs-, Vorsichts- und Mitteilungshinweise. 59 Anzeigelichter vervollständigen das visuelle Informationsangebot im HEAD-DOWN-Bereich der Flugzeugkanzel. Dazu kommen noch 6 akustische Warnzeichen sowie das HEAD-UP-DISPLAY (HUD), das 22 verschiedene Darstellungsarten hat. Auch der Zuwachs an Bedienelementen ist immens. Neben den vielen Schaltern für UHF/VHF, ILS, TACAN, ADF, IFF, Autopilot, Data Link und Beacon, die an allen möglichen Stellen im Cockpit angeordnet sind, befinden sich 16 Schalter und Knöpfe (davon 3 mit Mehrfachfunktionen) auf den Leistungshebeln und dem Steuerknüppel. Es bedarf keines allzu großen Vorstellungsvermögens, um zu erkennen, dass der Pilot eines derartigen Luftfahrzeuges schnell an die Grenzen seiner mentalen und motorischen Leistungskapazität gelangt. Er steht unter großer „informationeller Belastung“ bei grenznahen und gelegentlich grenzüberschreitenden Bewältigungszeiten. Selbst wenn er auf höchstem Aufmerksamkeitsniveau arbeitet, muss er nicht selten entstehende Informationsverluste durch nachträgliches Interpolieren ausgleichen. Wie sich bereits in aller Deutlichkeit zeigte, wird der Pilot eines Kampfflugzeuges auch keineswegs durch die Einführung automatischer Flugregelungssysteme entlastet. Im Gegenteil: die „**PILOT'S WORKLOAD**“ ist trotz (oder wegen) der fortschreitenden Automation drastisch angestiegen.

Die Komplexität der fliegerischen Aufgaben, die nervlich-emotionale Belastung und die diversen Einflüsse aus der Umwelt führen zu einer erheblichen Beanspruchung des Organismus, wobei der Grad der Beanspruchung aus der Stärke der Gesamtbelastung und der Beschaffenheit der individuellen psychophysischen Leistungsfähigkeit resultiert. Messreihen mit erfahrenen STARFIGHTER-Piloten, die während einer Tiefflugmission durchgeführt wurden, ergaben eine mittlere Herzfrequenz von 150 mit Spitzenwerten bis zu 170 Schlägen pro Minute. Der Puls normalisierte sich erst 30 bis 35 Minuten nach der Landung. Als dieselben Männer im REAR COCKPIT der TF-104 ohne Aufgabenbelastung und Verantwortungsdruck nur mitflogen, war ihre Pulsfrequenz um durchschnittlich 60 Schläge niedriger.

Weitere wissenschaftliche Untersuchungen belegen neben der Erhöhung der Herzrate während des Fliegens u.a. signifikante Anstiege des Blutdrucks, des Sauerstoffverbrauchs, der 17-Ketosteroide, der Katecholamine (Adrenalin, Noradrenalin), der Natriumausscheidung und der Fibrinolyseaktivität sowie Verminderungen der eosinophilen Leukozyten, der Kaliumausscheidung und der anorganischen Phosphate im Serum.

Die „Entgleisung“ dieser physiologischen Parameter hält lange an. Einige kehren erst nach drei bis vier Stunden in ihre Ausgangslage zurück, was besonders bei Luftkampfmanövern mit extrem hohen G-Belastungen und psychonervalen Anforderungen als Folgeerscheinung festzustellen ist. Bei diesen und ähnlichen Einsätzen sind auch im mentalen Bereich Stress- bzw. Ermüdungssymptome schon nach kurzer Zeit zu beobachten: Aufmerksamkeitsstörungen, perzeptuelle Veränderungen, Verlangsamung kognitiver und psychomotorischer Abläufe und Schwierigkeiten beim Abrufen kurzfristig gespeicherter Gedächtnisinhalte. Diese Fakten, die physiologischen wie die psychologischen, führen zu der berechtigten Frage, wie viele Einsätze den Besatzungen, speziell den Piloten einsitziger Kampfflugzeuge, zugemutet werden können und wie lang die Rekonstitutionszeiten zwischen zwei Flügen mindestens zu bemessen sind, ohne dass die Gefahr besteht, dass eine Restermüdung in die nächste Mission mit übernommen wird. Die Antwort steht leider noch aus. Aus dieser Skizzierung der Belastung und Beanspruchung beim Fliegen wird ersichtlich, dass - sieht man einmal von der Raumfahrt ab - in wohl keinem anderen Tätigkeitsbereich die Arbeitssicherheit so sehr von der Qualität des Zusammenwirkens von Mensch und Maschine abhängt. Beide Systemglieder müssen - eingebettet in möglichst optimale organisatorische und innerbetriebliche Rahmenbedingungen - störungsfrei interagieren, wenn fatale Flugzeugunfälle vermieden und die Einsatzfähigkeit im Hinblick auf den militärischen Auftrag gewährleistet werden sollen. Das setzt voraus, dass der fliegende Mensch an die Maschine (und die Umwelt) und umgekehrt die Maschine an den Menschen angepasst werden. Diese wechselseitige Anpassung hat naturgemäß humanwissenschaftliche (medizinische und psychologische) und ingenieurwissenschaftliche Komponenten. Sie kann nur auf der Grundlage einer genauen Analyse und Beschreibung der körperlichen und psychischen Belastungen, der mentalen Aufgabenstruktur und der durch alle diese Arbeitsparameter induzierten psychophysischen Beanspruchung erfolgen.

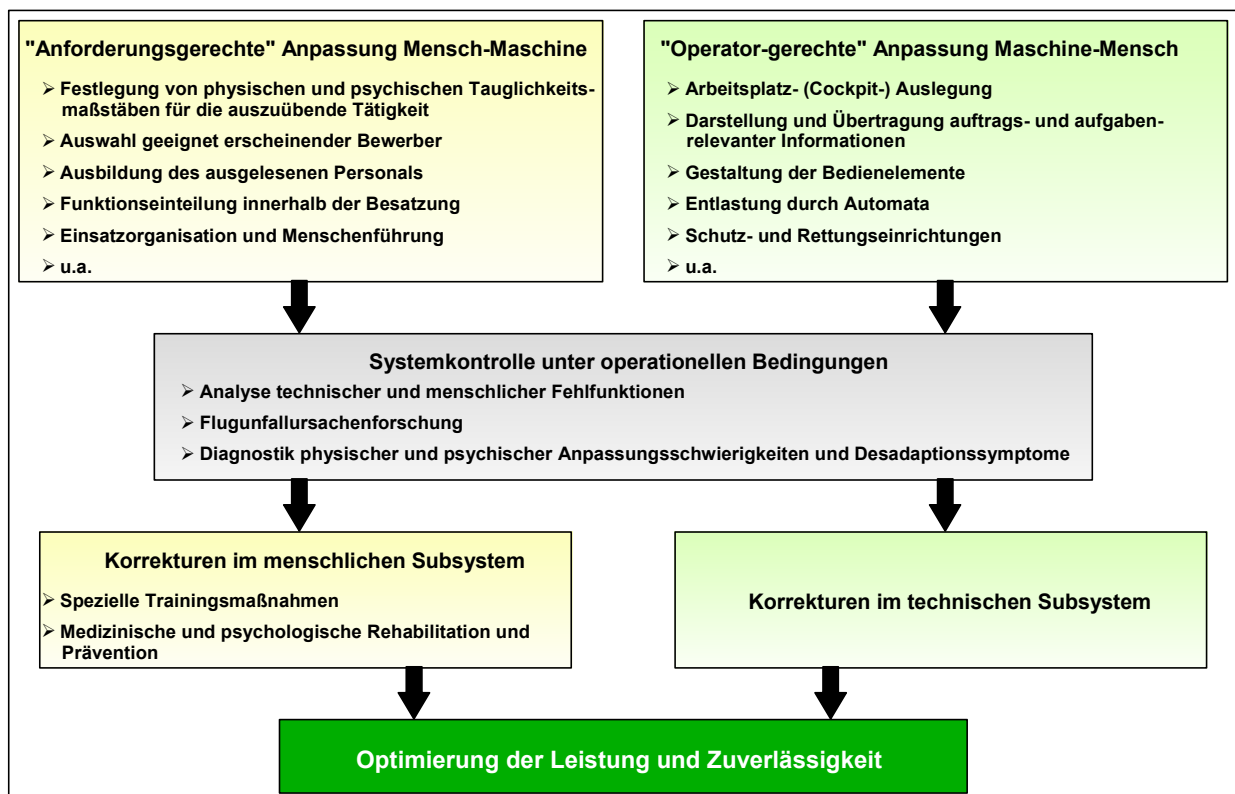


Abb. 17.1: Komponentenschema der Anpassungsregulierung in Mensch-Maschine-Systemen der Luftfahrt

Abb. 17.1 gibt eine vereinfachte Übersicht über die verschiedenen Anpassungskomponenten und bezeichnet gleichzeitig diejenigen Gegenstandsbereiche, auf denen Flugpsychologen tätig sind (gelb und grau gefärbte Kästchen). Im Rahmen dieses Beitrages können allerdings nur die Hauptaufgabengebiete der Flugpsychologie - Auswahl des fliegenden Personals, Klinische Flugpsychologie und Flugunfallursachenforschung (Faktor Mensch) - in jeweils kurzer Darstellung behandelt werden.

17.2 Die psychologische Auswahl des fliegenden Personals

Bereits im 1. Weltkrieg wurden psychologische Eignungsuntersuchungen von Fluganwärtern durchgeführt. Deutsche, britische, französische, italienische und amerikanische Psychologen entwickelten damals psychometrische Tests, von denen sie Aufschluss über das Vorhandensein von Fähigkeiten erhofften, die ihrer Meinung nach für die erfolgreiche Ausübung der fliegerischen Tätigkeit bedeutsam waren. Bewährungskontrollen ergaben jedoch, dass die Erfassung von Einzelfähigkeiten durch Intelligenz- und Reaktionstests nicht ausreicht, um die fliegerische Eignung als Funktionsgesamtheit feststellen zu können. Spätere testmethodische Ansätze - wie etwa das persönlichkeitspsychologisch orientierte Verfahren der Wehrmachtluftwaffe oder der wesentlich objektivere Qualifikationstest der USAF (sog. STANINE-Test) - brachten auch nicht die erwünschte Vorhersagegenauigkeit. Wissenschaftliche Untersuchungen und Erfahrungen während der beiden letzten Jahrzehnte haben in den Luftwaffen fast aller Staaten zu folgenden Erkenntnissen geführt:

- Die Zuverlässigkeit menschlichen Handelns und fliegerisches Leistungsvermögen können nicht allein durch körperliche Tauglichkeitsvoraussetzungen und/oder intensive Flugausbildung gewährleistet werden. Um die Versagerrate in der Ausbildung möglichst niedrig zu halten und die Flugsicherheit auf ein möglichst hohes Niveau bringen zu können, sind valide psychologische Testverfahren bei der Auswahl des fliegenden Personals unabdingbar.
- Die technologische Entwicklung in der Luftfahrt, die eine deutliche Akzentuierung der psychisch-mentalenen Anforderungen mit sich brachte, machen verstärkte Forschungsbemühungen auf dem Gebiet der flugpsychologischen Eignungsdiagnostik notwendig.
- Die Auswahlstrategien und Auswahlkriterien müssen den sich ständig ändernden fliegerischen Anforderungen rasch angepasst werden.

Die eignungsdiagnostischen Methoden der Flugpsychologie müssen „komplex“ sein. Sie sollten die fliegerische Anforderungsrealität, zumindest in bezug auf die grobe Aufgabenstruktur der Tests, weitestgehend simulieren, mentale Grenzbelastungen beinhalten und dem Psychologen gleichzeitig die Möglichkeit eröffnen, diejenigen Persönlichkeitseigenschaften, welche die Leistung moderieren oder bestimmen (emotionale Belastbarkeit, Selbstvertrauen, Motivation u.a.), beim Probanden zu erkennen.

Das Verfahren zur Eignungsfeststellung von Bewerbern für den Fliegerischen Dienst wurde auf Weisung des Bundesministeriums der Verteidigung zum **01. Juli 1998** neu geregelt. Zielsetzung der Neuregelung ist es, die geeigneten Kandidaten aus der Bewerbergruppe für den fliegerischen Dienst bei sinkenden Bewerbungseingängen möglichst frühzeitig und kostensparend auszuwählen. Die Attraktivität einer Bewerbung für den fliegerischen Dienst wurde dadurch erhöht, dass das Verfahren der Eignungsfeststellung noch vor Einstellung in die Bundeswehr abgeschlossen wird. Die fliegerische Eignungsfeststellung (Screening) bei der 3. DtLwAusbStff USA (Goodyear), die bislang für die abschließende Eignungsentscheidung nach Einstellung in die Bundeswehr zuständig war, lief im Herbst 2000 aus. Stattdessen wird in Goodyear eine verwendungsbezogene fliegerische Vorausbildung durchgeführt.

Maßgeblich für diese Umstellung war die Absicht, die jungen Soldaten, die bereits eine umfangreiche Auswahl sowie Ausbildungsabschnitte (Grundausbildung, Offizier-, Unteroffizierausbildung, Sprachschule) bei der Bundeswehr durchlaufen haben, nicht weiteren Auswahlprozeduren zu unterziehen, sondern sie in der fliegerischen Vorausbildung intensiv auf die nachfolgende fliegerische Grund- und Fortgeschrittenenausbildung vorzubereiten.

Der Ablauf der neuen Eignungsfeststellung ist in der Abbildung 17.2 dargestellt.

Die **Phase I** der Eignungsfeststellung findet bei der Offizierbewerberprüfzentrale (OPZ) in Köln bzw. bei den Zentren für Nachwuchsgewinnung (ZNwG) statt. Sie führt zur Feststellung der allgemeinen (soldatischen) Eignung und der Studierfähigkeit (nur OPZ). Teil der Phase I ist die „Fliegerpsychologische Klassifikation“, die zu einer Einteilung der Bewerber in drei Eignungsgruppen führt. Für die nachfolgenden Phasen der Eignungsfeststellung ist das Flugmedizinischen Institut der Luftwaffe zuständig.

Die **Phase II** besteht aus der flugpsychologischen und flugmedizinischen Erstuntersuchung. Ihr Zweck ist die Feststellung der intellektuellen, charakterlichen und praktisch-fliegerischen Grundanlagen sowie der medizinischen Tauglichkeit. Im flugpsychologischen Teil werden neben konventionellen CAT – Verfahren (**C**omputer-**A**ssistiertes-**T**esten) realitätsnahe simulationsgestützte Testverfahren auf dem System ICA 90 (**I**nstruments-**C**oordination-**A**nalyser 90) durchgeführt. In zwei Gruppensituationsverfahren müssen die Bewerber ihre Teambefähigung und ihr Organisationsvermögen unter Beweis stellen. Den Abschluss bildet ein ausführliches Interview. Im Anschluss an die erfolgreiche flugpsychologische Erstuntersuchung durchlaufen die Bewerber die flugmedizinische Erstuntersuchung. Nach festgestellter Tauglichkeit erfolgt die Einplanung für die Phase III der Eignungsfeststellung.

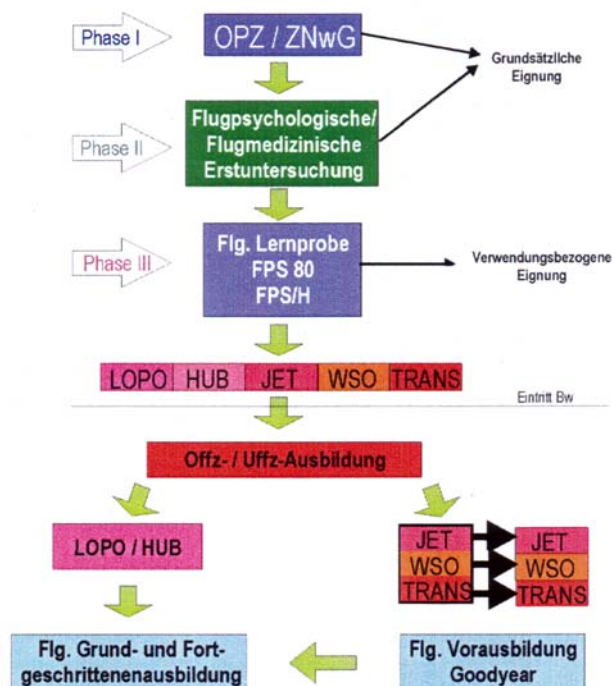


Abb. 17.2: Ablauf der Eignungsfeststellung

Die **Phase III** hat den Zweck festzustellen, ob die Bewerber ihre in den vorausgegangenen Auswahlphasen gezeigten praktisch-fliegerischen Anlagen, Fähigkeiten und Fertigkeiten in einer realitätsnahen Lernprobe erfolgreich umsetzen können. Sie findet für die vorgesehenen Verwendungen Strahlflugzeugführer (JET), Transportflugzeugführer (TRA) und Waffensystemoffizier (WSO) auf dem System FPS 80 (Fliegerpsychologisches Selektionssystem 80)

bei der Fachgruppe Eignungsfeststellung der Abteilung VI/FIMedInstLw in Fürstenfeldbruck und für die Verwendungen Hubschrauberführer (HUB) und Luftfahrzeugoperationsoffizier (LOPO) bei der in Bückeburg stationierten Fachgruppe Fliegerpsychologie/Heeresflieger auf dem System FPS/H (Fliegerpsychologisches System Hubschrauber) statt. Die Phase III besteht aus einem theoretischen Teil (Fliegertheorie mit Leistungsüberprüfung) und praktischen Flugübungen auf FPS 80 bzw. FPS/H. Im Rahmen einer abschließenden Auswahlkonferenz wird die grundsätzliche Eignung für den Fliegerischen Dienst festgestellt und eine Verwendungsempfehlung (JET, WSO, TRA, HUB, LOPO) abgegeben. Die Einstellung der Bewerber in die Bundeswehr erfolgt nach ihrer Eignung, ihrer medizinischen Tauglichkeit und dem Personalbedarf der Teilstreitkräfte. Das seit 1998 laufende Eignungsfeststellungsverfahren hat sich vom Ablauf und von den Inhalten her bewährt. Es findet Anklang bei den Bewerbern. Ob die richtigen Eignungsentscheidungen gefällt wurden, wird sich allerdings erst herausstellen, wenn eine genügend große Zahl junger Frauen und Männer die fliegerische Ausbildung durchlaufen hat. Zum Erfolg in der Ausbildung trägt zusätzlich zum Können und zur Lern- und Leistungsbereitschaft der Flugschüler künftig auch ganz wesentlich die Qualität der fliegerischen Vorausbildung in Goodyear und der Vorbereitung bei der 9. Inspektion der OSLw bei.

Die psychologischen Eignungsvoraussetzungen, die ein Flugschüleraspirant mitbringen muss, werden von den Flugpsychologen durch Anwendung verschiedener wissenschaftlicher Methoden ermittelt. Aus Arbeitsplatz- und Tätigkeitsanalysen, aus der Langzeitverfolgung repräsentativer Flugschüler- bzw. Fliegergruppen, aus der Untersuchung fliegerischer Versagensgründe sowie aus der vergleichenden Gegenüberstellung hoch- und minderqualifizierter Flieger gewinnen die Flugpsychologen ihre Informationen über die berufswichtigen Eignungsmerkmale. Die Einzelgewichtung dieser Merkmale ist nicht für alle fliegerischen Tätigkeiten gleich. So haben Strahlflugfahrzeugführer ein anderes „Eignungsprofil“ als Transportflugfahrzeugführer oder Hubschrauberführer, Waffensystemoffiziere ein anderes als Bordnavigationsoffiziere. In der folgenden Tabelle (Abb. 17.3) werden die Eignungsmerkmale aufgeführt, die in der Eignungsfeststellung für den Fliegerischen Dienst mittels verschiedener Untersuchungsverfahren bewertet werden sollen.

Eignungsmerkmale	
<i>A. Kognitive Merkmale</i>	<i>B. Persönlichkeitsmerkmale</i>
Konzentration	Kooperationsbereitschaft
Allgemeine Intelligenz	Selbstbehauptung
Rechenfertigkeit	Flexibilität/Anpassung
Merkfähigkeit	Planungs- u. Organisationsvermögen
Technisches Verständnis	Entscheidungsverhalten
Räumliches Vorstellungsvermögen	Belastbarkeit
Aufmerksamkeitsverteilung	Leistungsbereitschaft
Um- und Übersicht	Fliegerische Motivation
Befähigung zur Mehrfacharbeit	Soziale Integrationsfähigkeit
Automatisierungsschnelligkeit	Führungsbefähigung
Übungsfortschritt	
Psychomotorische Koordinationsfähigkeit	
Handlungsentschiedenheit	

Abb. 17.3: Eignungsmerkmale in der Eignungsfeststellung

Einschlägige Studien im FIMedInstLw haben ergeben, dass die menschliche Flugtüchtigkeit -lässt man die körperliche Tauglichkeit und die aktuelle körperliche Fitness als wichtige Voraussetzungen außer acht- durch folgende Grundfaktoren konstituiert wird:

- Fähigkeit, das Bewußtsein gegen Aufgaben-irrelevante äußere und innere Reize abzuschirmen und die **Aufmerksamkeit** über längere Zeit hinweg auf konstant hohem Niveau zu halten.
- Befähigung zur **Mehrfacharbeit**, bei der die Aufmerksamkeit gleichzeitig auf mehrere Vorgänge verteilt ist und „automatisierte“ Handlungsprozesse simultan mit „höheren“ geistigen Operationen ablaufen, ohne dass in jedem Fall ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen beiden Handlungsebenen bestehen muss.
- Anforderungsgerechte Ausprägung von Fähigkeiten und Fertigkeiten in den Bereichen der perzeptiven und kognitiven **Informationsverarbeitung** sowie der **psychomotorischen Koordination** und **Präzision**.
- Vermögen, **Stress** jedweder Art ohne bemerkenswerte emotionale Symptomatologie und ohne gravierende Leistungseinbußen zu **tolerieren**.
- Gutes **Kurz-** und **Langzeitgedächtnis**. Fähigkeit, auf unerwartete Änderungen der Situation durch prompte **Beurteilung** und **Entscheidung** sowie **Antizipation** des zu Tuenden reagieren zu können.
- **Risikoverhalten**, das durch angemessene Realisierung der Gefahren und Flugdisziplin gesteuert wird, ohne dass eine allzu defensive, vorsichtige Einstellung die notwendige „Aggressiveness“ (Handlungsentschiedenheit) verdrängt.
- Hohe **Leistungs-** und **Flugmotivation**, die verbunden ist mit starkem **Vertrauen in die eigene Leistungsfähigkeit** und „positivem Denken“.

Die mit der Auswahl des fliegenden Personals befassten Flugpsychologen, Offiziere und Flugsimulatorlehrer sollten die unterschiedlichen fliegerischen Anforderungen natürlich gut kennen und in der Lage sein, die beim Flugschüler zu beobachtenden Leistungen und Verhaltensweisen auf diese Anforderungen zu beziehen. Vor allem müssen sie die Lernfähigkeit und die psychische Belastbarkeit zuverlässig beurteilen können. Die Zuverlässigkeit dieser Beurteilung hängt nicht zuletzt davon ab, ob die Auswahlmaßstäbe, d.h. die bei Tests und Checks geforderten Mindestleistungen, immer wieder auch durch korrelationsstatistische Untersuchungen überprüft werden. Die prognostische Güte des deutschen Auswahlverfahrens (gemessen an Leistungskriterien der fliegerischen Ausbildung) kann derzeit noch nicht bewertet werden. Es ist aber zu vermuten, dass sich die Kombination aus Eignungsfeststellung und intensiver theoretischer bzw. fliegerischer Vorbereitung günstig auf das Abschneiden in der fliegerischen Grund- und Fortgeschrittenenausbildung auswirkt. Dazu liegen Erfahrungen anderer NATO-Staaten vor, die ihre Flugschüler im gemeinsamen EURO-NATO Joint Jet Pilot Training ausbilden.

Das **Ausleseverhältnis** (Prozentverhältnis der Ausgelesenen zu den als „ungeeignet“ oder „untauglich“ Zurückgewiesenen) liegt gegenwärtig bei etwa 20 : 80, sämtliche Auswahlstationen, einschließlich ärztliche Untersuchung auf WFV, zusammengenommen.

Die **Ablösequoten** in der fliegerischen Ausbildung halten sich seit 1996 unter 10% - wenn man von gelegentlichen, meist kurzzeitigen Erhöhungen absieht, die durch zunächst nicht kontrollierbare Einflussfaktoren entstehen (z.B. Veränderung der Ausbildungsbedingungen). Die **Gründe für fliegerisches Versagen** in der Grund- und Fortgeschrittenenausbildung liegen vorwiegend in mäßiger emotionaler Belastbarkeit, geringem Selbstvertrauen und mangelnder Autonomie im Entscheiden und Handeln. Einige wenige Flugschüler werden

auch wegen ungenügender Anstrengungsbereitschaft oder Mangel an Disziplin abgelöst. Es sind also kaum begabungs- oder bildungsbedingte Leistungsbehinderungen, sondern meist persönlichkeitspezifische Verhaltenseigenschaften, die ein Scheitern in der Flugausbildung determinieren. Abschließend lässt sich sagen, dass die Flugpsychologie in bezug auf die Prognose des Ausbildungserfolgs des fliegenden Personals schon in der Vergangenheit auf beachtliche Ergebnisse verweisen kann. Ohne sie und die fliegerische Eignungsfeststellung lägen die Versagerraten um 30 bis 35 % höher. Die Ausbildungsfehlinvestitionen würden pro Jahr um zweistellige Millionenbeträge anwachsen.

17.3 Klinische Flugpsychologie

Langjährige Erfahrungen lehren, dass die am Eingang der fliegerischen Laufbahn festgestellte Eignung zum Fliegen keine konstante Größe ist. Die psychisch-mentale Fitness kann vorübergehend, für längere Zeit oder auf Dauer soweit absinken, dass die Anforderungen der fliegerischen Tätigkeit nicht mehr bewältigt werden. Pro Jahr fallen 60 bis 80 Flugzeugführer und Besatzungsmitglieder auf, die aufgrund traumatischer Ereignisse (z.B. Unfall), chronischer Überlastung, akuter psychosozialer Konflikte („Life Stress“) oder aus anderen Gründen psychische bzw. psychovegetative Störungen ausbilden, die im Hinblick auf die Wehrfliegerverwendungsfähigkeit beurteilt und ggf. behandelt werden müssen.

Bei diesen Fliegern ist zunächst immer von einer erhöhten Unfallgefährdung auszugehen. Die „Klinische Flugpsychologie“ kann hier differentialdiagnostisch wertvolle Hilfestellung geben. In zweieinhalb Jahrzehnten guter Zusammenarbeit zwischen Ärzten und Psychologen im Flugmedizinischen Institut hat sich gezeigt, dass die standardisierten, quantifizierenden Untersuchungsverfahren, die von den klinischen Psychologen bevorzugt werden, die in der Psychiatrie gebräuchlichen diagnostischen Methoden gut ergänzen können. Klinisch-psychologische Befunde, die aus Leistungstests, Persönlichkeitstests, biografischer Anamnese, Exploration sowie aus der Analyse des fliegerischen Werdegangs gewonnen werden, ermöglichen ein abgerundetes Bild über die momentane psychomentale Fitness, die Flugmotivation und die Ätiologie der Störungen und Beschwerden. Auch die nosologische Einstufung der psychopathologischen bzw. psychosomatischen Symptome kann durch sie erleichtert werden.

Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit ist in diesen Fällen selbstverständlich. Sie schließt die **Kommunikation mit dem Fliegerarzt** genauso ein wie den Informationsaustausch mit der fliegerischen Seite (z.B. mit Flugsicherheitsoffizieren und Überprüfungsberechtigten). Die Schweigepflicht- und Datenschutzbestimmungen sind hierbei natürlich zu beachten. Im Gegensatz zur fliegerpsychologischen Eignungsuntersuchung am Anfang der fliegerischen Laufbahn ist eine klinisch-psychologische bzw. **flugpsychologische Untersuchung** Teil der ärztlichen **Untersuchung auf Wehrfliegerverwendungsfähigkeit**. Sie wird vom Fliegerarzt oder von der Abteilung I des Instituts in nachstehenden Fällen veranlasst (siehe auch die ZDv 46/6, Ziffer 122):

1. Nach Unfällen und Zwischenfällen mit Luftfahrzeugen, wenn psychophysiologische Faktoren als Ursache vermutet werden oder wenn Zweifel bestehen, ob der Betroffene das Ereignis angemessen verarbeitet hat;
2. bei erheblichen fliegerischen Leistungsminderungen (z.B. alterungsbedingten Leistungseinbußen);
3. bei Flugängsten und Verlust der Flugmotivation;

4. bei anhaltendem Auftreten von Luftkrankheitssymptomen, bei psychosomatischen Störungen, Psychoneurosen, Zustandsbildern des „Abgeflogenseins“, Verhaltensauffälligkeiten, besonderen sozialen (dienstlichen und außerdienstlichen) Konfliktsituationen;
5. bei Verdacht auf Alkohol- und/oder Drogenmissbrauch;
6. nach Schädel-Hirnverletzungen und anderen cerebralen Affektionen (Nr. 335);
7. bei fraglicher Eignung zur Führung und Bedienung von bestimmten Luftfahrzeugen;
8. für Luftfahrzeugführer, die aus psychologischen oder fliegerischen Gründen von der Flugausbildung abgelöst werden und weiter- bzw. umgeschult werden sollen;
9. vor Wechsel eines ausgebildeten Luftfahrzeugführers auf ein ein- oder zweisitziges strahlgetriebenes Luftfahrzeug, wenn er bisher auf Propellerflugzeugen oder Hubschraubern eingesetzt war.

In denjenigen Fällen, in denen ein ärztliches Endurteil den künftigen WFV-Status bestimmt (praktisch alle genannten Fallkategorien außer Ziffer 8) geben die Psychologen nach Abschluss ihrer Untersuchung ein Fachurteil ab, das in die Entscheidungsfindung eingeht.

Seit 1962, also in einem Zeitraum von fast 40 Jahren, wurden rund 3500 flugpsychologische Untersuchungen durchgeführt. Bei den rein klinisch-psychologischen Fragestellungen (60 % aller Fälle) dominieren mit nahezu gleichen Anteilen die Untersuchungsanlässe „Flugunfall/Luftzwischenfall“, „Flugangst/Motivationsverlust“, „Psychovegetative Syndrome“ (speziell die sog. Erschöpfungsdepression, in Fliegerkreisen auch „Abgeflogensein“ genannt) sowie „Auffälligkeiten im fliegerischen Leistungsverhalten“. Aufgrund des psychologischen Fachurteils verloren 16 % der Untersuchten die Wehrfliegerverwendungsfähigkeit.

Art und Genese von Leistungsdefiziten, Anpassungsstörungen und psychosomatischen Erkrankungen bestimmen die Möglichkeiten einer psychotherapeutischen Behandlung mit dem Ziel der fliegerischen Rehabilitation. Da die Erneuerung von Fluglizenzen nach längeren Flugpausen zeit- und kostenaufwendig ist, verbieten sich diese psychotherapeutischen Bemühungen jedoch dann von selbst, wenn die Intervention einschließlich des fliegerischen Wiederauffrischungstrainings einen Zeitraum von 3 Monaten überschreiten würde. Eine weitere Schwierigkeit bei der Rehabilitation verhaltensgestörter oder psychosomatisch erkrankter Flieger liegt darin, dass externe Therapeuten nicht über die erforderliche Milieukennntnis verfügen und/oder aus Sicherheitsgründen nicht konsultiert werden können. Die Flugpsychologen des FIMedInstLw begannen daher im Jahr 1973, bei bestimmter Indikation im eigenen Haus zu therapieren. Nach ihrer Auffassung ist die Durchführung einer Psychotherapie allerdings nur dann gerechtfertigt,

- wenn die fliegerischen Leistungen des Patienten vor Beginn der Störung über dem Durchschnitt lagen, also von einem großen Fundus von Fähigkeiten und Fertigkeiten auszugehen ist,
- wenn die Flugmotivation ungebrochen zu sein scheint,
- wenn die notwendige Einsichtsfähigkeit auf Seiten des Patienten vorhanden und der Wille zur Mitarbeit bei der Bewältigung von Problemen stark ausgeprägt ist,
- wenn eine Störung vorliegt, die in dem zur Verfügung stehenden Zeitraum durch sprach- und verhaltenstherapeutische Maßnahmen beherrschbar zu sein verspricht.

Im Zeitraum von 1973 bis 1979 wurden von der Abteilung VI 24 Piloten mit Flugphobien oder generalisierter Flugangst („Fear of Flying“) behandelt. In 15 Fällen konnte völlige Symptomfreiheit erzielt werden, 13 Piloten nahmen ihre frühere Tätigkeit wieder auf (ohne rückfällig zu werden), und nur ein einziger Flugzeugführer erlitt im Anschluss an ein neues Trauma (Luft-

notlage) einen Rückfall. Die Rehabilitierten wurden längere Zeit strengen fliegerischen Kontrollen unterworfen. Sie gaben keinen Anlass, bei ihnen eine höhere Unfalldisposition zu vermuten als bei anderen Piloten. Sechs weitere Therapiefälle legen allerdings die Annahme nahe, dass Alkoholismus, chronifizierte psychosomatische Erkrankungen und Neurosen mit starker konstitutiver Komponente weniger gut zu behandeln sind als „Fear of Flying“. Sehr gute Erfahrungen wurden dagegen mit der Durchführung psychologischer Trainingsmaßnahmen bei Luftkranken gemacht.

17.4 Flugpsychologie und Flugsicherheit

Über Maßnahmen eignungspsychologischer und klinisch-psychologischer Art, die die Qualität der fliegenden Besatzungen und damit die menschliche „Zuverlässigkeit“ im Regelkreis Mensch-Maschine verbessern helfen, ist zuvor gesprochen worden. Unbestritten ist, dass eine sorgfältige Personalauslese, eine strenge fliegerische und medizinisch-psychologische Überwachung sowie eine intensive, lernzielorientierte Ausbildung in enger Beziehung zu einer geringen Unfallrate stehen.

Ein in dieser Hinsicht trauriges Beispiel ist die Flugunfallhäufigkeit in der Allgemeinen Luftfahrt (Sportfliegerei), wo ja keine Auslese im eigentlichen Sinne stattfindet, die Ausbildung nicht standardisiert ist und die vom Privatpiloten geforderten Mindestflugzeiten allen Erkenntnissen der lernpsychologischen Forschung Hohn sprechen. Dennoch: Flugsicherheit ist nicht nur abhängig davon, dass „geeignete“, „taugliche“ Fluganwärter ausgelesen und die anderen, deren Unfallaffinität als vergleichsweise hoch einzuschätzen ist, von der Ausbildung ferngehalten werden. Einschlägige Studien und Erfahrungen belegen, dass Flieger - auch wenn sie psychologisch und medizinisch als geeignet und tauglich für die Fliegerei befunden wurden, einen langen, steinigen Weg der Ausbildung hinter sich gebracht und reichlich Flugerfahrung im Verband gesammelt haben - keineswegs immer die Verhaltensweisen zeigen, die Flugunfälle vermeidbar machen. So ist den zahlreichen Flugunfallstatistiken, die in den letzten Jahrzehnten von militärischen Stellen und zivilen Behörden veröffentlicht wurden, ein bemerkenswerter Trend zu entnehmen: Unabhängig davon, ob die absoluten Unfallzahlen steigen oder sinken, nimmt der prozentuale Anteil des Human Factor, des „menschlichen Versagens“, an der Entstehung der Flugunfälle und Zwischenfälle ständig zu. Während er in den sechziger Jahren noch mit 50 bis 70 % veranschlagt wurde, ist der Faktor Mensch gegenwärtig bei 80 bis 90 % der Fälle die Hauptursache. Zur Erklärung dieser Entwicklung bieten sich zwei Thesen an:

1. These:

Die Zuverlässigkeit der Maschine und ihrer Subsysteme ist größer geworden.

2. These:

Die Zuverlässigkeit des Menschen im Flugzeug ist eher geringer geworden.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die erste These uneingeschränkt zutrifft, während die zweite These einer differenzierteren Betrachtung bedarf. Der relative Anstieg der Human Factor-Unfälle in der Fliegerei ist zum einen darauf zurückzuführen, dass der Mensch als Ingenieur und Flugbetriebsorganisator die Funktionssicherheit der technischen Systemkomponenten Schritt für Schritt verbessern konnte. Daraus resultiert zwangsläufig, dass der prozentuale Anteil der Ursache Human Factor größer wird. Andererseits kann der Operateur im Flugzeug sein Aktions- und Reaktionsverhalten immer weniger von Handlungsfehlern freihalten. Der wachsende Aufgabenumfang bei der Durchführung militärischer Einsätze, das veränderte Einsatzspektrum und die, zum Teil bedingt durch technische Innovati-

onen, schon mehrmals erwähnte Informationsüberladung tragen nicht dazu bei, Handlungsfehler zu reduzieren. Unglücklicherweise neigt der Mensch auch dazu, risikofreudiger zu handeln bzw. weniger wach zu sein, wenn die Maschine einen hohen Zuverlässigkeitsgrad erreicht zu haben scheint. Alle Schwachstellen im Mensch-Maschine-System zu erkennen, die fehlerbegünstigenden Rand- und Hintergrundbedingungen freizulegen und entsprechende Unfallverhütungskonzepte (unter Einbezug der „menschlichen“ Komponenten auf höheren Verantwortungsebenen) zu erarbeiten, muss das ernste Anliegen einer engen interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen den fliegenden Verbänden, den Flugsicherheitsdienststellen, Experten des Flugmedizinischen Instituts (Pathologen, Ergonomen, Physiologen, Psychologen) und Ingenieuren sein. Jede dieser Gruppen kann Anregungen für Ansatzpunkte in ihrem Bereich aus der Abbildung 17.4 entnehmen. Die dort gezeigte Übersicht entstammt einer groß angelegten, durch den GenFluSiBw in Auftrag gegebenen und unter der wissenschaftlichen Leitung von GERBERT (1982) durchgeführten Studie („DER FAKTOR MENSCH und seine Beziehungen zur Umwelt- und anderen Randbedingungen - Studie über kritische Flugsituationen und Beinaheunfälle“).

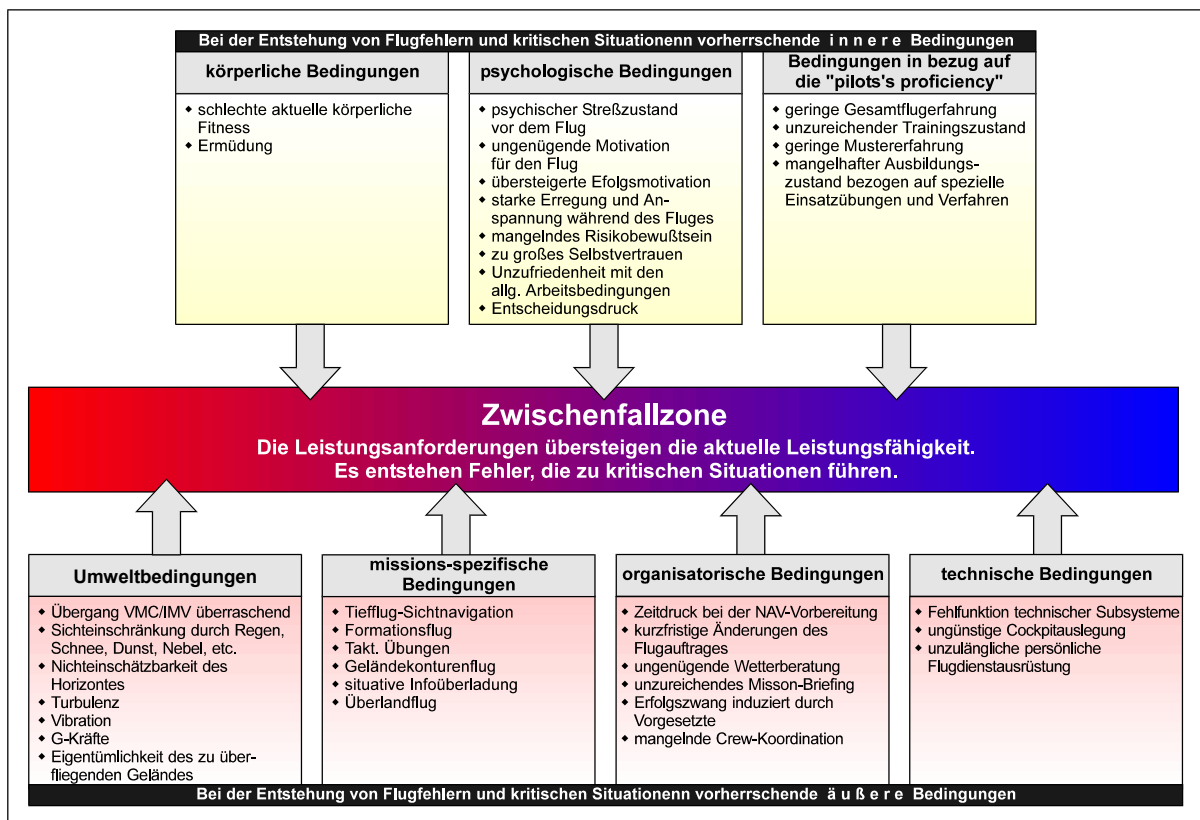


Abb. 17.4: Unfallbegünstigende Faktoren

Sie veranschaulicht in instruktiver Weise, dass Einschränkungen der aktuellen körperlichen oder psychischen Fitness sowie des fliegerischen Erfahrungs- und Trainingsstandes die Leistungsfähigkeit mindern, gleichzeitig aber bestimmte missionspezifische, organisatorische, technische und Umweltbedingungen den Anforderungs- und Belastungs-Level erhöhen können. Das augenblicklich verfügbare Leistungsvermögen reicht dann unter Umständen nicht mehr aus, um die Anforderungen abzudecken. So entsteht eine „Zone“ erhöhter Unfallgefährdung. Wird die kritische Situation von der Besatzung nicht erkannt und durch geeignete Maßnahmen bereinigt, kann sich aus dem Zwischenfall ein Unfall entwickeln.

Eines der erstaunlichen Ergebnisse der Studie war, dass in nahezu 50 % der Fälle nur durch „pures Glück“ fatale Folgen ausblieben. Als häufigste, gefährlichste und das „Hineinrutschen“ in die kritische Situation am meisten begünstigende Kombination von inneren und äußeren Bedingungen hat sich folgende Konstellation herausgestellt:

- **Informationsdefizit**, das durch mangelhafte Flugvorbereitung (Zeitdruck!) oder geringen Trainings- und Kenntnisstand des Piloten quasi mit ins Flugzeug genommen wird;
- **Reduktion der Sicht** durch Regen, Schnee, Dunst, Nebel oder Nichteinschätzbarkeit des Horizontes während des Flugs bzw. überraschender Übergang von Sichtflug- in Instrumentenflug-Bedingungen;
- **hoher Erregungsgrad** des Piloten, verbunden mit Störungen der Aufmerksamkeit, speziell mit deren Fokussierung (Einengung);
- **übersteigerte Erfolgsmotivation** bei ansonsten nicht sonderlich starkem Zutrauen in die eigene Leistungsfähigkeit.

Solche und ähnliche Konfigurationen müssen als eigentliche Unfallursachen angesehen werden und nicht die vordergründigen Handlungsfehler.

Dennoch wurden in der besagten Studie auch die Handlungsfehler einer eingehenden Betrachtung unterzogen. Es stellte sich die Frage nach der Häufigkeit der einzelnen Flugfehler sowie die Frage, ob die Flugfehler ihrer Art nach zu klassifizieren sind. Von 61 möglichen Fehlern konnte als die zehn häufigsten identifiziert werden:

- Aktionen/Reaktionen verspätet;
- falsche Beurteilung des unterwegs angetroffenen Wetters;
- falsches Einschätzen von Entfernungen;
- Fehleinschätzen der Flughöhe über Grund;
- Nichteinhalten der vorgeschriebenen Flughöhe;
- Einflug in IMC unter VFR;
- Verlust der räumlichen Orientierung;
- mangelnder Cross-Check;
- Nichterkennen von Hindernissen;
- Nichteinhalten einer der Situation angemessenen Lage des Luftfahrzeugs im Raum.

Bei einer Faktorenanalyse aller Flugfehler (Faktorenanalyse = statistische Methode, mit der versucht wird, Grunddimensionen von Merkmalen festzustellen) schälten sich vier Faktoren heraus (Abb. 17.5):

Interessant und in der Abb. 17.5 bereits angesprochen ist die Tatsache, dass die Aufmerksamkeitsfehler und die sensomotorischen (Bedien-)Fehler hauptsächlich mit „inneren“, in der Persönlichkeit des Fliegers liegenden Hintergrundbedingungen assoziiert sind. Die Wahrnehmungsfehler hängen zumeist mit ungünstigen Umweltbedingungen (Sichteinschränkung, G-Kräfte, Vibration, Reizmaskierung u.a.) zusammen. Prozedurale, Planungs- und Entscheidungsfehler wiederum können entweder an innere Bedingungen gekoppelt sein (unzureichender Trainings- und Erfahrungsstand, Situations-Stress etc.) oder mit geringen Zeitbudgets bei der Flugvorbereitung und Flugdurchführung in kausaler Beziehung stehen.

Faktor I	<i>Fehler in der Informationsaufnahme</i>	Aufmerksamkeitsfehler Def.: Fehlende oder mangelhafte Aufnahme objektiv vorhandener Informationen, die für die Bewältigung der Aufgabe notwendig sind. Bevorzugt hervorgerufen durch intra-personale Bedingungen wie Unaufmerksamkeit, kanalisierte Aufmerksamkeit (Fixierung) oder Ablenkung Hauptsächliche Fehler, die diesen Faktor markieren (sog. Markiervariable): Nichteinhalten der Fluglage/Fluggeschwindigkeit/Flughöhe; mangelhafter Cross-Check; ungenügende Boden- und Luftraumbeobachtung; Nichteinhalten der Betriebsgrenzen des Lfz
Faktor II	<i>Fehler in der Informationsaufnahme</i>	Wahrnehmungsfehler Def.: Falsche Nutzung objektiv vorhandener, aber oft unvollständiger oder mehrdeutiger Informationen. Bevorzugt hervorgerufen durch widersprüchliche oder schwellennahe äußere Wahrnehmungsbedingungen oder solche äußeren Reizkonstellationen, die regelhaft zu „Sinnestäuschungen“ und Fehlinterpretationen führen. Hauptsächliche Markiervariable: Plötzlicher Einflug in IMC unter VFR; Fehleinschätzung von Flughöhe/Fluglage/Fluggeschwindigkeit/Entfernungen; räumliche Desorientierung; Nichterkennen von Hindernissen; zu spätes Abfangen bei der Landung
Faktor III	<i>Fehler in der Informationsverarbeitung</i>	Prozedurale Fehler und Fehler in der Beurteilung, Planung, Entscheidung usw. Hauptsächlich hervorgerufen durch Lücken in den Kenntnissen und Fertigkeiten festgelegter Verfahren/Notverfahren; unvollständige Flugvorbereitung; mangelhafte Kraftstoffplanung; falsche Zeitplanung; Nichtweitergabe von Informationen/eigenen Absichten; Weiterflug in IMC unter VFR; Verlust der geographischen Orientierung
Faktor IV	<i>Fehler in der Informationsausgabe</i>	Sensomotorische/manipulative Fehler Hauptsächliche Markiervariable: Aktionen/Reaktionen verspätet; Aktionen/Reaktionen unterlassen; falsche Dosierung von Steuerbewegungen; mangelnde Koordination der Steuerorgane; Verwechslung oder unbeabsichtigtes Betätigen von Bedienelementen

Abb.17.5: Die verschiedenen Kategorien von Flugfehlern

Die Ergebnisse der Faktor Mensch-Studie und anderer Untersuchungen haben dazu geführt, dass das frühere „Defizit an Psychologie“ in der Flugsicherheitsarbeit nach und nach abgebaut wurde. Als Unterrichtsfach hat die Flugpsychologie seitdem einen festen Platz in der Ausbildung von Fliegerärzten sowie in den Lehrgängen für Flugsicherheitsoffiziere und in den Seminaren für das Führungspersonal der fliegenden Verbände. Psychologen werden auch an der Human Factor-Analyse von Flugunfällen beteiligt. Die eigentliche Unfallprävention ist für sie allerdings noch ein weitgehend verschlossenes Feld. Unfallverhütung sollte ja nicht nur die Entdeckung von technischen, organisatorischen, auswahl- und ausbildungsspezifischen Schwachstellen beinhalten, sondern auch Maßnahmen zur Steigerung des individuellen Leistungs- und Belastungsvermögens. Auch der Fliegerarzt muss sich dieser Zusammenhänge bewusst sein und sie in seine Betreuungs- und Fürsorgemaßnahmen für den gesamten fliegerischen Dienst mit einbeziehen (vgl. auch die Kapitel 8, 9 und 15). Ferner sollte er in enger Zusammenarbeit mit dem FSO und den Flugpsychologen seine Aufmerksamkeit dem systematischen Abbau sicherheitswidrigen Verhaltens widmen. Kurz zusammengefaßt lassen sich alle Beiträge, die die Flugpsychologie auf dem so außerordentlich bedeutsamen, aber diffizilen Gebiet der Flugsicherheit zu leisten vermag, beschreiben als ANALYSE, ERKLÄRUNG, VORAUSSAGE UND VERÄNDERUNG MENSCHLICHEN VERHALTENS IM FLUGBETRIEB.

Am Ende dieses Kapitels soll noch auf die vielen grundlegenden Untersuchungen hingewiesen werden, die das sogenannte HUMAN ENGINEERING betreffen. Besonders die Arbeiten, die sich mit den Problemen der Automation, der Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine, der Aufgabenteilung innerhalb der Besatzung sowie der bedienerfreundlichen Darstellung von Informationen im Cockpit beschäftigen, haben große Bedeutung für die Flugsicherheit. Sie belegen eindrucksvoll, dass der technologische Fortschritt nicht immer „human“ ist und dass die Konstrukteure und Designer die Leistungsgrenzen und Bedürfnisse des fliegenden Menschen nicht in jedem Fall ausreichend berücksichtigen.

17.5 Verwendete und weiterführende Literatur

Gerathwohl, S. Leitfaden der militärischen Flugpsychologie. Verlag für Wehrwissenschaften, München, 1987

Gerbert, K., Kemmler, R. The causes of causes - determinants and background variables of human factor incidents and accidents. Ergonomics 29 (11), 1439-1453, 1985

Gerbert, K. Einführung in die Flugpsychologie. FIMedInstLw, Fürstenfeldbruck, Luftfahrtmedizin und Grenzgebiete, Heft 14, 1966

Gerbert, K. Flugpsychologie. - In: Handbuch der angewandten Psychologie, Bd 3: Haase, H., Molt, W. Markt und Umwelt, Kap 7: Mensch – Technik. Verlag Moderne Industrie, Landsberg am Lech, 1981

Hansen, H. D. Anforderungsgerechte Auswahl von fliegendem Personal. Dissertation, Wien, 1986

18 NEUROLOGISCHE UND PSYCHIATRISCHE ASPEKTE DER FLUGMEDIZIN

18.1 Allgemeines

Die Grundfrage, die in der klinischen Flugmedizin, nicht nur in der Neurologie, zu beantworten ist, lautet: Welches Risiko für die Flugsicherheit besteht, wenn ein Flugzeugführer mit einer bestimmten Gesundheitsstörung fliegt? Für die flugmedizinische Beurteilung sind somit Flugsicherheitsaspekte entscheidend; der Wille des Probanden, Aspekte der Gesundheitsvorsorge oder der Früherkennung von Krankheiten sind von untergeordneter Natur. Die Situation des Fliegerarztes ist somit grundlegend von der des behandelnden Arztes verschieden, auch wenn in nicht seltenen Fällen eine Personalunion besteht. Der Fliegerarzt wird letztendlich immer im behördlichen Auftrag tätig, unabhängig davon, in welcher Rechtsform er seine Tätigkeit ausübt. Diese strikte Orientierung an Flugsicherheitsaspekten bringt es mit sich, dass ein und derselbe medizinische Sachverhalt flugmedizinisch mitunter völlig anders beurteilt werden muss, als dies nach klinisch-kurativen Maßstäben der Fall wäre. Angenommen, im Einzelfall läge die Wahrscheinlichkeit, an einer ernsthaften Gesundheitsstörung, etwa an einem cerebralen Anfallsleiden oder an einer koronaren Herzerkrankung zu leiden, bei 10 %, so wird man unter klinisch-kurativen Aspekten im Regelfall hierauf keine Entscheidung stützen und je nach Sachlage weitere Untersuchungen vornehmen, denn immerhin beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass der Betreffende keinen epileptischen Anfall oder keinen Herzinfarkt erleiden wird, mindestens 90 %.

In der Flugmedizin sieht dies anders aus: Bei einer derartigen Konstellation muss der Proband gegroundet werden, weil das Flugsicherheitsrisiko zu hoch ist. Niemand käme auf die Idee, sich in ein Flugzeug zu setzen, wenn etwa aus technischen Gründen die Wahrscheinlichkeit abzustürzen bei 10 % läge. Das weitere Vorgehen ist natürlich in der kurativen Medizin und in der Flugmedizin gleich: Man muss sich durch geeignete Maßnahmen bemühen, die Diagnose soweit zu erhärten, dass darauf eine adäquate Entscheidung gestützt werden kann. Leider sind hier in der Flugmedizin wesentlich engere Grenzen gesetzt als in der kurativen Medizin, da sich die Flugmedizin, wie überhaupt die Arbeitsmedizin, in aller Regel auf nicht invasive Maßnahmen beschränken muss. Bei der militärischen Eignungsbeurteilung der Erstbewerber sind außerdem noch prognostisch-prospektive Aspekte beurteilungsrelevant, während in der zivilen Flugmedizin häufig nur der aktuelle Querschnittsbefund maßgeblich ist.

Unglücklicherweise ist das Grenzkrisiko für die Flugsicherheit, das nicht überschritten werden darf, nirgendwo verbindlich definiert oder gar kodifiziert. Auf internationaler wissenschaftlicher Ebene hat sich die sog. „1 %-Regel“ etabliert, die allerdings keinerlei Verbindlichkeit aufweist. Sie bedeutet, dass die Inzidenz für ein inkapazitierendes Ereignis beim einzelnen Piloten nicht größer als 1 % im Jahr sein darf. Inkapazitierende Ereignisse sind solche, bei deren Auftreten der Flugzeugführer seine Aufgaben nicht mehr ausführen kann: Bewusstseinsstörungen, epileptische Anfälle, Synkopen, Stenokardien, aber auch bereits starke Übelkeit, Schwindel oder Migräneattacken. Bei der üblichen jährlichen Untersuchung muss der Fliegerarzt also zu der Überzeugung gelangen, dass die Wahrscheinlichkeit, dass der individuelle Pilot im nächsten Jahr einen derartigen Zustand erleben könnte, niedriger als 1 % ist. Es muss hervorgehoben werden, dass die 1 %-Regel für die Bedingungen der zivilen Linienfliegerei konzipiert wurde. Man ging dabei von dem üblichen Flugprofil mit im Vergleich zur Gesamtflugdauer kurzer Start- und Landephase *und* von der Anwesenheit eines Co-Piloten aus. Fliegt der Flugzeugführer alleine, sind strengere Maßstäbe anzulegen.

18.1.1 Was muss im Einzelfall beurteilt werden?

- Welche eignungsrelevanten gesundheitlichen Beeinträchtigungen liegen vor? D.h.: Der veränderte Zustand tritt so plötzlich und unvorhersehbar auf, dass keine Zeit bleibt, der Gefahr auszuweichen (z. B. Anfälle) oder: Es besteht eine dauerhafte Beeinträchtigung von solchem Ausmaß, dass die geforderten Funktionen ständig oder in Belastungssituationen nicht mehr für ein sicheres Führen des Lfz ausreichen (das ist bei vielen Erkrankungen der Fall).
- Welche Gefahren gehen davon aus (mit hinlänglicher Wahrscheinlichkeit, evtl. erst in Belastungssituationen)?
- Welche individuellen, konkreten Kompensationsmöglichkeiten bestehen (für den gegenwärtigen Zeitpunkt oder für einen bestimmten Zeitraum in der Zukunft)?

18.1.2 Folgen der Gesundheitsstörung

Die verschiedenen Folgen der festgestellten Gesundheitsstörung können darin liegen, dass kein stabiles Leistungsniveau erreicht wird, Belastungssituationen nicht beherrscht werden können oder die Gefahr des plötzlichen Versagens (in einem absehbaren Zeitraum) besteht. Im Ergebnis gibt es drei Möglichkeiten, wie die fliegerärztliche Begutachtung ausfallen kann:

- Eignungsbedenken können ausgeräumt werden
- Eignungsbedenken können durch Auflagen und/oder Einschränkungen ausgeräumt werden.
- Nichteignung wird festgestellt.

Von Auflagen und Einschränkungen wird in der Praxis reger Gebrauch gemacht. Auflagen sind rein ärztlicher Natur. Sie beinhalten z. B. die Kontrolle bestimmter Befunde oder einzelner Untersuchungen wie EEG oder NMR. Einschränkungen betreffen den Luftfahrzeugführer selbst und müssen im Militärluftfahrzeugführerschein eingetragen werden. Typische Einschränkungen sind z. B.: „nur mit Co mit Musterberechtigung“, oder „außer strahlgetriebene Lfz mit Schleudersitzen“.

Um einen Sachverhalt adäquat beurteilen zu können, sind umfangreiche Informationen notwendig. Im Einzelfall müssen bekannt sein:

- **Diagnose**
- Welches sind die im Vordergrund stehenden **Symptome**?
- In welchem **Stadium** befindet sich die Erkrankung? (Schweregrad)
- Wie war und ist die **Behandlung**? Welche Behandlungsmöglichkeiten gibt es? Sind sie ausgeschöpft? Gibt es **Komplikationen**/Gefährdungen durch die Behandlung?
- Wie ist die **Langzeitprognose**?
- Bei „abgeschlossenen“ Erkrankungen („Z. n.“) ist eine Restitutio ad integrum eingetreten? Bestehen **Restsymptome**? Wie schwer sind diese ggf.? Besteht **Rezidivgefahr**?
- Gibt es **zusätzliche** Erkrankungen, die die zu begutachtende Erkrankung beeinflussen?

Eine endgültige Beurteilung ist oft erst durch Verlaufsbeobachtung (Anordnung von Nachuntersuchungen) und durch Hinzuziehen von Fremdbefunden möglich. Die für die Beurteilung verbindlichen Richtlinien sind zivil die Nachrichten für Luftfahrer (Richtlinien für die Tauglichkeit des Luftfahrtpersonals) und zukünftig das Regularium „JAR FCL 3“; militärisch ist die ZDv 46/6 maßgebend.

18.1.3 Allgemeines Vorgehen bei Sondergenehmigungen

SG sind zunächst in der ZDv 46/6 Ziffer 117 geregelt. Folgende Kriterien müssen erfüllt sein:

- die Gesundheitsstörung darf den WFV-Grad nicht wesentlich einschränken
- die Gesundheitsstörung wird durch positive physische Eigenschaften ausgeglichen
- durch die Teilnahme am Flugdienst ist eine Verschlimmerung nicht zu erwarten.

Für die neurologisch-psychiatrischen Belange sind ergänzende Kriterien hilfreich:

- Kein Risiko einer plötzlichen Inkapazitierung
- Gesundheitsstörung muss remittiert oder stabil sein
- Falls ein Rezidiv-/Progressionsrisiko besteht, müssen die Erstsymptome leicht zu erkennen sein und dürfen die Flugsicherheit nicht beeinträchtigen.

18.2 Neurologie

Es ist zweckmäßig, neurologische Erkrankungen auf ihre flugmedizinische Relevanz dahingehend zu prüfen, ob sie ein permanentes oder progredientes Defizit verursachen bzw. ob sie zu paroxysmalen Störungen führen können. Der einfacheren Orientierung halber wird hier bezüglich der Krankheitsbilder dieselbe Reihenfolge wie in den JAR FCL 3 gewählt.

18.2.1 Untersuchungsverfahren

In der FG NuP stehen neuropsychologische, neurophysiologische und Ultraschall-Verfahren zur Verfügung. Einen großen Raum nimmt naturgemäß die Neuroradiologie ein, die aber in einer eigenen Fachgruppe repräsentiert ist. Tätig sind ein Facharzt für Neurologie und Facharzt für Psychiatrie sowie ein nervenärztlicher Assistenzarzt oder ein weiterer Facharzt zusammen mit einem klinischen Psychologen, zwei medizinisch-technischen Assistentinnen und eine Arzthelferin. Flugmedizinisch-neurologische Untersuchungen, schwerpunktmäßig auf Wehrfliegerverwendungsfähigkeit (WFV I-III), werden für Erstbewerber, Piloten, Waffensystemoffiziere, Mitflugberechtigte, Flugsicherungskontrolldienst und Radarführungspersonal gem. ZDv 46/6 durchgeführt.

Folgende Untersuchungs-, Erhebungs- und Dokumentationsmethoden finden in der Fachgruppe Anwendung:

18.2.1.1 Fragebogen

Ein kurzer Fragebogen jeweils ausgerichtet auf Erst- oder Wiederholungsuntersuchung, welcher vom Probanden beantwortet und unterschrieben werden muss, dient bei der nachfolgenden persönlichen Anamneseerhebung durch den Arzt als Anknüpfungspunkt für gezielte Nachfragen und als rechtliche Dokumentation. Letzteres ist im Rahmen der durchzuführenden Begutachtungsmedizin, insbesondere im neurologisch-psychiatrischen Bereich, von besonderer Bedeutung, da nicht zwingend mit hinreichender Sicherheit von einer wahren mündlichen Aussage eines zu begutachtenden Probanden ausgegangen werden kann, und durch schriftliche Befragung und Unterschrift die Verbindlichkeit erhöht wird.

Abgefragt werden Unfälle, Kopf- oder Rückenbeschwerden, Seh- oder Hörstörungen, Lähmungserscheinungen, Koordinationsstörungen, Schwindel-, Ohnmachts- oder Krampfanfälle sowie sonstige Auffälligkeiten aus dem Fachgebiet im persönlichen oder familiären Bereich.

18.2.1.2 Lebenslauf

Erstbewerber für den fliegerischen Dienst sollen einen handschriftlichen Lebenslauf formulieren, in dem sie auf Elternhaus, Schul-/Berufsausbildung, Partnerschaft, Freizeitgestaltung, Sport, Selbsteinschätzung, Motivation und Beziehung zum Fliegen eingehen sollen. Dies dient der weiteren psychologischen Begutachtung (s. Abschnitt Psychiatrie).

18.2.1.3 Anamnese

Bei der kritischen Auswertung der Vorgeschichte ist jeder Hinweis auf eine Gesundheitsstörung zu beachten, die bei Aufnahme des Untersuchten in den Flugdienst zu einer gesundheitlichen Schädigung oder zu einer Gefährdung der Flugsicherheit führen könnte. Schon aufgrund der Vorgeschichte wird die WFV, ggf. vorübergehend, ausgeschlossen u. a. durch jeden Hinweis auf eine Erkrankung des Zentralnervensystems, alle Arten von Anfallsleiden, z. B. echte Migräne, synkopale Anfälle, Narkolepsie, Pyknolepsie, epileptische Äquivalente, Tetanie, bei allen Fehlerziffern mit der Gradation IV gem. ZDv 46/1 sowie der achtzehn in Anlage 2 ZDv 46/6 aufgeführten Fehlerziffern der Gradation II-III. Bei der Anamneseerhebung ist auch insbesondere der vom Fliegerarzt zum Untersuchungszeitpunkt zwingend vorzulegende Zwischenbericht zur Nachuntersuchung auf WFV San/BW/0466 von Bedeutung, der alle flugmedizinisch relevanten Erkrankungen und Daten seit der letzten Untersuchung am FIMedInstLw dokumentiert.

18.2.1.4 Körperliche Untersuchung

Die körperlich neurologische Untersuchung bildet den Schwerpunkt der Begutachtung und umfasst regelhaft die im folgenden stichpunktartig aufgelisteten Tests. Fallbezogene Erweiterungen werden vorgenommen und Überschneidungen mit anderen Fachgebieten, wie Innere Medizin, HNO, Orthopädie und Augenheilkunde sind zweckmäßig und liegen im Fachgebiet Nervenheilkunde begründet.

Gangproben

- Normal-, Zehen-, Hacken-, Seiltänzer-, Blindgang
- Romberg'scher Stehversuch
- Armvorhalteversuch, Tremor,
- Finger-Nase-Koordination

Extremitäten

- Einbeinstand, Hüpfen
- Eudiadochokinese
- Fuss-Hacke
- Kraftprüfung Arme, Beine

Wirbelsäule

- Druckschmerz, Klopfschmerz, Beweglichkeit
- Lasègue, Brudzinski-Zeichen
- Lhermitte-Zeichen

Hirnnerven

I	N. olfactorius	Riechempfinden
II	N. opticus	Gesichtsfeld, Hintergrund, Pupillenreaktion
III, IV, VI	Nn. oculomotorius, trochlearis, abducens	Motilität, Blickfolge
V	N. trigeminus	Sensorik, Motorik, Schmerzpunkte
VII	N. facialis	Gesichtsäste, Chvostek-Zeichen
VIII	N. vestibulocochlearis	Fingerreiben, Weber, Rinne
IX, X	Nn. glossopharyngeus, vagus	Kulissenphänomen, Schlucken
IX	N. accessorius	Kopfdrehung, Schulterzucken
XII	N. hypoglossus	Zungenmotilität

Abb. 18.1: Hirnnerven

Sensibilität

- Spitz-Stumpf-Diskrimination, Temperaturempfinden
- Berührung, Vibrationsempfinden, Propriozeption
- Stereoagnosie, Neglect

Reflexe

- Masseter, BSR, BRR, TSR, FFR, PSR, ADR, ASR, TPR, BHR
- Babinski-, Cremaster-, Sphinkterreflex

Auskultation

- Herz, Carotiden

18.2.1.5 EEG

In der klinischen Elektroenzephalographie wird das Hirnstrombild als die Summe der kortikalen Feldpotentiale aufgezeichnet. Entscheidend für das EEG ist die räumliche Struktur und die Richtung der elektrischen Dipole, bedeutendste Potentialquelle sind die großen, senkrecht angeordneten Pyramidenzellen der Hirnrinde. In erster Linie wird das EEG durch unspezifische Aktivierungen des Kortex bestimmt. In der Flugmedizin wird es in der Selektion der Erstbewerber und in der Routineuntersuchung der Probanden in 10jährigen Abständen benutzt, um Hinweise auf eine etwaige Epilepsie zu erkennen. Dafür ist es an sich gut geeignet, da man nur im EEG eine Erregbarkeitssteigerung des Kortex erkennen kann. Leider lassen Sensitivität und Spezifität zu wünschen übrig. Schwierig ist auch die Bewertung funktioneller Herdbefunde, d.h. herdförmiger EEG-Veränderungen ohne bildgebendes Korrelat. Durch verschiedene Provokationsmechanismen lässt sich die Empfindlichkeit steigern (Hyperventilation, Photostimulation).

Ein papierloses EEG wird bei der Erstuntersuchung aller Bewerber für den fliegerischen Dienst und anschließend im 10-Jahres-Rhythmus bei allen Piloten routinemäßig durchgeführt. Bei grenzwertigen Befunden oder nach Kopfverletzungen oder neurologischen Auffälligkeiten erfolgt die Indikationsstellung individuell. Es werden grundsätzlich EEG-Registrierungen in Ruhe und unter Provokationsmethoden mittels Photostimulation und Hyperventilation durchgeführt. Schlaf-, Schlafentzugs-, Langzeit- und Video-EEG werden vor Ort nicht aufgezeichnet. Bedeutsam ist die Erueierung von epileptiformen Potentialen, Herdbefunden bzw. Hinweisen auf erhöhte cerebrale Erregbarkeit, was mit dem Flugdienst nicht vereinbar ist.

18.2.1.6 Multimodal evozierte Potentiale

Erkrankungen des Nervensystems gehen mit funktionellen und strukturellen Veränderungen einher. Der Nachweis struktureller Veränderungen ist eine Domäne der Bildgebung, während Beeinträchtigungen der Funktion durch die neurophysiologische Funktionsdiagnostik nachgewiesen werden können. Multimodal evozierte Potentiale dienen dem Nachweis von Funktionsstörungen im Bereich der motorischen (MEP), somatosensiblen (SEP), visuellen (VEP) und akustischen (AEP) Leitungsbahnen des Nervensystems.

In der Flugmedizin wird nur das VEP zu Selektion eingesetzt. Die übrigen Verfahren kommen indikationsbezogen zur Anwendung. VEP werden nach visueller Reizung durch ein wechselndes Schwarz-Weiß-Schachbrettmuster abgeleitet. Dabei ergibt sich nach Summation eine mehrgipflige Kurve, deren erster Gipfel (P 100) nach ca. 100 msec auftritt und z. B. bei Entmarkungsprozessen in der Sehbahn verzögert zur Darstellung kommt. Diese Untersuchung wird als Screeningverfahren bei allen Erstbewerbern des fliegerischen Dienstes eingesetzt, um ggf. Hinweise auf eine Encephalomyelitis disseminata zu bekommen, die die WFV I ausschließen würde.

18.2.1.7 EMG/NLG

Die Nadelmyographie (EMG) ist für die Diagnostik zahlreicher neuromuskulärer Erkrankungen bedeutsam. Beurteilt werden die Spontanaktivität und die bei leichter Willkürinnervation rekrutierten Muskelaktionspotentiale. Hierdurch lassen sich Muskel- und Nervenerkrankungen voneinander differenzieren. Bei der Neurographie (NLG) werden die motorischen bzw. sensiblen Nervenleitgeschwindigkeiten gemessen und die motorischen bzw. sensiblen Reizantworten analysiert. Beides sind objektive Funktionsprüfungen der betreffenden Nervenfasern, die wichtige diagnostische und prognostische Aussagen gestatten. EMG und NLG werden nur indikationsbezogen, nicht im Rahmen der Selektion eingesetzt.

18.2.1.8 Ultraschall

Durchgeführt wird die extrakranielle Doppler/Duplexsonographie, um Veränderungen der Gefäßwand, Stenosen und Verschlüsse zu entdecken. Die Untersuchung wird indikationsbezogen eingesetzt sowie routinemäßig, im Sinne eines Screenings bei allen Probanden älter als 40 Jahre. Bei Vorliegen multipler Risikofaktoren für Arteriosklerose werden eine Untersuchung der A. carotis communis, A. carotis externa und interna, A. vertebralis, A. supratrochlearis und A. subclavia durchgeführt (Neuro-Doppler). Hierbei wird insbesondere auf Wandverdickungen (Intima-Media-Dicke, IMD), hämodynamisch wirksame Stenosen oder Plaquebildung als Zeichen arteriosklerotischer Gefäßveränderungen mit dem Risiko thrombembolischer Ereignisse geachtet. Auffällige Befunde können in Abhängigkeit von ihrem Ausmaß und dem geflogenen Flugzeugmuster des Probanden zum Entzug der WFV führen.

Technisch erfolgt eine Strömungsgeschwindigkeitsmessung in den Gefäßen anhand der von den Erythrozyten mit Doppler-Effekt reflektierten Echos (die eine in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit höhere oder niedrigere Frequenz als die ausgesandten Signale aufweisen). Die Frequenzunterschiede werden elektronisch hörbar gemacht und in registrierbare Kurven umgesetzt. Durch Kombination von Ultraschall-Doppler und Echoimpulsverfahren (B-Bild) erfolgt die Duplex-Sonographie mit gleichzeitiger Abbildung des interessierenden Blutgefäßes und Messung der Blutströmungsgeschwindigkeit. Bei flächenhafter Ableitung und Farbkodierung der Geschwindigkeitssignale im Mehrkanalverfahren ist dies auch als Farbduplex-Sonographie möglich. Zum Screening von Eurofighter-Piloten ist auch die transcranielle Dopplersonographie (TCD) der Aa. cerebri anterior, media und posterior vorgesehen, um durch Kontrastmittelinjektion bei Vorliegen eines persistierenden Foramen ovale (PFO) als Nachweis sog. „Bubbles“ detektieren zu können. Ein PFO würde zum Ausschluss des Probanden für dieses Muster führen.

18.2.1.9 Neuro-MRT

Alle Erstbewerber für den fliegerischen Dienst erhalten routinemäßig eine Magnetresonanztomographie (MRT) ohne Kontrastmittel (KM) vom Kopf und der gesamten Wirbelsäule. Diese Screeninguntersuchung ist für die FG HNO, Orthopädie und vorrangig für die Neurologie von Bedeutung. Sie ermöglicht z. B. die Diagnose von Arachnoidalzysten, E. d.-verdächtigen Herden (white matter lesions, WML), Syrinxbildungen oder Wurzelkompressionssyndromen (WKS). Bei Indikationsstellung durch die FG erhalten grundsätzlich alle Probanden eine bildgebende Diagnostik am Untersuchungstag mittels MRT, ggf. auch mit KM.

18.2.1.10 Labor

Innerhalb der umfangreichen Labordiagnostik, die teils standardmäßig, teils auf spezielle Anforderung erfolgt, sind aus Sicht der Fachgruppe Neurologie und Psychiatrie folgende Parameter hervorzuheben:

Beispiele	Parameter	Relevanzbeispiel
Blutfette	Gesamtcholesterin, LDL/HDL-Quotient, Triglyzeride	Arteriosklerose-Risikofaktor
Endokrinologie	Prolactin, ACTH, Cortisol	Hypophysenprozesse
Entzündungsparameter	BSG	Arteriitis temporalis
Leberwerte	GOT, GPT, g-GT	Alkoholabusus
Alkoholabususmarker	CDT, MCV	zur Differentialdiagnose auffälliger Leberparameter, bei V. a. Alkoholabusus und zur Verlaufskontrolle (CDT Bestimmung möglichst in Abt. V wg. HPLC-Standard)
Liquor	Zellzahl, Protein, IgG, oligoklonale Banden	entzündlicher ZNS-Prozess, E. d.
Vitamine	Vitamin B12, Folsäure	funikuläre Myelose, PNP
Zucker	Glucose, HbA1C	Diabetische Polyneuropathie

Abb. 18.2: Laborparameter für Neurologie/Psychiatrie

18.2.1.11 Neuropsychologie

Die FG NuP hat ihren eigenen klinischen Psychologen. Mittels verschiedener PC-gestützter Anwendungen können Aufmerksamkeits- und Konzentrationsverhalten, kognitive Leistung und Leistungsgeschwindigkeit, Intelligenzpotential, intellektuelle Kapazität, Persönlichkeitsstruktur u.v.a.m. beurteilt werden. Bei der klinischen Bewertung der Tests muss man sich stets vor Augen halten, dass bei der Anwendung eines jeden neuropsychologischen Verfahrens die Motivation des Probanden mit entscheidend ist.

18.2.1.12 Untersuchungsumfang

In der folgenden Tabelle werden in einer zusammenfassenden Übersicht die einzelnen Untersuchungs- und Dokumentationsmethoden unterteilt nach den Probandengruppen bzw. der Untersuchungsart für die verschiedenen Tauglichkeiten und Verwendungsfähigkeiten dargestellt. In Einzelfällen kann die Diagnostik durch weitere Zusatzuntersuchungen konsiliarisch erweitert werden.

	WFV I	WFV II	WFV III	Radar-/Flusitauglichkeit	TU
Fragebogen	X	X	X	X	X
Lebenslauf	X				
Zwischenbericht		X	X	X	X
Anamnese	X	X	X	X	X
körperl. Unters.	X	X	X	X	X
VEP	X	b. Ind. (z. B. V.a. E. d.; Anfrage FG Auge)	b. Ind.	b. Ind.	b. Ind.
EEG	X	alle 10 J.; b. Ind. (z. B. grenzwertigem Vorbefund; nach Unfällen mit SHT)	b. Ind.	b. Ind.	b. Ind.

	WFV I	WFV II	WFV III	Radar-/Flusitauglichkeit	TU
NLG, EMG		b. Ind. (z. B. WKS, CTS, Myopathie)	b. Ind.	b. Ind.	b. Ind.
Doppler/Duplex		ab 40 J. oder bei multiplen RF f. Gefäßkrankungen (Hypertonus, Hyperchol, Zig, DM, Fam. Anamnese)	b. Ind.	b. Ind.	b. Ind.
MRT Kopf	X	Alle Jetpiloten einmalig; b. Ind. (z. B. Kopfschmerzabklärung)	b. Ind.	b. Ind.	b. Ind.
MRT WS	X	b. Ind. (z. B. WKS)	b. Ind.	b. Ind.	b. Ind.
Labor	X	X	X	X	b. Ind.
Liquor	b. Ind.	b. Ind. (z. B. WML, E. d.)	b. Ind.	b. Ind.	b. Ind.
Neuropsychologie	b. Ind.	b. Ind.	b. Ind.	b. Ind.	b. Ind.
Liquor	b. Ind.	b. Ind. (z. B. WML, E. d.)	b. Ind.	b. Ind.	b. Ind.

Abb. 18.3: Untersuchungsumfang in Abhängigkeit von der Untersuchungsart
 TU = Teiluntersuchung Fachgruppe NuP
 X = regelhaft vorgesehen
 b. Ind. = bei besonderer Indikation (Beispiele bei WFV II angeführt)

18.2.2 Krankheitsbilder

Die folgende Aufzählung lehnt sich an JAR FCL 3 an und erhebt naturgemäß keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

18.2.2.1 Schädelhirntraumen

Gemeint sind substantielle Hirnsubstanzverletzungen. Maßgebend sind die bleibenden neurologischen Defizite. Der Schweregrad der Verletzung kann oft am Ausmaß der prä-/posttraumatischen Amnesie abgeschätzt werden. Eine Commotio: i. d. R. wenige Wochen untauglich (NFL: 3 Monate). Bei schwerem SHT wird nach dem Verlauf beurteilt, i. d. R. nach etwa 2 Jahren, weil sich dann eine evtl. posttraumatische Epilepsie manifestiert hat. Bei Rückenmarkstraumen wird ebenso in Abhängigkeit von Symptomausprägung, Kompensation und evtl. Progression der Erkrankung geurteilt, wobei ein gewisses Ausmaß an Funktionsstörungen i. d. R. akzeptiert werden kann („Rolliflieger“). Die Beurteilung erfolgt frühestens nach 6 Monaten.

Stumpfe, d. h. gedeckte Schädelhirntraumen (SHT) können in folgende 4 Schweregrade eingeteilt werden:

SHT Grad	Bewusstlosigkeit
I	keine
II	< 30 Min
III	< 2 h
IV	> 4 h

Abb. 18.5: Graduierung stumpfer Schädelhirntraumata

Der Schweregrad eines SHT kann auch nach der Dauer der Rückbildung der Symptome beurteilt werden. Eine weitere Einteilung der Hirnfunktionsstörungen erfolgt nach der Glasgow-Coma-Scala.

Die Dauer von Bewusstlosigkeit und posttraumatischer Amnesie (PTA) korreliert bei geschlossenen SHT gut mit der Schwere der Hirnschädigung, dem Risiko dauerhafter Schäden und dem Auftreten von Komplikationen. Über die tatsächliche Dauer einer Bewusstlosigkeit herrscht oft Unklarheit, wohingegen die Dauer einer posttraumatischen Amnesie vom Patienten gut dargelegt und vom Untersucher erfasst werden kann. Daher erscheinen auch folgende Richtzeiten zur Festlegung des Groundings anhand der PTA als sinnvoll und praktikabel, um gemäß des Ausmaßes des Hirnschadens, einerseits der Rekonvaleszenz des Patienten, andererseits der Flugsicherheit Rechnung zu tragen. Diese Richtzeiten müssen im Einzelfall i. d. R. modifiziert werden.

Amnesiedauer	Grounding
< 1h	1 Mo
> 1h	2 Mo
> 12h	4 Mo
> 24 h	6 Mo
> 1 Wo	12 Mo

Abb. 18.6: Grounding Richtzeiten in Abhängigkeit der PTA

Im Anschluss an eine jegliche Kopfverletzung wird die Entscheidung zur Wiedererlangung der WFV insgesamt davon abhängig gemacht, ob eine vollständige Wiederherstellung der Hirnfunktion gegeben ist. Insbesondere müssen Bewusstsein, Auffassung, Stimmung, Motorik und Sensorik völlig intakt sein und das Risiko einer posttraumatischen Epilepsie (s. u.) als vernachlässigbar gering erachtet werden.

18.2.2.2 Posttraumatische Epilepsie

Nach einer Kopfverletzung ist das Hirngewebe anfälliger für epileptische Entladungen. Das Risiko für die Entwicklung einer posttraumatischen Epilepsie steigt mit dem Vorliegen folgender Begleitumstände oder Komplikationen (in aufsteigender Reihenfolge): PTA von einem Tag Dauer, früher cerebraler Krampfanfall, fokales neurologisches Defizit, stumpfes Kopftrauma mit Impressionsfraktur, intrazerebrales Hämatom, penetrierende Hirnverletzung, später epileptischer Krampfanfall.

Bei der symptomatischen Epilepsie als Folge einer Hirnverletzung, treten die ersten Anfälle meist bis zum 2. Jahr nach dem Unfall auf, selten erst viel später. Bereits nach dem Auftreten eines frühen singulären, posttraumatischen Krampfanfalls ist daher ein Grounding von 2 Jahren indiziert. Liegt durch wiederholtes Krampfereignis die Diagnose einer posttraumatischen Epilepsie vor, ist dies mit dem Flugdienst dauerhaft nicht vereinbar.

18.2.2.3 Cerebrovaskuläre Erkrankungen

Hier ist die Eignung grundsätzlich nicht gegeben. In aller Regel ist aufgrund des individuellen körperlich-geistigen Zustandes die Gefährdung der Flugsicherheit nachgewiesen, da relevante psychophysische oder psychopathologische Störungen vorliegen und Rückfallgefahr besteht. Wenn überhaupt eine Ausnahmeregelung in Frage kommt, muss mehr als 1 Jahr nach dem Ereignis abgewartet werden. Eine Ausnahmeregelung ist nur dann möglich, wenn der Insult kaum greifbare Folgen hinterlassen hat und das Rezidivrisiko gering (d.h. < 1 %/a) ist. Mögliche Ausnahmen: Subarachnoidalblutung (SAB) ohne greifbare Ursache (< 5 % aller SAB, bei vollständiger Restitutio, nach > 9 Monaten); vergleichbar auch Dekompressions-syndrom (DCS).

18.2.2.4 Neoplasien

Probanden mit Neoplasien sind grundsätzlich untauglich. Es gibt nur wenige potentielle Ausnahmen, z. B. bei „incidental findings in MRI“, wie zufällig entdeckte Hamartome (Pinealiscysten, Arachnoidalzysten, s. u.). Hier sind Ausnahmeregelungen möglich, wenn man sich über die Gutartigkeit der Störung im klaren ist, keine Defizite bestehen und eine Progression nicht zu erwarten ist bzw. leicht kontrolliert werden kann. Weitere Ausnahmen sind benigne Neoplasien peripherer Nerven oder Nervenwurzeln (Neurofibrome, Meningeome) je nach Defizit und „geheilte“ Neoplasien, z. B. Hämangioblastome des Kindesalters (cave: Komplikationen, multiple Tumore, Rezidivneigung, systemische Beteiligung). Ein häufigeres Problem stellen Meningeome dar, extracerebrale intrakranielle Neoplasien, die sich durch Raumforderung manifestieren. Wenn hier kein Defizit besteht und das postoperative Epilepsierisiko nach angemessener Dauer der Nachbeobachtung so gering wie möglich ($< 1 \%/a$) ist, kann eine Ausnahmeregelung in Frage kommen.

18.2.2.5 Arachnoidalzysten

Intrakranielle Arachnoidalzysten sind oft Zufallsbefunde bei offensichtlich gesunden Erstbewerbern oder Piloten. Es gibt keinen Konsens darüber, welche Auswirkung sie auf die WFV haben.

Am häufigsten sind temporale Arachnoidalzysten, d.h. solche in der mittleren Schädelgrube. Sie sind typischerweise links, praktisch immer einseitig und treten viel häufiger bei Männern als bei Frauen auf. Es handelt sich um eine kongenitale Malformation im Sinne einer leptomeningealen Entwicklungsstörung: Die arachnoidalen Deckschichten des Temporal- und des Schläfenlappens verschmelzen nicht und formen dadurch ein nichtkommunizierendes Flüssigkeitskompartiment, das vollständig von arachnoidalen Membranen umgeben ist. Es wird auch beschrieben, dass sich die arachnoidale Membran teilt, wobei die äußere Schicht das Dach der Zyste bildet und die äußere Kontur des Temporallappens erhält. Je nach der Größe der Zyste geht sie regelmäßig mit einer mehr oder weniger ausgeprägten Hypoplasie bzw. partiellen Agenesie des ipsilateralen Temporallappens einher.

Durch eine Vielzahl von Fallberichten ist gut belegt, dass temporale Arachnoidalzysten zwei Arten von Symptomen verursachen können:

- Unmittelbar von der Zyste ausgehende Symptome (z. B. Neigung zu subduralen Hämatomen bei geringfügigen SHT, durch Druck auf benachbarte Hirnsubstanz epileptische Anfälle, im EEG oft gruppierte rhythmische Entladungen links temporal, Kopfschmerzen, z. B. durch Hirndruck).
- Symptome von Seiten des unterentwickelten Temporallappens. Sie sind außerordentlich vielgestaltig (auch die Anfälle könnte man hier aufführen) und reichen von kognitiven Störungen (Lernen, Gedächtnis), Persönlichkeitsauffälligkeiten über Aufmerksamkeitsstörungen („temporal lobe arachnoid cyst-attention deficit disorder“) hin zu psychiatrischen Störungen im engeren Sinne. Beschrieben sind z. B. paranoide Psychosen, Katatonien und Anorexia nervosa. Temporale Arachnoidalzysten haben somit ein beachtliches pathogenes Potential.

Bei der fliegerärztlichen Beurteilung muss nicht nur der status praesens beachtet werden; v.a. bei Erstbewerbern soll sie auch eine Prognose für die Zukunft beinhalten. Die Beurteilung wird erschwert durch die Tatsache, dass es keine zuverlässigen Prädiktoren gibt, die es erlauben, zu entscheiden, welcher Zysten Träger in Zukunft symptomatisch werden wird. Angesichts des erheblichen pathogenen Potentials und des grundsätzlich strengen Maßstabes, den die ZDV 46/6 v. a. bei Erstbewerbern anlegt, ist es aber gerechtfertigt, Zysten Träger grundsätzlich von der WFV auszuschließen und bei Sondergenehmigungen einen strengen Maßstab anzulegen.

18.2.2.6 Neuromuskuläre Erkrankungen

Auch hier ist die Tauglichkeit in Abhängigkeit von Symptomausprägung, Geschwindigkeit des Einsetzens (periodische Lähmungen) und Verlauf (Gefahrenlage wie bei Anfallsleiden) zu beurteilen. Myopathien mit funktionell relevanten Paresen oder Myasthenie machen grundsätzlich untauglich. Bei Neuropathien, z. B. Guillain-Barré-Syndrom (GBS), ist die Beurteilung vom Defizit abhängig.

18.2.2.7 „Degenerative“ Erkrankungen

Motoneuronerkrankungen machen grundsätzlich untauglich. Die Parkinson Krankheit (PD) ist bedingt durch die Degeneration der Substantia nigra mit Verminderung der Transmittersubstanz Dopamin. I. e. S. bezeichnet sie die idiopathische Form mit wahrscheinlich dominantem Erbgang unterschiedlicher Penetranz, i. w. S. aber auch den Parkinsonismus unterschiedlichster Ätiologie. Zur typischen Parkinson-Trias werden Rigor, Tremor und Akinese gezählt. Als Symptome können ab mittlerem Lebensalter langsam fortschreitende Hypo- und Akinese vorkommen, fehlende Mitbewegungen, kleinschrittiger Gang, Beugehaltung von Rumpf und Gliedern, Pro-, Retro- und Lateropulsion, charakteristischer Tremor (rhythmisch 4-7/Sek.), fein- bis mittelschlägiger Ruhe- und Haltungstremor, bei emotionaler Erregung verstärkt, bei Willkürbewegung gebessert, im Schlaf schwindend, v. a. an Extremitäten (selten an Zunge, Lippen, Kaumuskeln), Hypertonie, Mimikarmut, monotone Sprache, Mikrographie, evtl. vegetative (Hyperhidrosis, Salbengesicht, Speichelfluss etc.) und psychische Veränderungen (depressive Grundstimmung, Apathie, selten Euphorie, labile oder starre Affektivität, erschwerte Spontaneität und Entschlusskraft, verlangsamtes Denken, verarmte Assoziationsfähigkeit). Vorkommen auch nur halbseitig oder ohne Tremor.

Mittelfristig sehr gute therapeutische Möglichkeiten bestehen in der medikamentösen Einstellung, in Krankengymnastik und evtl. auch in einer stereotaktischen Operation.

Grundsätzlich ist weder die Parkinsonkrankheit noch das Parkinsonsyndrom mit einer WFV vereinbar. Für die fliegerärztliche Beurteilung sind maßgeblich Verlangsamung, störende unwillkürliche Bewegungsimpulse, Desintegration der Motorik, on/off-Phänomene. Es kann im Anfangsstadium der Erkrankung vorkommen, dass Patienten mit entsprechender Medikation vollständig kompensiert sind. Wenn man die Belastbarkeit in speziellen Situationen abschätzen (Fluglehrer, Simulator) und in kurzen Intervallen nachuntersuchen kann, ist eine Ausnahmeregelung möglich. Fortgeschrittene Stadien bedingen immer Untauglichkeit.

18.2.2.8 Demyelinisierende Erkrankungen (MS)

Die Encephalomyelitis disseminata (E. d., Multiple Sklerose, MS) ist eine relativ häufige Entmarkungskrankheit des Zentralnervensystems (herdförmiger, regellos verteilter Markscheidenzerfall, perivaskuläre Infiltrate, gliöse Proliferation und Narben), mit Manifestation vorwiegend im 20.-40. Lebensjahr. Die Ätiologie ist möglicherweise vielfältig. Angenommen wird u. a. eine wahrscheinlich im Kindesalter eintretende latente sog. Slow-Virus-Infektion, die erst nach Jahren durch die aus ihr resultierende Autoimmunkrankheit klinisch fassbare Ausfallerscheinungen hervorruft, ausgelöst durch Präsentation des basischen Markscheidenproteins des ZNS durch Astrozyten an T-Lymphozyten, die - aktiviert - die Astrozyten und danach die Markscheiden zerstören. Die unspezifischen Symptome sind äußerst vielgestaltig und umfassen ein pseudoneurasthenisches oder -rheumatisches Prodromalstadium, Hirnnervenausfälle (z. B. retrobulbäre Neuritis, Augenmuskellähmung, skandierende Sprache), spastische Lähmungen, Kleinhirnsymptome, Sensibilitäts-, Blasen- und Mastdarmstörungen, bis zu neuropsychologischen Störungen. Bei der klinischen Untersuchung können Pyramidenbahnzeichen, aufgehobene Bauchhautreflexe und temporale Abblässung der Sehnervpapille als sog. Marburg-Trias und/oder skandierende Sprache, Intentionstremor und

Nystagmus als sog. Charcot-Trias auftreten. Der Verlauf der Krankheit ist schubweise mit Remissionen oder chronisch-progredient.

Die klinische Diagnose wird wesentlich mitgetragen durch die MRT-Diagnostik (mit KM) von Hirn und Rückenmark, bei der zunächst das Vorkommen von sog. white matter lesions (WML) bedeutsam ist, der Liquordiagnostik, in der sich meist eine leichte mononukleäre Pleozytose und albuminokolloidale Dissoziation mit pathologischem Liquor/Serum-Immunquotienten, intrathekale IgG-Bildung mit oligoklonalen Banden in der isoelektrischen Focussierung und Masern-Röteln-Zoster-Reaktion finden kann. Die Diagnose wird mitbestimmt durch akustisch und visuell evozierte Potentiale (EP).

Für die fliegerärztliche Beurteilung ist bedeutsam, dass der Verlauf sehr variabel sein kann, und dass beim heutigen Stand der Diagnostik sehr viele symptomarme Fälle zur Diagnose kommen, die man noch vor wenigen Jahren nicht als solche klassifiziert hätte. Immer ist eine komplette Diagnostik (MRT, Liquor, EP) notwendig. Grundsätzlich sind Probanden mit MS untauglich, Ausnahmen sind aber möglich, etwa wenn der Proband nur wenige Schübe gehabt hat und kein Defizit aufweist. I.d.R. sind dann regelmäßige Nachuntersuchungen (6 Monate), einschließlich MRT und EP-Kontrollen und augenärztliche Stellungnahme (Retrolbulbärneuritis, Doppelbilder) notwendig; ggf. auch Simulatorprüfung o.ä.

18.2.2.9 Degenerative Wirbelsäulenerkrankungen

Die Beurteilung der spinalen Spondylose ist i. d. R. unproblematisch. Ein Wurzelkompressionssyndrom (WKS, Bandscheibensyndrom, Pulposus-Prolaps-Syndrom) ist die durch Bandscheibenprolaps oder -protrusion ausgelöste Symptomatik lokaler, oft durch Husten, Niesen oder Jugularvenenkompression verstärkter Spontanschmerzen im Bereich der Wirbelsäule mit Einschränkung der Beweglichkeit und mit - meist lumbaler (L5/S1) - Strecksteife und neurologischen Symptomen durch Reizung des Rückenmarks bzw. Kompression der Wurzeln der Spinalnerven mit Reflexstörungen, sensiblen und motorischen Reiz- und Ausfallerscheinungen. Diagnostisch wichtig ist das positive Lasègue-Zeichen und die Bildgebung mittels MRT sowie die Elektromyographie.

Probanden mit Wurzelkompressionssyndromen sind i. d. R. tauglich, abhängig vom Defizit und Verlaufsbeobachtung (6 Monate). Vorübergehende Untauglichkeit besteht für die Dauer der Behandlung. Kommt es dagegen zur Rückenmarkskompression (cervicale spondylothische Myelopathie) besteht fast immer Untauglichkeit.

18.2.2.10 „Episodische“ Probleme/Migräne

Migräne ist eine anfallsweise, sich periodisch wiederholende, meist halbseitige Kopfschmerzsymptomatik. In der Pathogenese scheinen biogene Amine (z. B. Serotonin) und die Thrombozytenfunktion eine Rolle zu spielen. Neuere Erkenntnisse sprechen für eine Kanalerkrankung als Ursache der klassischen Migräne. Dies ist für die familiäre hemiplegische Migräne nachgewiesen (α_1 -Untereinheit des P/Q-Typ Calciumkanals). Ohne begleitende neurologische Funktionsstörungen wird sie als einfache („common“) Migräne bezeichnet. Als klassische („complicated“) Migräne wird eine Hemicranie mit begleitenden kurzdauernden neurologischen Funktionsstörungen, z. B. visuellen (Flimmerskotom, Gesichtsfeldeinschränkungen), sensorischen, motorischen und Sprachstörungen definiert. Es können vegetative Reiz- und Ausfallerscheinungen auftreten. Migräne ist oft von Übelkeit und Brechreiz begleitet.

Als „Migraine accompagnée“ werden die die eigentliche Kopfschmerzsymptomatik überdauernden neurologischen Störungen (wie Par- u. Dysästhesien, Paresen, aphasische Störungen) bezeichnet. „Migraine ophthalmique“ ist eine plötzliche hemianopische Sehstörung (oft zunächst zentraler Gesichtsfeldausfall mit peripherwärts fortschreitendem Flimmerskotom),

gefolgt von halbseitigen Kopfschmerzen, häufig auch Übelkeit; verursacht durch Gefäßstörungen der Sehrinde; oft unter Wettereinfluss.

Im Verlauf einer sog. ophthalmoplegischen Migräne treten Augenmuskellähmungen (Doppelbilder) auf, vielfach bei basalem Aneurysma am Circulus arteriosus Willisii, raumfordernder oder entzündlicher hirnbasaler Erkrankung.

Bei rezidivierender Kopfschmerzsymptomatik ist eine weitergehende Untersuchung zur Ursachenklärung und Ausschlussdiagnostik indiziert. Dies umfasst eine interdisziplinäre Zusammenarbeit insbesondere mit den FG HNO und Radiologie.

Die klassische Migräne macht untauglich, da sie von erheblichen vegetativen Zeichen (Nausea, Vomitus) und oft von visuellen Auren mit Skotomen und Gesichtsfelddefekten begleitet ist. Im Einzelfall sind Häufigkeit, Dauer und Schwere der Attacken und die Art visueller Symptome bedeutsam. Das eigentliche Problem liegt in der Diagnosestellung, da es kein objektives Verfahren zur Migränediagnose gibt und man völlig auf die Anamnese angewiesen ist. Ausnahmen sind grundsätzlich möglich, auch Intervallprophylaxe mit Betablockern im Einzelfall unter besonderen Einschränkungen („01: nur mit Co-Pilot mit Musterberechtigung“). Nach erfolgreicher Therapie mit wirkungsvoller Rezidivprophylaxe ist die WFV nicht gefährdet. Eine nicht sicher zu verhindernde klassische Migräne ist insbesondere bei Jetpiloten nicht mit dem Flugdienst vereinbar. Eine Kopfschmerzsymptomatik in der Vorgeschichte, die die Gefahr eines häufigen Wiederauftretens in sich birgt, kann bereits die WFV I ausschließen. Andere Kopfschmerzsyndrome, wie Cluster-Kopfschmerz oder Trigeminusneuralgie, werden nach denselben Grundsätzen beurteilt und sind in der Regel nicht tauglich. Ausnahmen sind nur nach längerer Symptombfreiheit (> 6 Monaten) möglich („01“).

Probanden mit Narkolepsie, einer meist in Kindheit oder Pubertät beginnenden idiopathischen, seltener symptomatischen Krankheit (z. B. bei oder nach Enzephalitis, Hirntrauma, -tumor, ventrikelnaher Encephalomyelitis disseminata) mit anfallsweisem, unüberwindlichem Schlafzwang am Tage für ca. 1 bis 30 Minuten, affektivem Tonusverlust der Muskulatur, Wachanfällen und kurzen, lebhaften hypnagogen Halluzinationen, elektrophysiologisch desynchronisiertem Schlafbild, und Probanden mit Schlafapnoesyndrom sind untauglich.

18.2.2.11 Anfälle

Patienten mit einem cerebralen Anfallsleiden sind ausnahmslos untauglich. Dasselbe gilt für Probanden mit einem einmaligen cerebralen Anfall, ohne dass feststehen muss, ob es sich um einen Gelegenheitsanfall gehandelt hat. Im Einzelfall ist die Entscheidung oft schwierig, da die Anfälle in aller Regel nicht von fachkundiger Seite beobachtet worden sind, und man völlig auf die Anamnese angewiesen ist. Man muss also die DD Gelegenheitsanfall/Einzelanfall/Erstanfall leisten und sich über die etwaige Epilepsieform und -syndrom, Anfallstyp, Dauer der Anfallsfreiheit, Rezidivwahrscheinlichkeit, Provokationsfaktoren, adäquate/inadäquate Therapie, Compliance, Glaubhaftigkeit des Probanden und das EEG im klaren werden. Dies geht i. d. R. nur, wenn man Fremdbefunde in die Beurteilung mit einbeziehen kann. Typische EEG-Bilder kommen bei Epileptikern jedoch nur in etwa 30 % der Erkrankungsfälle vor; bei 30 % findet man nur uncharakteristische Veränderungen, bei weiteren 20 % sind Störungen provozierbar.

Fremdbefunde von verschiedenen Untersuchern sind oft widersprüchlich, da ja auch die Entscheidungsfindung unter rein klinischen Gesichtspunkten in kritischer Weise von der Anamnese abhängt. Im Zweifelsfall besteht Untauglichkeit. Anders als bei den vorgenannten Syndromen besteht bei cerebralen Anfällen kaum Ermessensspielraum. Denkbare Ausnahme wären etwa frühkindliche Epilepsien, die kein Wiederholungsrisiko im Erwachsenenalter beinhalten (z. B. benigne Rolandische Epilepsie des Kindesalters).

18.3 Psychiatrie

Grundsätzlich ist das flugmedizinische Procedere in der Psychiatrie schwieriger als in der Neurologie. Das liegt v. a. an der Psychiatrie als solcher, da die meisten psychiatrischen Klassifikationen auch viele Kriterien beinhalten, die schwierig zu quantifizieren bzw. zu standardisieren sind (Stimmung, Affekt, Verhalten, Urteilkraft, Problemeinsicht etc.). Psychiatrische Diagnosen werden heutzutage an Hand von operationalisierten Kriterien (z. B. DSM-IV oder ICD 10 F) gestellt. Diese Kriterienkataloge richten sich notwendigerweise an die Allgemeinbevölkerung und berücksichtigen nicht, dass aus flugmedizinischer Sicht Störungen bereits auf einem viel niedrigeren Niveau (als in der Allgemeinbevölkerung) bedeutsam werden können. Viele psychiatrische Behandlungsmethoden, z. B. die prophylaktische Gabe von Psychopharmaka, sind in der Flugmedizin kontraindiziert. Schließlich müssen in der psychiatrischen Flugmedizin noch viele außermedizinische Anliegen Berücksichtigung finden: individuelle Wünsche, organisatorische Zwänge, militärische und juristische Erwägungen, Fairness, Anpassung an den bürokratischen Prozess in den Streitkräften.

Nicht nur aus psychiatrischer Sicht muss ein Pilot zum Fliegen befähigt, motiviert und psychisch stabil sein. Stabilität betrifft Persönlichkeit, Temperament und Umgang mit anderen. Diese Anforderungen gehen weit über das Konzept einer „geistigen Gesundheit“ hinaus. Wie bereits ausgeführt, können psychiatrische Symptome bereits im subklinischen Bereich flugmedizinisch relevant werden. Z. B. können familiäre Probleme den Piloten soweit ablenken, dass seine Performance deutlich vermindert ist, ohne gleichzeitig die Kriterien einer depressiven Episode, Dysthymie o. ä. zu erfüllen.

Der Fliegerarzt ist auch darauf angewiesen, dass der Pilot Veränderungen seiner eigenen Psyche wahrnehmen kann und dem Fliegerarzt berichtet. Naturgemäß gibt es eine Reihe psychischer Störungen, bei denen Introspektion, Einsicht, Urteilkraft oder Denkvermögen aus krankhafter Sicht beeinträchtigt sind, so dass die berechnete fliegerärztliche Erwartung an ein aufrichtiges „um Rat suchen“ selbst bei integren, intelligenten Menschen nicht erfüllt werden kann. Aus diesem Grund sind bei bipolar affektiven Störungen oder bei Schizophrenien im Bereich der USAF grundsätzlich keine Sondergenehmigungen möglich.

Beachtenswert ist schließlich das Phänomen des sekundären Krankheitsgewinns. Z. B. kann ein Pilot, der wegen Flugangst grounded wird, evtl. Leistungen aus einer Versicherung erhalten und gleichzeitig eine nicht-fliegerische Karriere aufbauen. Da er sich ansonsten völlig gesund fühlt, wird er die an sich indizierte Psychotherapie nicht beginnen, da er, inzwischen grounded, keinen Leidensdruck mehr verspürt. Leidensdruck kommt erst dann auf, wenn man versucht, ihn wieder zu aktivieren. Aus all dem folgt, dass Sondergenehmigungen in der psychiatrischen Flugmedizin mit besonderer Sorgfalt abgewogen werden müssen. Es ist sehr einfach, einen Piloten auf Dauer zu grounden. Es ist sehr viel schwieriger, im Einzelfall abzuschätzen, ob ein Proband mit (nach) einer psychischen Störung wieder sicher fliegen kann (darf).

18.3.1 Allgemeine Beurteilungsrichtlinien in der psychiatrischen Flugmedizin

Der Zeitbedarf ist sehr viel höher als bei neurologischen Fragen und oft auch länger als bei klinisch-psychiatrischen Problemen, die Exploration dauert entsprechend lang. In der Begutachtungssituation schwierig, aber um so wichtiger ist es, eine vertrauensvolle Beziehung zum Probanden aufzubauen. Es kann dabei hilfreich sein, klar zu machen, dass die Begutachtung auch der Sicherheit des Probanden dient. Immer müssen etwaige Bagatellisierungs- und Verleugnungstendenzen beachtet werden, jeder Proband möchte eine möglichst vorteilhafte Selbstdarstellung geben. Deshalb müssen alle Angaben fremdanamnestisch validiert, Behandlungsunterlagen müssen angefordert werden. Der Gutachter muss therapeutisch abstinenter bleiben, soll den Eindruck aus der Begutachtungssituation mitteilen und das Er-

gebnis transparent machen. Im Falle der Ablehnung hat der Proband das Recht auf eine nachvollziehbare Begründung.

18.3.2 Krankheitsbilder

Die Eigenart des fliegerärztlichen „Patientengutes“ bringt es mit sich, dass die Gewichtung der einzelnen Störungen in der gegenständlichen Darstellung völlig anders ist als in einschlägigen Lehrbüchern.

18.3.2.1 Psychosen

Hinter diesem schwer zu definierenden Begriff verbergen sich traditionellerweise die schwersten psychischen Störungen. Man unterscheidet, der Tradition folgend, im klassischen Sinne endogene von körperlich begründbaren Psychosen und meint damit klassifikatorisch Zustands- und Verlaufseinheiten, die mit schweren Störungen des Denkens, der Wahrnehmung und der Affektivität einhergehen und oft in einen Defekt münden. Die neueren psychiatrischen Klassifikationssysteme haben den Begriff der Psychose fallengelassen. Er ist gleichsam von großer praktischer Bedeutung und wird wegen seiner weiten Verbreitung (und dem allgemeinen psychiatrischen Konsens darüber, was unter einer Psychose zu verstehen ist) hier weiter benutzt.

Schizophrene Psychosen

Man unterscheidet die schizophrene Grundstörung (Störung des Denkens, des Affektes, des Antriebs, Autismus) von den produktiven Symptomen (Wahnbildung und Sinnestäuschung). Es besteht breiter internationaler Konsens darüber, dass Schizophrene grundsätzlich fliegeruntauglich sind und Ausnahmen nicht gemacht werden („non waivable condition“). Interessanterweise kommen Schizophrenien in der fliegerärztlichen Praxis weit seltener vor, als dies nach der Häufigkeit der Erkrankung (Erkrankungswahrscheinlichkeit von knapp 1 % in der Durchschnittsbevölkerung) eigentlich zu erwarten wäre.

Dazu passt, dass Schizophrenieerkrankte auch in der Verkehrsdelinquenz entgegen weit verbreiteten Vorstellungen ebenfalls nur selten in Erscheinung treten. Die Unfallbelastung von Psychotikern ist 5mal niedriger als die von persönlichkeitsgestörten Menschen (s. u.).

Affektive Psychosen

Die affektiven Psychosen sind durch das Auftreten unmotivierter, krankhafter Veränderungen der Stimmungslage (Depression, Manie), einem im Regelfall mehrmonatigen phasischen Spontanverlauf sowie die fast stets auch ohne Behandlung eintretende Vollremission gekennzeichnet. Man unterscheidet den monopolar-zyklischen vom bipolar-zyklischen Verlaufstyp.

Depression

Leitsymptome sind die unmotivierte Traurigkeit, die zunehmende Gehemmtheit aller seelischen Abläufe, die Erschwernis des Denkens sowie Selbstentwertungstendenzen. Wahnhafte Ausgestaltungen können hinzukommen. Die Tagesrhythmik ist verändert, oft kommt es zu einer körperlichen Begleitsymptomatik. Die Suizidrate liegt bei etwa 15 %; besonders zu fürchten ist der erweiterte Suizid. Piloten mit endogener Depression sind deshalb grundsätzlich untauglich. Ausnahmen sind nur nach der ersten Episode bei voller Remission denkbar, wenn die Umstände keine Rezidive erwarten lassen und eine Psychopharmakotherapie nicht notwendig ist.

Manie

Die Manie ist der Gegenpol zur Depression. Die Stimmungslage ist gehoben, der Antrieb gesteigert, der Gedankenzustrom vermehrt, der Patient überschätzt sich selbst kritiklos. Oft zusätzlich sexuelle Enthemmung. Die Symptomatik führt regelhaft zu erheblich störenden,

meist auch den Patienten nachhaltig schädigenden Verhaltensweisen. Manische Patienten können sich in wenigen Tagen mehr materiellen, sozialen und moralischen Schaden zufügen, als in ihrem ganzen Leben wieder gutzumachen ist. Deshalb und wegen der kritiklosen, krankheitsuneinsichtigen Selbstüberschätzung sind manische Patienten grundsätzlich ohne Ausnahme fliegeruntauglich.

18.3.2.2 Sucht und Abhängigkeit

Hier steht der Alkohol im Vordergrund. Wie bei allen anderen Drogen, unterscheidet man zwischen Missbrauch und Sucht. Missbrauch liegt vor, wenn der Proband das Führen eines Lfz und Alkoholenuss nicht trennen kann, ohne bereits abhängig zu sein. Bei Sucht liegt definitionsgemäß psychische und physische Abhängigkeit, Entzugssymptomatik, Kontrollverlust, Depravation vor. Suchtkranke sind grundsätzlich untauglich.

Es ist sehr schwierig, Alkoholmissbrauch in seinen Anfangsstadien zu erkennen. Als hilfreich und valide haben sich die „CAGE“-Fragen herausgestellt:

- Haben Sie jemals das Gefühl gehabt, Sie müssten Ihren Alkoholkonsum verringern?
- Haben andere Personen Sie dadurch geärgert, dass diese Ihr Trinkverhalten kritisiert haben?
- Haben Sie jemals Schuldgefühle wegen Ihres Alkoholkonsums gehabt?
- Haben Sie jemals am Morgen ein alkoholisches Getränk getrunken, um Ihre Nerven zu beruhigen?

Wird mehr als eine Frage bejaht, besteht dringender V. a. Alkoholabhängigkeit. Dies setzt natürlich aufrichtige Antworten voraus. Es ist eine Binsenweisheit, dass Luftfahrzeugführer, die Alkoholmissbrauch betreiben oder alkoholkrank sind, aus Flugsicherheitsgründen nicht eingesetzt werden dürfen. Die klinische Flugmedizin hat dabei die Aufgabe, LFF, die Missbrauch betreiben bzw. krank sind, zu diagnostizieren und eine entsprechende Behandlung zu veranlassen. Dabei soll die klinische Flugmedizin die betreffenden Probanden ja bereits erkennen, bevor es zu flugsicherheitsrelevanten Vorfällen, Zwischenfällen oder zu Flugunfällen kommt. Dies bereitet in der Praxis erhebliche Probleme. Ein Hauptproblem liegt darin, dass ein wesentliches ärztliches diagnostisches Werkzeug, die fachkundige Erhebung der Anamnese, hier untauglich ist. Aus Gründen, die gut bekannt sind, aber hier nicht weiter erörtert werden sollen, legen sich die Probanden bei der periodischen gutachterlichen Untersuchung am FIMedInstLw oft anamnestisch eine wenig hilfreiche Zurückhaltung auf. In Einzelfällen bestehen auch konkrete Einzelinteressen zur Negierung und Verschleierung von Alkoholproblemen. Daraus resultieren Informationsdefizite, die oft auch durch den fliegerärztlichen Zwischenbericht (SanBw 0466) nicht ausgeglichen werden können. Bei der Alkoholproblematik kommt weiter erschwerend hinzu, dass die Probanden aus Gründen der allgemeinen Tabuisierung des Alkoholismus und aus Gründen, die in der Erkrankung („suchtmanent“) selbst liegen, keinerlei Interesse an einer frühen Diagnosestellung haben; man spricht von der „krankheitsbedingten Krankheitsuneinsichtigkeit“. Wird Alkoholkonsum überhaupt eingeräumt, muss eine Bagatellisierung und Rationalisierung desselben angenommen werden.

Objektiven Befunden kommt deshalb eine besondere Bedeutung zu. Alkoholbedingte Körperschäden, wie Leberstrukturveränderungen bis zur Zirrhose oder Polyneuropathien, sind zwar objektive Befunde, in der Regel auch leicht feststellbar, haben aber für die gegenständliche Betrachtung zwei wesentliche Nachteile: Es handelt sich bei Ihnen in aller Regel nicht um Frühsymptome – ihr Zustandekommen setzt den Konsum beträchtlicher Alkoholmengen voraus – und die ätiologische Klassifikation als alkoholtoxisch ist im Einzelfall nicht immer leicht zu leisten, vor allem, wenn es sich um isolierte Körperschäden handelt. Die sogenannten biologischen Marker des Alkoholkonsums sind deshalb für die gegenständliche Betrachtung

tung von ausschlaggebender Bedeutung. Es handelt sich hier um Laborparameter von bekannter Aussagekraft, die beliebig oft erhoben werden können.

Der Vorteil von Alkoholmarkern liegt in der objektiven und persönlichkeitsunabhängigen Befunderhebung. Aus diesem Grunde ist es am FMI eingeführte Praxis, in Verdachtsfällen die CDT zu bestimmen. Der Verdacht kann aufgrund anamnestischer Informationen, aufgrund der körperlichen Untersuchung, oder aufgrund typischer Konstellationen in den Transaminasen, der γ -GT, der Blutfette oder des Blutbildes begründet sein. Die CDT-Bestimmung erfolgt also nicht im Sinne eines Screenings, sondern ist stets indikationsbezogen. Da es in der täglichen Arbeit einen breiten Raum einnimmt, wird das Problem der Alkoholmarker eingehend dargestellt:

Marker	Normerhöhung	Nachweisgrenze
Äthanol	> 5 mg/l	Stunden
CDT	> 20 U/l	3 Wochen
HDL	> 50 mg/dl	4 Wochen
γ -GT	> 28 U/l	6 Wochen
MCV	> 92 fl	12 Wochen

Abb. 18.7: Nachweisgrenzen von Alkoholmissbrauchsmarkern

18.3.2.2.1 CDT

Die Bestimmung des kohlenhydratdefizienten Transferrins gilt als sensitive und zugleich hochspezifische Methode zur Erfassung exzessiven Alkoholkonsums bzw. der Alkoholabhängigkeit. Sie hat sich als wichtigster Nachweis eines chronischen Alkoholabusus etabliert. Die CDT umfasst jene Isoformen des Transferrins (Plasmaprotein für den Transport von Eisen, zu 90 % in der Leber synthetisiert), die einen verminderten Gehalt von Sialinsäureresten aufweisen. Warum es beim Alkoholmissbrauch zu einem verminderten Gehalt an Sialinsäureresten kommt, ist allerdings offen; die pathophysiologischen Grundlagen der CDT-Erhöhung beim Alkoholkonsum sind nicht klar. Es ist methodisch alles andere als trivial, die CDT valide und reliabel zu bestimmen. Eine forensisch verwertbare Methodik (HPLC) ist in der Abt. V FIMedInstLw etabliert und wird routinemäßig benützt.

Für die Sensitivität werden Werte zwischen 65- und 95 %, für die Spezifität Werte bis zu 97 % angegeben. Die CDT korreliert im Übrigen nicht mit der γ -GT. Meist wurde damit ein Trinkverhalten identifiziert, das (bei Alkoholkranken) eine längere Einnahme von mindestens 60 g Äthanol/d bis 2 Tage vor der Untersuchung umfasste.

Die Halbwertszeit liegt bei 2 Wochen, deshalb wird die CDT auch als Rückfallparameter eingesetzt. (Normalisierung tritt nach 10 bis 30 Tagen ein.) Eine Alkoholkarenz über einige Tage kann die Sensitivität bereits deutlich herabsetzen. Seltene Ursachen falsch positiver Befunde sind schwere Leberinsuffizienzen, (primäre biliäre Zirrhose, chronisch-aktive Hepatitis), eine genetisch bedingte D-Variante oder das Carbohydrate-Deficient-Glykoprotein-Syndrom. (Außerdem: Schwangerschaft, erheblicher Eisenmangel, Pankreas-Ca, Z. n. Transplantation.) Die meisten Patienten mit Lebererkrankungen haben aber unauffällige CDT-Werte. Es gibt auch Non-Responder, d. h. ein normaler CDT-Wert schließt eine auch tägliche Alkoholaufnahme nicht aus. Deshalb muss nachdrücklich daraufhin gewiesen werden, dass auch ein normaler CDT-Wert eine auch tägliche Alkoholaufnahme von bis zu 40 bis 60 g Alkohol (oder bei Non-Respondern sogar darüber) nicht ausschließen kann.

Zahlreiche Autoren fanden mit verschiedenen Methoden hohe Sensitivität (50 bis 90 %) und Spezifität (90 bis 100 %) für regelmäßige Alkoholaufnahme, allerdings häufig bei selektierten klinischen Patientengruppen. In anderen Populationen (finnische Studenten, norwegische

Kleinstadt, unausgelesenes internistisches Patientengut) wurden auch geringere Sensitivitäten gefunden. Ein Hauptgrund für diese geringeren Sensitivitäten liegt sicher in den verwendeten Testverfahren (Fertigkits). Ein zweiter wesentlicher Grund liegt in der hohen Wahrscheinlichkeit von Fehlklassifikationen in den letztgenannten Studien. Für diese Einschätzung sprechen im wesentlichen zwei Gründe: Bei den letztgenannten „Kontrollgruppen“ wurden oft ausschließlich subjektive Angaben zum Trinkverhalten aufgrund bloßer Befragung für die Klassifikation zugrunde gelegt. Nachuntersuchung derselben Proben durch Gerichtsmediziner zeigten beispielsweise positive Alkoholnachweise in als „falsch-positiv“ klassifizierten CDT-Proben. Weiterhin ist zu bedenken, dass diejenigen Studien, die eine geringere Sensitivität fanden, i. d. R. Populationen mit zu erwartender, niedriger Prävalenz des Alkoholmissbrauchs untersuchten. Schon aus testtheoretischen Gründen ist anzunehmen, dass deshalb der Anteil von Fehlklassifikationen zunimmt, d. h. dass die Genauigkeit („accuracy“) des Tests abnimmt.

Die genannten Differentialdiagnosen als Ursachen falsch positiver Befunde sind zwar zahlreich. Die betreffenden Diagnosen kommen bei den untersuchten LFF allerdings nur selten vor und können ggf. internistisch eindeutig diagnostiziert werden, so dass hierdurch kein Nachteil entsteht. Auch wenn die Sensitivität nicht so hoch ist – nicht zuletzt aufgrund der Heterogenität der Alkoholismusdiagnose – handelt es sich somit aufgrund der bisherigen Untersuchungen um einen Marker, der bei relevanter Erhöhung eine Diagnose eines Alkoholmissbrauchs aufgrund der nach wie vor (unerreicht hohen) Spezifität mit bisher nicht gekannter hoher Wahrscheinlichkeit zulässt. Generell ist jedoch zu bedenken, dass die Aussage zunächst und ohne Begleitdiagnostik nur darauf beschränkt ist, dass in den vorausgegangenen 2 bis 3 Wochen ein regelmäßiger und praktisch täglicher Alkoholkonsum von mindestens 50 bis 60 g erfolgte.

18.3.2.3 Für die fliegerärztliche Praxis

Ein Proband wird routinemäßig dann gegroundet, wenn sowohl γ -GT als auch CDT erhöht sind. Wie hoch ist in einem solchen Fall die Wahrscheinlichkeit, dass der Betreffende tatsächlich ein relevantes Alkoholproblem hat? Eine derartige Betrachtung ist für die Akzeptanz der Untersuchung wichtig. Hier kommt das Bayes'sche Theorem zur Anwendung. Gesucht ist der positive Vorhersagewert (PPV). Wieviele Probanden mit einem positiven Test sind tatsächlich krank? Demgegenüber gibt die Sensitivität nur an, wieviele Kranke tatsächlich einen positiven Test haben. (Die Spezifität gibt die Zahl der Gesunden mit einem negativen Test an.) Der positive Vorhersagewert entspricht der „Post-Test-Wahrscheinlichkeit“. $PPV = \text{post test } p$. In die Form des Bayes'sche Theorems gebracht:

$$\text{post test odds} = \text{pre test odds} \times LR_{+\gamma GT} \times LR_{+CDT}$$

Die odds sind eine andere Formulierung der Wahrscheinlichkeit p . $\text{Odds} = p/(1-p)$. Unter LR_+ (likelihood ratio) versteht man den Informationszugewinn durch die Untersuchung. $LR_+ = \text{Sensitivität}/(1-\text{Spezifität})$. Für die γ GT nimmt man Sensitivität und Spezifität für Alkoholkonsum von jeweils 0,7 an, woraus sich eine LR_+ von 2,3 errechnet.

D. h. eine erhöhte γ -GT verdoppelt den vorbestehenden Verdacht auf ein Alkoholproblem. Wenn man für die CDT eine Sensitivität von 0,7 und eine Spezifität von 0,95 annimmt, errechnet sich eine LR_+ von 14 (bei der Annahme einer Sensitivität von 0,5 und einer Spezifität von 0,9 beträgt die LR_+ immerhin noch 5). Nun muss man noch die Ausgangswahrscheinlichkeit (\cong pre test odds) schätzen.

Hierbei handelt es sich um die Grundwahrscheinlichkeit, dass ein beliebiger LFF überhaupt ein Alkoholproblem hat. Es bietet sich an, hierfür die Prävalenz des Alkoholmissbrauchs/Krankheit bei deutschen Männern überhaupt zu nehmen. Die diesbezüglichen An-

gaben schwanken zwischen 1,3 % und 20 %. Geht man von 1,3 % aus, errechnet sich eine PPV von 0,3 (bzw. bei einer LR_{+CDT} von 5 $PPV = 0,13$).

Die Wahrscheinlichkeit, dass unter den gewählten Annahmen ein LFF mit erhöhter γ -GT als auch CDT tatsächlich ein Alkoholproblem hat und somit bereit ist, unter Alkoholeinwirkung zu fliegen, beträgt also 30 % bzw. 13 %. Die verkehrsmedizinische Definition des Alkoholmissbrauchs stellt ja darauf ab, dass der Betreffende das Führen eines Fahrzeuges und den Konsum von Alkohol nicht trennen kann. Aus fliegerärztlicher Sicht ist deshalb die Wahrscheinlichkeit der Diagnose des Alkoholproblems gleichbedeutend mit der Wahrscheinlichkeit, unter Alkoholeinwirkung zu fliegen. Diese quantitative Betrachtung macht verschiedene Tatsachen deutlich:

Die errechneten Wahrscheinlichkeiten sind zu gering, um unter individualmedizinischen Aspekten diagnostisch hilfreich zu sein. Sie sind niedriger als die einfache Ratewahrscheinlichkeit. Nur unter Flugsicherheitsaspekten (und nicht unter diagnostischen Aspekten) macht die beschriebene „grounding policy“ Sinn. Niemand käme auf die Idee, ein Flugzeug einzusetzen, wenn etwa aus technischen Gründen eine Absturzwahrscheinlichkeit von 13 % oder gar 30 % bestünde (s. o.). Auf Unterschiede in der Sensitivität/Spezifität der CDT in der beschriebenen Größenordnung, wie sie ja in der Literatur immer wieder auftauchen, kommt es unter Flugsicherheitsaspekten nicht an. Entscheidend ist, welches Flugsicherheitsrisiko man in Kauf zu nehmen bereit ist (s. o.).

Kriterien für eine SG bei Missbrauch

Der Proband muss durch Tatsachen den Nachweis der Abstinenz bzw. des Erwerbs einer hinreichend stabilen Fähigkeit zum kontrollierten Trinken führen. Pathologische Laborparameter müssen sich normalisieren (therapeutische Maßnahmen, Kurse). Die Abstinenz muss hinreichend motiviert sein, sich in der Vergangenheit als hinreichend stabil erwiesen haben, der Abstinenzvorschlag grundsätzlich zeitlich unbegrenzt gefasst werden. Die Abstinenz muss für mehr als 1 Jahr nachgewiesen sein.

Kriterien für eine SG bei Sucht

Grundsätzlich wie bei Missbrauch, hier ist allerdings absoluter Abstinenznachweis notwendig. Therapeutisch länger als 6 Monate Entgiftung + Entwöhnung, Teilnahme an Selbsthilfegruppen, (unangekündigte) Kontrollen durch Fliegerarzt (Transaminasen, γ -GT, CDT, BAK). Der Proband muss vereinbarte Termine und Auflagen einhalten und darf keine organischen oder psychischen Folgen des Alkoholkonsums aufweisen. Wegen des hohen Rückfallrisikos muss ein kritischer Maßstab angelegt werden.

18.3.2.4 Neurosen

Nach der klassischen Lehre handelt es sich bei Neurosen um seelisch entstandene Gesundheitsstörungen, deren Symptome symbolischer Ausdruck eines unbewussten Konfliktes sind. Diese theoriegeleitete Klassifikation ist in den neuen psychiatrischen Klassifikationssystemen aufgegeben worden. Für die Zwecke dieser Darstellung werden hierunter die folgenden Diagnosegruppen subsummiert: Konflikt- und Belastungsreaktionen, abnorme seelische Entwicklungen, Angststörungen, Zwänge, Phobien, dissoziative Störungen, PTSD etc.

Erstbewerber sind grundsätzlich untauglich. Bei Piloten ist die Tauglichkeit möglicherweise gegeben, wenn es sich um eine einzige Episode gehandelt hat, die komplett remittiert ist, ein Rezidiv nicht zu erwarten ist und Psychopharmaka nicht notwendig sind. Hier muss grundsätzlich eine Einzelfallentscheidung getroffen werden.

18.3.2.5 Persönlichkeitsstörungen

Das Konzept der Persönlichkeitsstörungen ist bereits im Grundsatz sehr problematisch. Persönlichkeitsstörungen umfassen tief verwurzelte, anhaltende Verhaltensmuster, die sich in

starrten Reaktionen auf unterschiedliche persönliche und soziale Lebenslagen zeigen. Gemeint ist eine deutliche Unausgeglichenheit in Einstellung und Verhalten, Affektivität, Antrieb, Impulskontrolle, Wahrnehmung, Denken, Beziehung zu anderen.

Das auffällige Verhaltensmuster ist andauernd und gleichförmig, tiefgreifend und unpassend, beginnt in Kindheit und Jugend und manifestiert sich bis zum Erwachsenenalter, führt zu deutlichem subjektiven Leiden, und ist mit Einschränkungen der beruflichen und sozialen Leistungsfähigkeit verbunden. Zumindest in der Verkehrsmedizin – dort fehlt ja eine Selektion der Führerscheininhaber - geht man davon aus, dass ein beträchtlicher Teil der Unfälle zurückzuführen ist auf Störungen der Einstellungs- und Anpassungsfähigkeit infolge psychischer Fehlentwicklung oder Persönlichkeitsstörung. Persönlichkeitsstörungen schränken die Tauglichkeit dann ein, wenn Einstellungs- und Anpassungsfähigkeit infolge psychischer Fehlentwicklung oder Persönlichkeitsstörung beeinträchtigt sind, sofern sich Art und Ausprägung solcher Störungen negativ auf das Führen eines Lfz auswirken, was in der Regel der Fall ist.

Eine positive Entscheidung (Sondergenehmigung) ist angezeigt bei zu erwartendem angepasstem Verhalten beim Führen eines Lfz, bei Einsicht in die Zusammenhänge, bei stabilen Vorsätzen zur Verhaltensänderung, bei nachvollziehbarer Verhaltensänderung, und ausreichender neuropsychologischer Leistungsfähigkeit.

Eine negative Entscheidung ist indiziert bei allen Erstbewerbern, ansonsten bei nicht zu erwartendem angepasstem Verhalten beim Führen eines Lfz. Kritisch sind ein gewohnheitsmäßiges, durch Gruppenzwang oder sonstige Gründe stark impulsiv geprägtes Verhalten als LFF (Regelverstöße), eine ungenügende Bereitschaft zur Verhaltensänderung, mangelnde Fähigkeit zur kritischen Selbstbeobachtung, Selbstbewertung und Selbststeuerung, sowie fortbestehende Reifemängel.

18.4 Verwendete und weiterführende Literatur

Bradley, W. G., Daroff, R. B., Fenichel, G. M, Marsden, C. D. Neurology in Clinical Practice. 3. ed, Oxford, 2000

Evans, A. D. B., Rainford, D. J. Medical Standards für Aircrew. In: Ernsting, J., Nicholson, A. N., Rainford, D. J. (eds) Aviation Medicine, 3.ed., Oxford, 1999

Merry, R. T. G. Neurologi - In: Ernsting, J., Nicholson, A. N., Rainford, D. J. (eds) Aviation Medicine, 3.ed., Oxford, 1999

Niedermeyer, E., Lopes da Silva, F. Electroencephalography. 3. ed, Baltimore, 1993

Rayman, R. B. Clinical Aviation Medicine, 2 ed., Philadelphia, 1990

19 DIE WICHTIGSTEN FLUGZEUGMUSTER DER BUNDESWEHR

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Flugzeugtypen, die bei der Bundeswehr zum Einsatz kommen, vorgestellt.

Es folgt die Vorstellung einiger neuartiger Typen, die zur Zeit entwickelt, bzw. erprobt werden und deren Beschaffung vorbehaltlich der Zustimmung der gesetzgebenden Gremien bevorsteht.

Die Bundeswehr besitzt zur Zeit:

- 482 Kampfflugzeuge
- 147 Transport- und Verbindungsflugzeuge.
- 727 Hubschrauber

Dem fliegenden Personal gehören ca. 3000 Soldaten als Cockpitbesatzungen an.

Quelle: Materialamt der Luftwaffe, Verkehrszulassung Juli 2000

19.1 Panavia 200 "Tornado"



Teilstreitkraft	Luftwaffe/Marine
Besatzung	Pilot und Waffensystemoffizier
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • Taktischer Luftangriff • Aufklärung mit Kameras und Radargeräten • Elektron. Kampfführung und Ausschaltung gegnerischer Radaranlagen
Anzahl der Triebwerke	2
Antrieb	Art: ZTL 3A-A Bezeichnung: RR/Turbo Union RB-199-34R M/h 101; 103; 105
Startschub (ohne Nachbrenner)	2 x 63,3 kN
Spannweite	13,91 m (gespreizte Tragfläche) 8,56 m (zurückgeschwenkte Tragfläche)
Länge	17,23 m
Höhe	5,95 m
Startmasse	18 – 24,5 t
Dienstgipfelhöhe	49.590 ft
Reichweite max. Nutzmasse	648 NM
Höchstgeschwindigkeit	2,2 mach
Bewaffnung	<ul style="list-style-type: none"> • Zwei 27 mm Maschinenkanonen, eingebaut im Rumpf mit je 180 Schuß • Freifallende Spreng- und Streubomben • Streuwaffe MW 1 • Zielsuchende Luft-Luft-Flugkörper zur Selbstverteidigung • Zielsuchende Luft-See-Flugkörper • Zielsuchende Luft-Boden-Flugkörper mit automatischem und frei programmierbarem Funkpeiler gegen Radarstellungen und Sendeanlagen • Außenbehälter mit Düppel und Infrarot-Täuschkörpern • Elektron. Stör- und Warngeräte, fest eingebaut und als Außenbehälter

19.2 McDonnell-Douglas F-4F "Phantom II"



Teilstreitkraft	Luftwaffe
Besatzung	Pilot und Waffensystemoffizier
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Im Frieden</u> Aufspüren und Identifizieren von Flugzeugen, die unbefugt in den deutschen Luftraum einfliegen (Air Policing). • <u>Im Verteidigungsfall</u> Verteidigung des Luftraums über den zugewiesenen NATO Land- und Seegebieten. Erringung und Verteidigung der Luftüberlegenheit über den Operationsgebieten von NATO-Truppen
Triebwerk	2 General Electric J79 – 17 A
Triebwerksschub mit Nachbrenner	2 x 81,2 kN
Spannweite	11,78 m
Länge	19,18 m
Höhe	5,01 m
Startmasse	25,8 t
Dienstgipfelhöhe	48.000 ft zugelassen (Möglich 75.000 ft)
Maximales Fluggewicht	26,3 t
Reichweite bei max. Nutzmasse	378 NM
Reichweite bei max. Kraftstoff	1998 NM
Höchstgeschwindigkeit	> 2 Mach (in großer Höhe)
Bewaffnung	<ul style="list-style-type: none"> • Eine sechsläufige 20mm "Gatling"-Maschinenkanone mit 640 Schuß • Zielsuchende Luft-Luft-Lenkraketen

Die Phantom II ist ein Überschall-Mehrzweckkampfflugzeug, das bei der Luftwaffe noch als Jagdflugzeug im Einsatz ist. Die Flugdauer kann durch Luftbetankung verlängert werden.

Die Besatzung verfügt über Schleudersitze und eine Druckkabine.

Im Rahmen der Kampfwertsteigerung (ICE-Improved Combat Efficiency) erhalten 110 Maschinen neue Elektronik und eine neue leistungsstarke Luft-Luft-Lenkrakete, mit der gegnerische Maschinen bis auf 40 km Entfernung beschossen werden können.

19.3 Dassault-Breguet BR 1150 "Atlantic"



Teilstreitkraft	Marine
Besatzung	Pilot, Copilot, Bordmechaniker, drei Beobachter und sieben Systembediener
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • Weiträumige Aufklärung über See (MPA – Maritime Patrol Aircraft) • Aufspüren und Bekämpfen von U-Booten und Schiffen (MPA) • Aufspüren, Empfangen und Aufzeichnen von elektronischen Aussendungen des Gegners auf allen Wellenlängen (SIGINT Signal Intelligence). SAR-Mittel 1. Grades
Triebwerk	2 x Turb. „Turmo III D-3“ (PTL-1RA) Tyne MK 21
Triebwerksleistung	2 x 4225 kW (ca. 5665PS)
Spannweite	37,22 m
Länge	31,75 m
Höhe	11,33 m
Startmasse	43,5 t
Dienstgipfelhöhe	30.000 ft
Maximales Fluggewicht	43,5 t
Reichweite bei max. Nutzmasse	1565 NM
Reichweite bei max. Treibstoff	4860 NM
Einsatzdauer	12,5 h
Geschwindigkeit beim Patrouillenflug	170 kn
Höchstgeschwindigkeit	350 kn
Bewaffnung	<ul style="list-style-type: none"> • Alle in der NATO eingeführten freifallenden Bomben • Wasserbomben • Bis zu acht zielsuchende Torpedos • Drahtgelenkte Luft-Schiff-Flugkörper

Die BR 1150 Atlantic ist ein Langstreckenflugzeug mit Druckkabine, zur bewaffneten Aufklärung auf hoher See. Der Besatzung steht eine umfangreiche elektronische Ausrüstung zur Verfügung. Zusätzlich sind Kameras an Bord, ein ausfahrbares Rundsuchradar, sowie Bojen zum Abwerfen am Fallschirm, die von der Wasseroberfläche aus mittels Ultraschall U-Boote orten und deren Position zum Flugzeug funken können.

Für den SAR-Einsatz ist das Lfz mit einem Infrarotnachtsichtgerät ausgerüstet.

19.4 Aérospatiale/DASA: C - 160D "Transall"



Teilstreitkraft	Luftwaffe
Besatzung	Kommandant (VLF), Luftfahrzeugführer (LFF), Taktischer Systemoffizier (TSO), Bordmechaniker (BM) und Luftfahrzeugladungsmeister (LLM)
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • Als Truppentransporter mit bis zu 93 vollausgerüsteten Soldaten • Zum Verwundeten- und Krankentransport mit bis zu 62 liegenden VuK • Absetzen von bis zu 80 Fallschirmjägern • Materialtransporte bis zu 16t • Absetzen von Lasten bis 13,8t im Flug aus jeder Höhe • Transport von Hilfsgütern im Rahmen humanitärer Einsätze (weltweit)
Triebwerk	2 x PTL – Triebwerke Rolls-Royce Tyne 20 MK 22
Triebwerksleistung	2 x 4549 kW (ca. 6100 PS)
Spannweite	40,00 m
Länge	32,40 m
Höhe	12,36 m
Startmasse	max 49 150 kg
Dienstgipfelhöhe	30.000 ft
Reichweite mit max. Nutzmasse	4500 km
Marschgeschwindigkeit	475 km/h
Höchstgeschwindigkeit	550 km/h
Bewaffnung	Keine

Die Transall C-160 ist ein Transportflugzeug für den mittleren Reichweitenbereich. Sie ist für Start und Landung auf kurzen Plätzen sowie behelfsmäßig vorbereiteten Pisten in schwierig anfliegbarem Gelände ausgelegt und für Lufttransport, Lastenabsetzen durch Ausziehschirm und durch Schwerkraft, Lastenabwerfen, Absetz-Sonderfälle, Personentransport, Absetzen von Fallschirmspringern und Verwundetentransport ausgerüstet.

19.5 Eurocopter (Bölkow) Bo-105M (VBH-1) / Bo-105P (PAH-1)



		BO105 M	BO105 P-1A / P-1A1
Teilstreitkraft		Heer	Heer
Verwendung		Aufklärungs- / Verbindungsflüge Verwundetentransport	Panzerabwehr
Besatzung		1 Pilot, max. 4 Passagiere	1 Pilot, 1 Kommandant zgl. Schütze
Maße	Länge über alles	11,868 m	11,868 m
	Höhe über alles	3,801 m	3,801 m
Masse	max. Startmasse	2300 kg	2500 kg
	Leermasse (trocken)	1459 kg	1694 kg
Triebwerke	Model	2 Allison 250-C20B	2 Allison 250-C20B
	Max. Startleistung	313 kW	313 kW
	Reiseleistung	276 kW	276 kW
Hauptrotor	Anzahl der Blätter	4	4
	Durchmesser	9,844 m	9,844 m
Geschwindigkeit	max. Geschwindigkeit	ca. 145 KIAS	ca. 130 KIAS
	Militär. Einsatzlimit	110 KIAS	110 KIAS
Reichweite		ca. 2,5 h	ca. 2 h
Bewaffnung	Art	Unbewaffnet	6 drahtgelenkte Lenkflugkörper HOT Zur Panzerabwehr
	Kampffernung		Bis 4 km

Bei den Waffensystemen BO 105M / BO 105P-1A / BO 105P-1A1 handelt es sich um leistungsgesteigerte Versionen des zivilen Hubschraubers Bo 105.

Die militärischen Versionen des Hubschraubers BO 105 wurden mit verstärkten Zellenstrukturen, leistungsgesteigerten Hauptgetrieben und bruchsaicheren Kraftstoffsystemen ausgerüstet. In den Versionen P-1A und P-1A1 wurden zusätzlich Waffenanlagen und zur Stabilisierung beim Waffeneinsatz, Gierregelanlagen für die Heckrotorsteuerung integriert. Bei der Version P-1A1 wurde die analoge Waffenanlage des P-1A durch eine digitale Waffenanlage ersetzt.

Bei der Konstruktion dieses Hubschraubers wurden veraltete anthropometrische Daten zugrunde gelegt, sodass sich für großgewachsene Piloten eine ergonomisch sehr ungünstige Sitzposition ergab. Auf Grund von Untersuchungen und daraus resultierenden Empfehlungen der Abt. IV FIMedInstLw konnte durch den Einbau modifizierter Sitze der Mangel teilweise behoben werden.

19.6 Bell UH-1D "Iroquois"



Teilstreitkraft	Heer / Luftwaffe
Besatzung	Zwei Piloten, Bordtechniker
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • Personal- und Materialtransporte • Verwundeten- und Krankentransporte mit Spezialrüstsatz • SAR-Aufgaben (Search and Rescue) • Unfallrettung von Schwerverletzten • Rettung von Personen aus Bergnot
Antrieb	1 x Lyc. T-33-L-13B
Triebwerksleistung	1044 kW (1400 PS)
Hauptrotordurchmesser	14,63 m
Rumpflänge	12,77 m
Höhe	3,60 m
Startmasse	4,3 t
Dienstgipfelhöhe	13.600 ft
Maximales Abfluggewicht	4.31 t
Größte Nutzlast	0,9 t
Marschgeschwindigkeit	110 km/h
Reichweite bei max. Nutzmasse	73 NM
Reichweite bei max. Treibstoff	724 NM
Bewaffnung	Keine

Die UH-1D, auch "Huey" und, wegen ihres charakteristischen Fluggeräuschs „Bundesteppichklopfer“ genannt, ist seit über 30 Jahren als Arbeitspferd der Lufte im Einsatz. Vor allem durch die Rettungseinsätze bei Unfällen im zivilen Straßenverkehr ist sie auch außerhalb der Bundeswehr wohlbekannt.

19.7 Sikorsky CH-53G "Stallion"



Teilstreitkraft	Heer
Besatzung	Zwei Piloten, Bordtechniker
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • Truppentransporte von bis zu 37 Soldaten • Personal und Materialtransport • Verwundeten- und Krankentransport mit Spezialrüstsatz von 24 VuK und vier LTB
Antrieb	2 x GE T-64-12 (GTW 2A-A)
Triebwerksleistung	je 2886 kW (3925 PS)
Hauptrotordurchmesser	22,02 m
Rumpflänge	20,47 m
Höhe	7,59 m
Startmasse	19,05 t
Maximale Zuladung	9,4 t
Dienstgipfelhöhe	14.100 ft
Marschgeschwindigkeit	130 kn
Reichweite bei max. Nutzmasse	162 NM
Bewaffnung	Keine

Die CH-53G, seit 23 Jahren bei der Bundeswehr, ist hauptsächlich zur schnellen Verlegung vollausgerüsteter Truppenteile bis in die unmittelbare Kampfzone gedacht. Über die Heckladerampe können leichte Rad- und Kettenfahrzeuge blitzschnell ein- und ausgeladen werden. Der Hubschrauber hat keine Druckkabine.

Da für den weltweiten Einsatz im Rahmen der UN eine größere Reichweite erwünscht ist, werden die Maschinen demnächst mit Zusatztanks beidseits an den Hauptfahrwerkskästen ausgerüstet.

19.8 GKN-WHL Sea King Mk. 41



Teilstreitkraft	Marine
Besatzung	Pilot, Copilot, Luftfahrzeugoperationsoffizier (LOPO), Bordmechaniker (Luftrettungsmeister)
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • SAR-Aufgaben (Search and Rescue) • Überwasserseekriegsführung (AsuW) • Einsatzunterstützung als integraler Bordhubschrauber (BHS) der EGV
Antrieb	Zwei Gasturbinen Gnome H1400-1
Triebwerksleistung	je 1141 kW (1500 PS)
Hauptrotordurchmesser	18,90 m
Rumpflänge	16,64 m, Gesamtlänge: 22,15 m
Höhe	5,13 m
Maximales Abfluggewicht	9,3 t
Marschgeschwindigkeit	110 kn
Dienstgipfelhöhe	14450 ft
Reichweite	550 NM
Bewaffnung	4 SeaSkua in AsuW-Rolle

Der Sea King wurde ursprünglich von Igor SIKORSKY für die US Navy zur bordgestützten U-Bootjagd konstruiert. „GKN Westland Helicopters“ besitzen seit 1959 Lizenzrechte. Es handelt sich um eine robuste, zuverlässige, sehr flugtüchtige und seetüchtige Konstruktion mit umfangreicher Instrumentierung und Autopilot. Er ist in 24 Ländern im Einsatz. Bei SAR-Einsätzen der Bundesmarine ist noch nie ein Sea-King abgestürzt.

19.9 Westland Sea Lynx Mk. 88



Teilstreitkraft	Marine
Besatzung	Pilot, Copilot, Sonaroperator
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • Aufspüren und Bekämpfen von U-Booten • Verbindungs- und Beobachtungsflüge
Triebwerk	2 x RR 360-17 (GTW 2A/R-A)
Triebwerksleistung	je 835 kW (1120 PS)
Hauptrotordurchmesser	12,80 m
Rumpflänge	11,92 m
Höhe	3,60 m
Startmasse	3,63 t
Dienstgipfelhöhe	12.000 ft
Marschgeschwindigkeit	125 kn
Reichweite bei max. Treibstoff	250 NM
Einsatzdauer	2 h (bei der U-Bootbekämpfung 50 nm abseits vom Mutterschiff ohne Hin- und Rückflug)
Bewaffnung	Zwei zielsuchende Torpedos als Außenlast

Der Sea Lynx ist auf den Fregatten der Bundesmarine als Bordhubschrauber stationiert. Er hält zurzeit den Weltgeschwindigkeitsrekord für Hubschrauber mit 216,34 kn.

Der Transport von Liegend-VuK ist zwar behelfsmäßig möglich, aber mangels Zulassung nur in Fällen übergesetzlichen Notstands vertretbar. Ein geeigneter Verwundetentransportrüstsatz wird von der niederländischen Marine entwickelt. Der Hersteller bietet eine spezielle SAR-Version an.

19.10 Boeing E - 3A (Sentry) (AWACS - Airborne Warning and Control System)



Teilstreitkraft	Gemeinsamer Betrieb durch mehrere NATO-Staaten unter Luxemburger Flagge
Besatzung	Pilot, Copilot, Bordingenieur, Navigator, 13 Radarflugmelder
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • Warning (Weiträumige Überwachung des Luftraums in allen Höhen zur Frühwarnung vor gegnerischen Luftangriffen unter Erfassung auch tiefstfliegender Maschinen) • Control (Erstellung der gesamten Luftlage und Heranführung eigener Kräfte an den Gegner; Lenkung fliegender Kampfverbände abseits von eigenen bodengestützten Radareinrichtungen)
Triebwerk	4 x P + W TF-33-PW-100/100 A (ZTL 2A-A)
Triebwerksleistung	je 93,4 kN
Spannweite	44,42 m
Rumpflänge	46,61 m
Höhe	12,73 m
Startmasse	147,42 t
Dienstgipfelhöhe	38.500 ft
Reichweite bei max. Treibstoff	870 NM
Einsatzdauer	5 h (Einsatzdauer in 870 nm Entfernung vom Stützpunkt)
Maximale Flugdauer	72 h (mit mehreren Luftbetankungen)

Die E-3 ist eine Boeing 707 mit einer pfannkuchenförmigen Radarantenne von 30 ft Durchmesser, die sich 11 ft über dem Rumpfrücken sechsmal pro Minute dreht. Im Rumpf befindet sich eine umfangreiche tonnenschwere Elektronikausrüstung zur vollautomatischen Erfassung und Klassifizierung der Flugziele, Digitalisierung der Daten und deren Austausch mit anderen Flugzeugen und Bodenstationen.

Ab 1996 erhalten alle Maschinen zusätzlich die Fähigkeit, auch einzelne Fahrzeuge und Schiffe am Boden zu erfassen. Dabei wird die Anzahl der Arbeitsplätze an Bord nicht erhöht.

19.11 Airbus Industrie A 310-304



Teilstreitkraft	Luftwaffe
Besatzung	Pilot, Copilot
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • VIP – Transport von Persönlichkeiten des nationalen/internationalen politisch-parlamentarischen Bereichs (Lfl mit je 91 Sitzplätzen) (107 Personen) • Weltweite Personal- und Materialtransporte (max. 214 Passagiere) • VUK-Einsätze (6 verschiedene VuK-Versionen sind einrüstbar)
Antrieb	Zwei Zwei-Wellen-Front-Fan-Strahltriebwerke
Triebwerksleistung	je 235,8 kN (je 53.000 lbs)
Spannweite	43,90 m
Rumpflänge	46,43 m
Höhe	15,80 m
Maximale Nutzlast	Pax-Version: 22.000 kg; Cargo-Version: 32.000 kg
Maximales Abfluggewicht	157 t
Maximales Landegewicht	124 t
Marschgeschwindigkeit	465 kn (862 km/h)
Reichweite	5400 NM (10.000 km mit 214 Passagieren und Gepäck)

Der A310-304 ist ein Mittelstrecken-Großraumflugzeug aus der Airbus-Familie. Es können Personen, Fracht oder beides gemischt transportiert werden. Die Druckkabine ermöglicht es bis auf 20.000 ft den Normaldruck zu halten.

Er ist mit modernsten Bordcomputern ausgerüstet, die den technischen Zustand des Flugzeugs laufend überwachen. Sämtliche Luftstraßen und Flugplätze der Welt können einprogrammiert werden. Dadurch werden der Bordingenieur und der Navigator eingespart.

Zu den drei Ex-„Interflug“-Maschinen hat die Luftwaffe von der Lufthansa noch vier weitere gebrauchte Exemplare übernommen.

Ein variabler Rüstsatz zum VuK (Verletzten-und Kranken-) Transport ist im Einsatz. Versionsabhängig können bis zu 125 Sitzend-Verwundete, bis zu 56 Liegend-Leichtverwundete und zusätzlich bis zu sechs Schwerverwundete unter Intensivmedizinischer Betreuung einschließlich des benötigten San-Personals aufgenommen werden.

19.12 Bombardier (Canadair) C1-601 "Challenger"



Teilstreitkraft	Luftwaffe
Besatzung	Pilot, Copilot, ein LTB, drittes Besatzungsmitglied
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • Flüge für politischen und parlamentarischen Bereich • Transport von Verletzten und Kranken • Kurier und Verbindungsflüge
Antrieb	Zwei Strahltriebwerke mit Schubumkehrinrichtung
Triebwerksleistung	2 x 38,5 kN
Spannweite	19,60 m
Rumpflänge	20,86 m
Höhe	6,20 m
Maximale Nutzlast	2,23 t
Maximales Abfluggewicht	20,3 t
Maximales Landegewicht	16,33 t
Marschgeschwindigkeit	442 kn
Dienstgipfelhöhe	41.000 ft
Reichweite	2800 NM (mit voller Treibstoffmenge und fünf Passagieren)

Der Challenger ist ein Verbindungsflugzeug für 16 Personen. Er hat besonders lärmarme Triebwerke mit einem Startlärmpegel von 80 dB nach FAR Part 36. Die Druckkabine hält einen Differentialdruck von 620 mbar.

Ein MedEvac-Rüstsatz ermöglicht Ambulanzflüge mit einer VuK unter intensivmedizinischer Betreuung.

19.13 LET L-410-S-UVP "Turbolet"



Teilstreitkraft	Luftwaffe
Besatzung	Zwei Piloten, ein(e) Lufttransportbegleiter(in), acht Passagiere
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • Transport auf Kurz- und Mittelstrecken • Eilige Personal- und Materialtransporte
Triebwerk	2 x M-601 (PTL 2A/R-A)
Triebwerksleistung	Je 544 kW (730 PS)
Spannweite	19,48 m
Rumpflänge	14,47 m
Höhe	5,83 m
Startmasse	5,4 t
Dienstgipfelhöhe	26.250 ft
Marschgeschwindigkeit	162 kn bis 197 kn
Reichweite bei max. Treibstoff	650 NM

Die Let 410 ist ein Verbindungsflugzeug tschechischer Bauart. Sie kann auch von Gras- oder Schotterpisten aus operieren. Alle Bordsysteme sind temperaturfest von -50°C bis +45 °C. Von der ehemaligen NVA wurden vier Maschinen übernommen.

2 Lfz werden voraussichtlich bis 2005 durch die Luftwaffe genutzt; 2 Lfz wurden zum 31.12.1999 ausgesondert und durch die VEBEG veräußert.

Nach der Reduzierung von vier auf zwei Maschinen werden Flüge nur noch im Bereich der Luftwaffe durchgeführt.

19.14 Dornier Do 228



Teilstreitkraft	Marine
Besatzung	<ul style="list-style-type: none"> • Pilot, Copilot und max. 19 Passagiere (LT) • Pilot, Copilot, Operator (LM)
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • Erprobungsträger für verschiedene Aufgaben • Fracht-, Passagiertransport, VIP-Beförderung • Luftüberwachung Meeresverschmutzung. Erkennen u. Klassifizierung von schädlichen Chemikalien, Müll, Mineralprodukten, Luftverunreinigungen und biogenen Substanzen
Antrieb	Zwei Garret turboprop TPE 331 Triebwerke
Triebwerksleistung	2 X 524 kW (ca. 715 PS)
Spannweite	16,97 m
Rumpflänge	16,56 m
Höhe	4,86 m
Maximale Nutzlast	2,2 t
Maximales Abfluggewicht	6,4 t
Maximales Landegewicht	6,1 t
Marschgeschwindigkeit	Max. 234 kn (ca. 434 km/h)
Dienstgipfelhöhe	13.000 ft
Reichweite	455 nm (ca. 845 km) Passagierversion

Das Flugzeug Dornier 228 ist ein Kleintransportflugzeug, das für verschiedene Einsatzaufgaben, wie z. B. Passagiertransport, Frachtbeförderung, Überwachungsaufgaben über Land und See, Luftbildaufnahmen, Erprobungsträger u.a. geeignet ist. Der Hersteller ist Fa. Fairchild Dornier.

Es ist ein zweimotoriges Turboprop Luftfahrzeug (Lfz), als Schulterdecker mit einziehbarem Dreibeinwerk, ohne Druckkabine.

Vom Dezember 1987 bis März 1998 wurden 5 Luftfahrzeuge bei der Bundeswehr eingeführt. Davon fliegt ein Lfz bei der WTD 61 in Manching und die restlichen 4 Lfz beim MFG 3 in Nordholz.

Das Lfz (Baureihe Do 228-201), das bei der WTD 61 seit Dezember 1987 eingesetzt ist, wird als Erprobungsträger für die verschiedensten Aufgaben genutzt.

Die vier Lfz des MFG 3 stammen aus der Baureihe Do 228-212. Hiervon sind je zwei Lfz als LM-Version (Luftüberwachung Meeresverschmutzung) und als LT-Version (Lufttransport) ausgelegt.

19.15 Eurofighter EF-2000 „Typhoon“



Teilstreitkraft	Luftwaffe
Besatzung	Ein Pilot
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • Wie beim WS "Phantom II"
Antrieb	2 Eurojet EJ200 Afterburning Turbofans
Triebwerksschub	2 x 89 kN
Spannweite	10,50 m
Rumpflänge	15,96 m
Höhe	5,29 m
Maximales Startgewicht	23 t
Höchstgeschwindigkeit	> 1,8 Mach (in großer Höhe)
Winkelbeschleunigung	> 9 G _z
Aktionsradius	300 NM
Anfangssteiggeschwindigkeit	60.000 ft/min
Dienstgipfelhöhe	60.000 ft
Bewaffnung	<ul style="list-style-type: none"> • Eine 27 mm Maschinenkanone, eingebaut im Rumpf • bis zu acht zielsuchende Luft-Luft-Flugkörper.

Der Eurofighter ist ein Jagdflugzeug neuester Technologie. Er hat keine natürliche Flugstabilität mehr. Der Geradeausflug ist nur noch über Flugregelcomputer möglich. Es existieren keine Steuerseile und -stangen mehr. Die Steuerung erfolgt nur über Eingaben in die Flugregelcomputer, die sie mit dem gegenwärtigen Flugzustand vergleichen. Daten über Flughöhe, Luftdichte, Anstellwinkel, aktuellen Beladezustand, u.v.m. fließen in die Berechnung ein und werden in elektronische Steuerbefehle umgesetzt. Diese werden in einem vierfach redundanten Computersystem erzeugt und über abgeschirmte Leitungen zu den Rudern, die hydraulisch betätigt werden, übertragen.

Durch diese Merkmale erzielt man eine besonders große Wendigkeit, wodurch der EF 2000 den heute eingesetzten Flugzeugtypen überlegen ist. Damit der Pilot den dabei auftretenden G-Kräften standhalten kann, trägt er eine neuartige Anti-G-Bekleidung, die von den Zehenspitzen bis hin zum Hals reicht. Der EF 2000 wird zurzeit bei der Wehrtechnischen Dienststelle 61 in Manching erprobt.

19.16 Eurocopter PAH 2 UH „Tiger“



Teilstreitkraft	Heer
Besatzung	Pilot, Bordschütze
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • Panzerjagd • Begleitschutz für Fahrzeugkolonnen auf dem Marsch durch Feindgebiete
Antrieb	2 MTR 390
Triebwerksleistung	je 958 kW (1285 PS)
Durchmesser des Hauptrotors	13,00 m
Rumpflänge	14,00 m
Höhe	5,0 m
Maximales Abfluggewicht	6,1 t
Max. Auslegungsgeschwindigkeit	161 kt
Maximale Steiggeschwindigkeit	10,7 m/s
Typische Missionsdauer	2 h, 30 min
Bewaffnung	<ul style="list-style-type: none"> • Acht Panzerabwehr-Lenkflugkörper (HOT/PARS 3) • vier zielsuchende Luft-Luft-Lenkflugkörper (STINGER) • Kanonen Pod • Ungelenkte Raketen

Der „Tiger“ ist praktisch vollständig aus faserverstärkten Kunststoffen aufgebaut. Selbst die Panzerplatten der Rücken- und Sitzpanzerung, sowie die Rotorblätter bestehen aus nichtmetallischen Werkstoffen. Lediglich die Triebwerke, Fahrwerksbeine, Scharniere, Kabinenhaubenrahmen und andere hochbelastete Teile sind noch aus Metall.

Alle Flugdaten werden auf vier LCD-Bildschirmen angezeigt. Es sind nur noch wenige herkömmliche Zeigerinstrumente für den Notfall vorhanden.

Durch eine besonders griffgünstige Position der "Collective" und "Cyclic"-Hebel konnte die Arbeitshaltung des Piloten wesentlich verbessert werden.

Zum Schutz gegen Blitzschlag und elektromagnetische Störstrahlung sind große Teile des Rumpfs mit einem Kupfer-Bronze-Gitter überzogen.

19.17 NATO-Hubschrauber: NH-90



Teilstreitkraft	Heer/Luftwaffe/Marine	
Besatzung	LTH 2 Piloten, NFH 1 Pilot + TACCO; weitere Besatzungsmitglieder je nach Einsatzart	
Einsatzarten	<ul style="list-style-type: none"> • Transport von Personal und Material • Absetzen vollausgerüsteter Trupps von 14 Fallschirmjägern • Einsätze im Rahmen von Katastrophen- und Umweltschutz • Verwundeten- und Krankentransport • CSAR/SAR-Aufgaben • Bordgestützte U-Bootabwehr und Schiffsbekämpfung 	
Antrieb	Zwei RTM 322-01	
Triebwerksleistung	2.106 kW	
Durchmesser des Hauptrotors	16,3 m	
Rumpflänge	19,6 m ungefaltet; 13,64 m gefaltet	
Höhe	5,23 m	
Maximales Abfluggewicht	LTH ca. 9,5 t; NFH ca 10 t, max 10,6 t	
Größte Nutzlast	Ca. 3,2 t – 3,5 t LTH	
Marschgeschwindigkeit	260 km/h, max 284 km/h	
Dienstgipfelhöhe	12.000 ft	
Max. Reichweite	ca. 1100 km	
Bewaffnung	<ul style="list-style-type: none"> • Chaff / Flare • Rüstsatz balistischer Schutz LTH • Bord MG LTH • SAR-Signalmittel LTH / SAR • Luft-Luft LK LTH / SAR • Leichtgewicht-Torpedo NFH • Markierungs- / SAR-Signalmittel NFH • Bojen / Überwasser FK 	

Der NH 90 ist eine gemeinschaftliche Entwicklung von Frankreich, Italien, der Niederlande und Deutschland. Er besteht fast vollkommen aus Kunststoff, was wesentliche Gewichtseinsparungen, sowie höhere Lebensdauer bringt. Durch eine ergonomische Cockpitgestaltung in Verbindung mit modernsten Flugführungssystemen soll erreicht werden, dass er auch unter Instrumentenflug- und

Schlechtwetterbedingungen von einem einzelnen Piloten geflogen werden kann. Wegen seiner Größe ist er allerdings für Primäreinsätze im Rettungsdienst ungeeignet. Der Erstflug hat am 18.12.1995 stattgefunden.

19.18 Weiterführende Literatur

Aviation Week & Space Technology. New York, 1996

Die Geschichte der Luftfahrt. Time-Life Books B.V., Time Incorporated U.S.A., 23 Bände, 1982

Dierich W. Das große Handbuch der Fliegerei. Motorbuch Verlag Stuttgart, 5. Auflage, 1975

Riedner, M. Faszination Fliegen 100 Jahre Luftfahrt. Motorbuch Verlag Stuttgart, 1. Auflage, 1991

Wood, D. Jane's World Aircraft Recognition Handbook. Second Impression Butler and Tanner Limited, Frome, Somerset, 1990

20 WISSENSWERTES AUS DER (MILITÄR-) FLIEGEREI

20.1 Einführung

Der angehende Fliegerarzt ist in einem fliegenden Verband tätig, dessen Strukturen und Einrichtungen ihm ebenso bekannt sein müssen, wie die Luftfahrzeuge selbst, in denen „seine“ Piloten fliegen. Erst Kenntnisse über zahlreiche fliegerische Gegebenheiten befähigen ihn, sein flugmedizinisches Wissen situationsgerecht anzuwenden. Deshalb soll er sich auch selbst, wo immer es ihm möglich ist, mit der fliegerischen Praxis vertraut machen. Dieser Beitrag ist für den angehenden Fliegerarzt geschrieben; er soll nicht nur informieren, sondern auch Interesse nach Vertiefung in das Detail wecken; er soll als ein kleiner Einblick den in der Fliegerei noch Unerfahrenen verdeutlichen, wie komplex das Zusammenspiel vieler Faktoren für ein sicheres Fliegen ist.

Zunächst sollen die Einrichtungen eines Flugplatzes vorgestellt werden. Die Schilderung des Verlaufs eines Fluges, in Fliegersprache abgefasst und illustriert, kann das eigene fliegerische Erleben nicht ersetzen, gewährt aber vielleicht einen Einblick in den Umfang von Auftrag, Planung und Durchführung eines Fluges von „nur“ einer Stunde Flugdauer. Dass die Freiheit über den Wolken nicht grenzenlos ist, zeigt ein kleiner Einblick in die Flugregeln.

Moderne Cockpits von Flugzeugen überwältigen den Nichtflieger in ihrer Vielfalt von Instrumenten, Lichtern und Schaltern. Mit dem Abschnitt „Kleine Instrumentenkunde“ soll eine Orientierungshilfe gegeben werden. Ein Blick in für unterschiedliche Luftfahrzeugtypen repräsentative Cockpits soll diesen Einblick vervollständigen. Auch wenn der Hubschrauber schon seit nunmehr drei Jahrzehnten seinen festen Platz im Luftraum hat, geben Steuerung, Technik und insbesondere Verhalten bei Motorausfall dem Laien noch vielfach Rätsel auf. In kurzgefasster Form soll in diesem Abschnitt Abhilfe geschaffen werden. Dieser Anhang wäre unvollständig, wenn nicht die herausragenden Leistungen der „Engel der Luft“, der SAR-Besatzungen, skizziert würden. Abschließend werden häufig gebrauchte Abkürzungen und Vokabeln aus dem Gesamtbereich „Fliegerei“ aufgeführt.

20.2 Der Flugplatz

20.2.1 Ein Flugplatz und seine Einrichtungen

Den wichtigsten und auch flächenmäßig größten Bereich eines Flugplatzes (*Abb. 18.1*) stellt der **Flugbetriebsbereich** (flight line) dar. Er unterteilt sich in Roll- und Vorfeld. Das Rollfeld (maneuvering area) ist der Teil eines Flugplatzes, der für den Start, die Landung sowie für das Rollen bzw. den Schwebeflug von Luftfahrzeugen benutzt wird.

Es besteht aus der **Start- und Landebahn** (runway, abgekürzt: RWY), deren nutzbarer Bereich markiert bzw. für den Nachtflug befeuert ist. Am Anfang und Ende befindet sich der „overrun“, eine befestigte Verlängerung für den Notfall! Dem gleichen Zweck dienen „die Schultern“ rechts und links der Start- und Landebahn. Mindestens an einem Ende ist eine Hakenfanganlage (arresting gear) installiert, in die Luftfahrzeuge mit ausgefahrenem Fanghaken (arresting hook) rollen, wenn sie aus technischen Gründen nicht auf der vorgesehenen Bahn zum Stillstand gebracht werden können (z.B. Versagen der Bremsen, Versagen des Bremsschirms, Startabbruch). Die als „Zebrastreifen“ markierte Schwelle stellt den frühestmöglichen sicheren Aufsetzpunkt (threshold) dar. Die Bahnrichtung wird gemessen in magnetisch Nord mit den ersten beiden Ziffern der Himmelsrichtung in Grad angegeben (z.B. 09/27 - Richtung Ost/West). Zu der Startbahn führen **Rollwege** (taxiways) mit diversen Zwischenabzweigungen (intersections). Die Grenze zwischen Startbahn und Rollweg ist der

Rollhaltepunkt (holding position). Bis hierher gilt die durch den Tower erteilte Rollfreigabe. Für das Rollen auf die Startbahn bedarf es einer weiteren Freigabe.

- | | | | | |
|-------------------------|-------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|
| 1. Wache | 6. Schutzbauten für Flugzeuge | 11. Flugabfertigung | 16. Wartung Schleudersitze und Fallschirme | 21. Propellerflugzeuge |
| 2. Instandsetzungshalle | 7. Feuerlöschübungsbecken | 12. Endanflugkontrolle | 17. Lärmschutzhalle | 22. Start- und Landerichtung |
| 3. Treibstofflager | 8. SAR Hubschrauber | 13. Feuerwehr | 18. Materiallager | 23. Flugzeugfanganlage |
| 4. Kampfflugzeuge | 9. Fliegerarzt | 14. Hubschrauberlandeplatz | 19. Kantine | 24. Rollhaltepunkt |
| 5. Alarmflugzeuge | 10. Kontrollturm | 15. Triebwerkprüfstand | 20. Staffelfeld | |

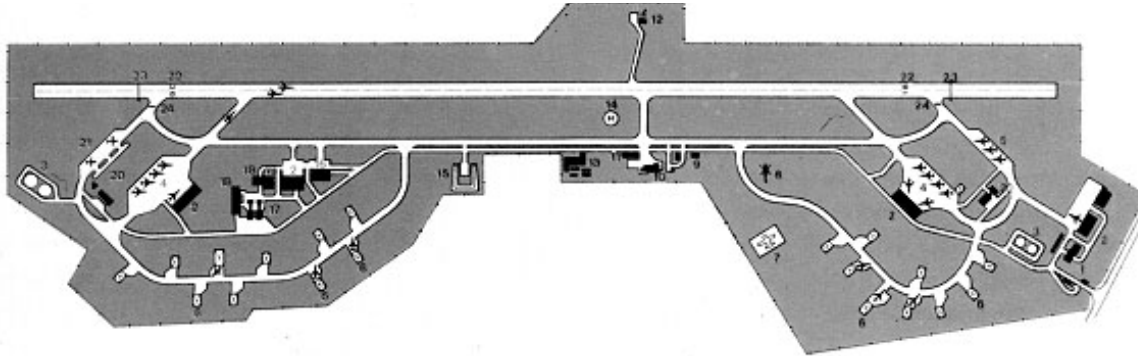


Abb. 20.1: Ein Flugplatz und seine Einrichtungen

Das Vorfeld (apron) ist der Teil des Flugplatzes, der die Abstellplätze, Abbrems-, Justier- und Kompensierplätze sowie Hallenvorfelder umfasst und der zur Be- und Entladung, Betankung, Wartung und dem Abstellen von Luftfahrzeugen dient. Die Flugzeugschutzbauten werden shelter genannt.

Im gesamten Flugbetriebsbereich ist das Tragen von Kopfbedeckungen verboten, weil wie auch bei sonstigen herumliegenden Gegenständen die Gefahr besteht, dass diese z.B. in ein Triebwerk eingesaugt werden (FOD - foreign object damage) und so erheblichen Schaden verursachen könnten.

20.2.2 Der Flugplatz-Kontrollturm (aerodrome control tower - TWR)

hat im Allgemeinen folgende Aufgaben:

- Zusammenstöße zwischen Luftfahrzeugen in der Luft und auf dem Rollfeld der Flugplätze zu verhindern;
- Zusammenstöße zwischen Luftfahrzeugen und anderen Fahrzeugen sowie sonstigen Hindernissen auf dem Rollfeld zu verhindern;
- einen raschen und geordneten Ablauf des Flugverkehrs unter Vermeidung von unnötigem Fluglärm zu gewährleisten.

Auf mehreren veröffentlichten Frequenzen erteilt er über Funk Luftfahrzeugen und Kraftfahrzeugen Informationen und Flugverkehrsfreigaben (clearances) und Fahrerlaubnisse bzw. -verbote.

Das Personal ist nicht nur für den sicheren und reibungslosen Verkehr am Flugplatz selbst, sondern auch für den in der Flugplatzkontrollzone verantwortlich.

Für den Fall, dass der Funksprechverkehr ausfällt oder nicht zustande kommt, steht eine Lichtkanone zur Verfügung, mit der nach international gültigen Richtlinien grüne, rote und weiße Lichtsignale gegeben werden können.

Das Betreten und Befahren des Rollfeldes ist nur mit Genehmigung des TWR gestattet!

20.2.3 Die (Flugplatz-) Anflugkontrolle (GCA - Ground Controlled Approach)

Die Anflugkontrolle arbeitet eng mit dem Flugplatzkontrollturm (TWR) zusammen. Sie ist bei Luftfahrzeugen, die nach Instrumentenflugregeln fliegen, für einen sicheren Anflug nach Übergabe von der zuständigen Bereichskontrolle sowie einen sicheren Abflug bis zur Übernahme der zuständigen Bereichskontrolle verantwortlich. GCA überwacht außerdem den Flugverkehr innerhalb vorgegebener Platzrunden. Ebenfalls werden von GCA TACAN-, VOR- und NDB-Anflugverfahren (also autonome Anflüge nach Instrumentenflugregeln), per Radar überwacht.

Abweichungen von den vorgeschriebenen An- und Abflugverfahren werden den Luftfahrzeugführern unverzüglich mitgeteilt.

Sollten bei Sichtanflügen Wetterbedingungen angetroffen werden, die unterhalb der vorgegebenen Wettermindestbedingungen für den Sichtflug liegen, führt GCA ebenfalls eine „GCA recovery“ durch, d.h., GCA übernimmt umgehend die Anflugkontrolle, damit nach Instrumentenanflugverfahren der Anflug bis zur Landung fortgesetzt werden kann. Bei Bedarf führt GCA ein sog. „Vectoring“ bzw. „Radar Guidance“ durch. Darunter versteht man die Streckenführung innerhalb des Sendeempfangsbereichs per Richtungsanweisungen, die sich aus der Radarposition des Luftfahrzeuges ergeben.

Schließlich übernimmt GCA den Präzisionsinstrumentenanflug. Nachdem das Luftfahrzeug mit Hilfe des Suchradars (search radar) bis zum Gleitpfad (Glide slope) auf der verlängerten Mittellinie der Landebahn geführt wurde, übernimmt das Präzisionsanflugradar (PAR) die Anflugkontrolle mit dem „talk down“, d.h. dem Luftfahrzeugführer werden ständig Informationen über seine Position auf dem Gleitpfad (glide slope) und der Mittellinie (center line) über Sprechfunk gegeben mit der Aufforderung zur Korrektur, bis der Luftfahrzeugführer bei Erreichen der vorgegebenen GCA-Minima die Landung nach Sicht eigenverantwortlich übernimmt. Für die Kontrolle am Boden ist dann der Kontrollturm zuständig.

20.2.4 Der Gefechtsstand

Der Geschwadergefechtsstand (wing operations center, abgekürzt: Wing Ops oder WOC) stellt bei Einsatzverbänden die Kommando- und Operationszentrale eines fliegenden Verbandes dar. Hauptaufgabe ist die Koordinierung und Überwachung aller fliegerischen Vorhaben. Das geschieht durch eine enge Zusammenarbeit mit den Einsatzoffizieren der fliegenden Staffeln, mit der technischen Einsatzsteuerung, der geophysikalischen Beratungsstelle, den Dienststellen der Flugsicherung und dem Flugsicherheitsoffizier (FSO).

Zusätzlich sorgt der Gefechtsstandoffizier (OvG) für die Überwachung der Gefechtsstandarbeit, insbesondere im Hinblick auf die Aktualisierung aller Übersichten. Dazu gehört die Aufzeichnung von Start- und Landemeldungen von geschwadereigenen Flugzeugen auf Übersichtstafeln sowie das Führen von Übersichten über die Verfügbarkeit von fliegendem Personal und Flugzeugen. Der Geschwadergefechtsstand erteilt den einzelnen Staffelgefechtsständen (Squadron Operations oder abgekürzt: Squad Ops) Einzelaufträge, deren Ausführung jederzeit aus Übersichten erkennbar ist. Der jeweilige Einsatzoffizier (EO, auch „Einsetzer“ genannt) erteilt die Flugaufträge an die einzelnen Besatzungen in Abgleichung an das zu erfüllende TCTP (Tactical Combat Training Program).

20.2.5 Die Flugabfertigung (Base Operations)

(abgekürzt: Base Ops)

Ein sicherer Flugbetrieb wäre ohne das Sammeln, Bearbeiten und Weitergeben wichtiger Flugdaten gar nicht möglich. Die Flugabfertigung nimmt diese Aufgaben wahr. Hier die wichtigsten:

- Luftfahrt Daten aus dem In- und Ausland, die für eine sichere, geordnete und flüssige Durchführung von Flügen notwendig sind, zu sammeln, auszuwerten, zu bearbeiten, zu ordnen und verfügbar zu halten (NOTAM-Dienst; NOTAM = Notices to Airmen)
- Flugberatungen durchzuführen
- Flugpläne sowie alle anderen damit in Zusammenhang stehenden Meldungen entgegenzunehmen, zu prüfen, zu bearbeiten und weiterzuleiten
- die örtlichen Flugsicherungs-Kontrollstellen bei der Abwicklung des Flugbetriebes zu unterstützen
- in bestimmten Fällen die Flugüberwachung durchzuführen
- NOTAMS, die den eigenen Platz betreffen, abzufassen, weiterzuleiten und zu überwachen
- Flugdaten über das Flugsicherungs-Fernschreibnetz (FSFschrN) in FS-Rechner einzugeben
- Meldungen über abweichende Angaben in Luftfahrtveröffentlichungen (sog. „post flight infos“) entgegenzunehmen
- Flugalarmdienst durchzuführen
- die Pass- und Zollkontrolle auf dem eigenen Flugplatz entsprechend den Bestimmungen des Militärischen Luftfahrthandbuches Deutschland durchzuführen
- Piste(n) und Rollwege vor Beginn des Flugdienstes auf Fremdkörper zu überprüfen und deren Beseitigung zu veranlassen, falls örtlich nicht anders geregelt
- die Flugplatzbefeuerungsanlage auf deren einwandfreien Betrieb zu überprüfen und die festgestellten Mängel zu melden, falls örtlich nicht anders geregelt

20.2.6 Die Geophysikalische Beratungsstelle (Wetterberatung)

führt den geophysikalischen Beobachtungs- und den Beratungsdienst für Flugplanung und Flugeinsatz des Verbandes durch. Das Fachpersonal ist dafür im Wechselschichtdienst eingesetzt und nimmt folgende Aufgaben wahr:

- Flugwetterberatung für Strecken und Aktionsräume
- Vortrag der geophysikalischen Lage in Form von Wetterbriefings
- Geophysikalische Beratung für Vorhaben im Rahmen der Aufgaben der Bundeswehr
- Wetterwarndienst (für Dienststellen, Verbände und Einheiten der Bundeswehr zum Schutz von Menschen und Material im Rahmen ihres Auftrages)
- Messung und Auswertung geophysikalischer Parameter
- Austausch von geophysikalischen Meldungen und Beratungsunterlagen über Draht und Funk

20.2.7 Die Einsatzsteuerung

ist die zentrale Führungsstelle im technischen Bereich, gehört also nicht mehr zur Fliegenden Gruppe, sondern zur Technischen Gruppe. Sie steuert, koordiniert und überwacht

- alle technischen Maßnahmen für den Luftfahrzeugeinsatz sowie den Einsatz des Instandhaltungspersonals bei Störfällen an Luftfahrzeugen
- den Einsatz des Bodendienstgerätes einschließlich der Fahrzeuge für den Transport von technischem Personal, Material und den Einsatz der Schleppfahrzeuge
- erstellt die von ihr geforderten Meldungen, z.B. Einsatzbereitschaftsmeldungen = „Klarstandsmeldungen“.

20.2.8 Das Cross-Servicing

erfüllt u.a. folgende Aufgaben:

- Durchführung des „turn arounds“ von Flugzeugen aller Muster und jeglicher Nationalität. Darunter versteht man die Wartung platzfremder Luftfahrzeuge nach der Landung durch Versorgung mit Betriebsmitteln wie Kraftstoff, Hydraulikflüssigkeit, Schmierstoffe, Atemsauerstoff etc.
- militärische Absicherung, soweit es Luftfahrzeugmuster oder militärische Lage erfordern

20.2.9 Das „R + S“-Lager

Innerhalb der Staffelnbereiche gibt es die R + S-Lager, in denen die Rettungs- und Sicherheitsausrüstung gelagert, ausgegeben, gewartet und geprüft wird.

Diese persönliche Ausstattung (vgl. hierzu Kap. 7) wird je nach Flugauftrag an die Besatzung(en) ausgegeben. Im Einzelnen sind dies die Sauerstoffmasken (sie müssen monatlich einmal aktenkundig an einem Prüfgerät auf Dichtigkeit geprüft werden), die Fliegerschutzhelme, die Überlebenswesten Land, Schwimmwesten, die Anti-G-Hosen, Fallschirme und anderes für Rettung und Sicherheit vorgesehene Gerät, so auch die Kälteschutzanzüge, ABC-Ausrüstung usw..

20.2.10 Die Flugplatzfeuerwehr

Die Flugplatzfeuerwehr muss auf jedem (militärischen oder zivilen) Flugplatz ständig einsatzbereit sein. Sie dient in erster Linie der Sicherheit im Flugbetrieb. Zu diesem Zweck befindet sich während der Öffnungszeit des Flugplatzes (Flugbetriebszeit) jeweils ein Löschfahrzeug an beiden Enden sowie in der Mitte einer Start-/ Landebahn mit der Besatzung in Sitzbereitschaft. Die Besatzung besteht aus der eigentlichen Löschcrew und dem Retter, der für seine besondere Aufgabe am unmittelbaren Brandherd einen Feuerschutzanzug trägt.

Folgende Fahrzeugtypen stehen normalerweise zur Verfügung:

- Wasser-Schaumfahrzeug mit bis zu 8000 Liter Volumen
- Pulverfahrzeuge mit ca. 3000 kg Pulver als Beladung
- kombinierte Löschfahrzeuge mit einer Kapazität von 3500 Litern Wasser und 750 kg Pulver

Die Wasserschaumfahrzeuge verfügen über ein Wenderohr auf dem Dach. Je nach Bedarf können 2000 Liter bzw. 4000 Liter pro Minute mit 70 m Wurfweite zum Brandherd befördert werden. Bei Bedarf kann die Feuerwehr die Landebahn für eine evtl. Bauchlandung zur Vermeidung von Funkenflug einschäumen. Der Retter ist speziell für die Bergung der Besatzung von verunglückten Luftfahrzeugen ausgebildet, z.B. Öffnen des Kabinendachs, Sichern des Schleudersitzes, Abstellen der Triebwerke, Öffnen des Gurtzeugs und schließlich Befreiung der Besatzung, wenn sie selbst durch Verletzung dazu nicht in der Lage ist.

Darüber hinaus dient die Feuerwehr auch dem Objektschutz auf einem Flugplatz.

20.2.11 Der Fliegerarzt

Der Fliegerarzt eines Fliegerhorstes übt eine Doppelfunktion aus. Zum einen ist er der persönliche Berater des Verbandsführers eines fliegenden Verbandes in Fragen der Flugmedizin und Wehrhygiene. Er ist wegen dieser wichtigen Funktion dem Verbandsführer (Kommandore) direkt unterstellt.

Zum anderen ist er der „Hausarzt“ des fliegenden Personals, also aller Besatzungsangehörigen, und auch des Flugsicherungspersonals. Er übt diese Tätigkeit mit viel Sachverstand und Einfühlungsvermögen aus, da seine Patienten ihn nicht nur bei körperlichen Beschwerden aufsuchen, sondern sich in einem engem Vertrauensverhältnis bei Bedarf auch in sehr persönlichen Fragen und Problemsituationen an ihn wenden.

Körperliche und seelische „Fitness“ sind nämlich eine wesentliche Voraussetzung für eine sichere Flugdurchführung. Um seiner Aufgabe gerecht zu werden, bedarf es genauer Kenntnis des fliegerischen Umfeldes. Deshalb ist der Fliegerarzt nicht nur zur aktiven Teilnahme am Flugdienst verpflichtet, sondern er sucht auch gern seinen „zweiten Arbeitsplatz“, die flight-line, auf, um im engen Kontakt mit „seinen“ Fliegern zu bleiben.

Schließlich ist der Fliegerarzt auch das Bindeglied zwischen dem FIMedInstLw und den fliegenden Besatzungen vor Ort.

20.3 Der Ablauf eines Fluges (IFR)

Diese Darstellung eines Instrumentenfluges soll dem fliegerisch Unerfahrenen einen Eindruck von Umfang und Durchführung eines Flugauftrages vermitteln.

Da die „Fliegersprache“ häufig eine Mixtur aus englischen Vokabeln und der eigenen Muttersprache ist, werden einzelne Abläufe bewusst im Originalwortschatz, jedoch mit den nötigen Erklärungen geschildert.

Als Beispiel wurde ein Flug von Memmingen nach Schleswig mit einem Tornado gewählt. Begleiten wir also Hptm X (Pilot) und OL Y (WSO) bei ihren Flugvorbereitungen, dem Flug selbst und nach der Landung am Zielflugplatz (destination).

20.3.1 Der Flugauftrag

Die Besatzung hat von ihrem Einsatzoffizier (EO) im Staffelfechtstand den Flugauftrag erhalten, gem. TCTP (Tactical Combat Training Program) mit dem Tornado (Taktische Nr. GAF ✕ 4501, Rufzeichen ME 15, gesprochen mike-echo-one-five), von Memmingen nach Schleswig im Instrumentenflug zu fliegen.

20.3.2 Die Flugvorbereitung

Die erste Überlegung der Crew zur Flugvorbereitung ist, ob der Flug seitens des Flugwetters durchführbar ist. Der Augenschein, in diesem Fall ein herrlicher Sommertag in Memmingen, kann nämlich trügen. Von großer Bedeutung für die sichere Flugdurchführung ist nämlich nicht nur das Wetter am Startflugplatz und auf der Strecke, sondern besonders das zu erwartende Wetter bei der Landung am Zielflugplatz.

OL Y ruft die Wetterberatung an und lässt sich für die Planung sowohl das Streckenwetter als auch das vorhergesagte Wetter für die Landung in Schleswig geben.

Während der Start auch unter schlechtesten Sichtverhältnissen erfolgen kann, benötigt man auch bei noch so fortgeschrittener Technik für die Landung Wetterminima, die den für Instrumentenanflüge festgelegten Mindestsichtbedingungen und Wolkenuntergrenzen am Zielflugplatz entsprechen. Der Flug zu einem Ausweichflugplatz (alternate) ist einzuplanen und bei der Kraftstoffberechnung (fuel calculation) zu berücksichtigen.

Heute erfährt OL Y, dass Schleswig eine Hauptwolkenuntergrenze (ceiling) von 300 ft hat, die Sicht aber nicht unter 1,8 km gehen wird. Als Ausweichflugplatz entscheidet er sich für Eggebeck, das etwas bessere Wetterverhältnisse aufweist. Hptm X informiert sich bei Base Ops, ob irgendwelche Einschränkungen in Form von NOTAMs für die Strecke oder für Schleswig selbst vorliegen. Er erfährt, dass in Schleswig der Rollweg B (taxiway Bravo) in der Zeit vom 15.09. bis 20.09. wegen Bauarbeiten gesperrt ist (construction work in progress). Mit allen diesen Informationen begibt sich OL Y an die navigatorische Flugvorbereitung. Er wählt ein Standardinstrumentenabflugverfahren aus seinen Unterlagen. Ebenso plant er die Streckenführung auf den Luftstraßen (airways). Unter Berücksichtigung des Win-

des in Richtung und Stärke errechnet er die Flugzeit und den Kraftstoffbedarf. Alle errechneten Daten und die Frequenzen von Funkfeuern und FS-Kontrollstellen trägt er in ein „Flight log“ ein, einer wichtigen Informationsquelle für die Navigation.

Nachdem die Crew den Einsatzauftrag erteilt bekommen hat, empfängt sie bei R+S ihre Fliegerhelme mit Sauerstoffmaske, ihre Rettungswesten und Anti-G-Hosen. Danach fährt sie mit dem „line taxi“ zur Flugabfertigung, um ihren Flugplan aufzugeben. Auf der Vorderseite des Flugplanes werden Flugsicherungsangaben wie Startzeit, geschätzte Landezeit, Streckenführung, Flughöhen, Funk- und Notausrüstung durch Hptm X eingetragen. OL Y geht zur gleichen Zeit zur Geophysikalischen Beratungsstelle und holt sich die schriftliche Wetterberatung für den Flug ab. Danach geht es zum Flugzeug. Hier erfolgt die Übergabe des Flugzeugs an den Flugzeugführer durch den 1. Wart.

20.3.3 Die Inbetriebnahme des Lfz

Vor der Inbetriebnahme des Lfz erfolgt die obligatorische Außenkontrolle des Flugzeugs (exterior check) sowie die Überprüfung des Bordbuches. Beim Anlegen des umfangreichen Gurtzeuges sind die Warte behilflich.

Während der Pilot die Triebwerke anlässt, bringt der Waffensystemoffizier das Navigationssystem online. Nachdem alle Systeme klar sind, holt der WSO vom Tower die Rollfreigabe (taxi clearance) ein. Auf dem Weg zur Startbahn werden die „taxi-checks“ und die „before take-off checks“ durchgeführt. Vom WSO wird die Flugverkehrsfreigabe (air traffic control clearance) eingeholt. Kurz vor dem Start wird nochmals eine letzte Überprüfung des Flugzeuges durch das technische Personal durchgeführt. Diese Überprüfung heißt nicht zu unrecht „last chance check“. Von der „Last Chance“ geht es nun zur „holding position“. Hptm X hat vom Kontrollturm die Anweisung bekommen, dort zu warten, bis die gerade einschwebende C-160 Transall gelandet ist.

20.3.4 Start und Abflugverfahren

Der Start und das Abflugverfahren beginnt (Abb. 18.2). Nach Erteilen der Starterlaubnis (take-off clearance) führt die Crew die sog. „line up checks“ durch. Hptm X schiebt nun die beiden Schubhebel nach vorne und der Tornado beschleunigt die Startbahn hinunter. Nach Erreichen der Startgeschwindigkeit zieht der Pilot den Steuerknüppel leicht nach hinten, hebt ab und fährt das Fahrwerk ein. Bei ca. 230 Knoten werden die Klappen eingefahren und bei 250 Knoten die Triebwerke aus dem Nachbrennerbereich genommen, eine oft geübte Handlungssequenz.

Der Tower hat „ME 15“ aus seiner Verantwortung entlassen.

Diese geht jetzt auf die Münchener Bereichskontrolle über.

„ME 15 contact Munich now on 397,05“.

OL Y stellt die vorgegebene Frequenz ein und meldet sich mit einem freundlichen „Munich Radar, ME 15, airborne Memmingen, Grüß Gott“. München Radar erwidert den Gruß, bestätigt die positive Erfassung (radar contact) auf dem Radarschirm und gibt weitere Anweisung für das Abflugverfahren (departure).

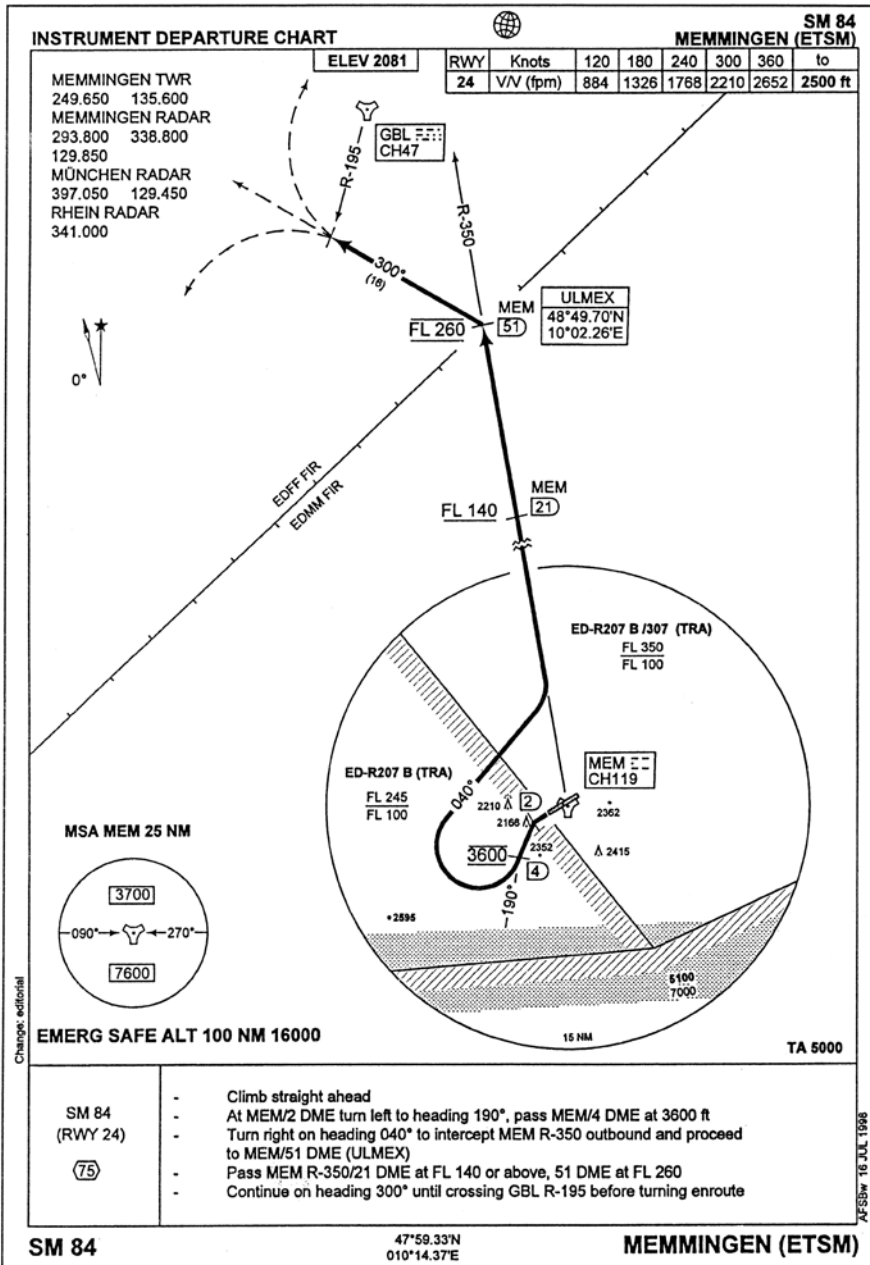


Abb. 20.2: Instrumentenabflugverfahren des Flugplatzes ETSM Memmingen

20.3.5 Streckenflug

Nach Erreichen der Reiseflughöhe auf Flight Level (FL) 260 beginnt der Streckenflug „enroute“ (Abb. 18.3). Hptm X geht vom Steigflug in den Horizontalflug über und überprüft Instrumente, Ausrüstung und technische Systeme auf korrekte Funktion (level off check) und gleicht dies mit seinem Waffensystemoffizier ab. Nun geht es über verschiedene Funkfeuer in Richtung Schleswig.

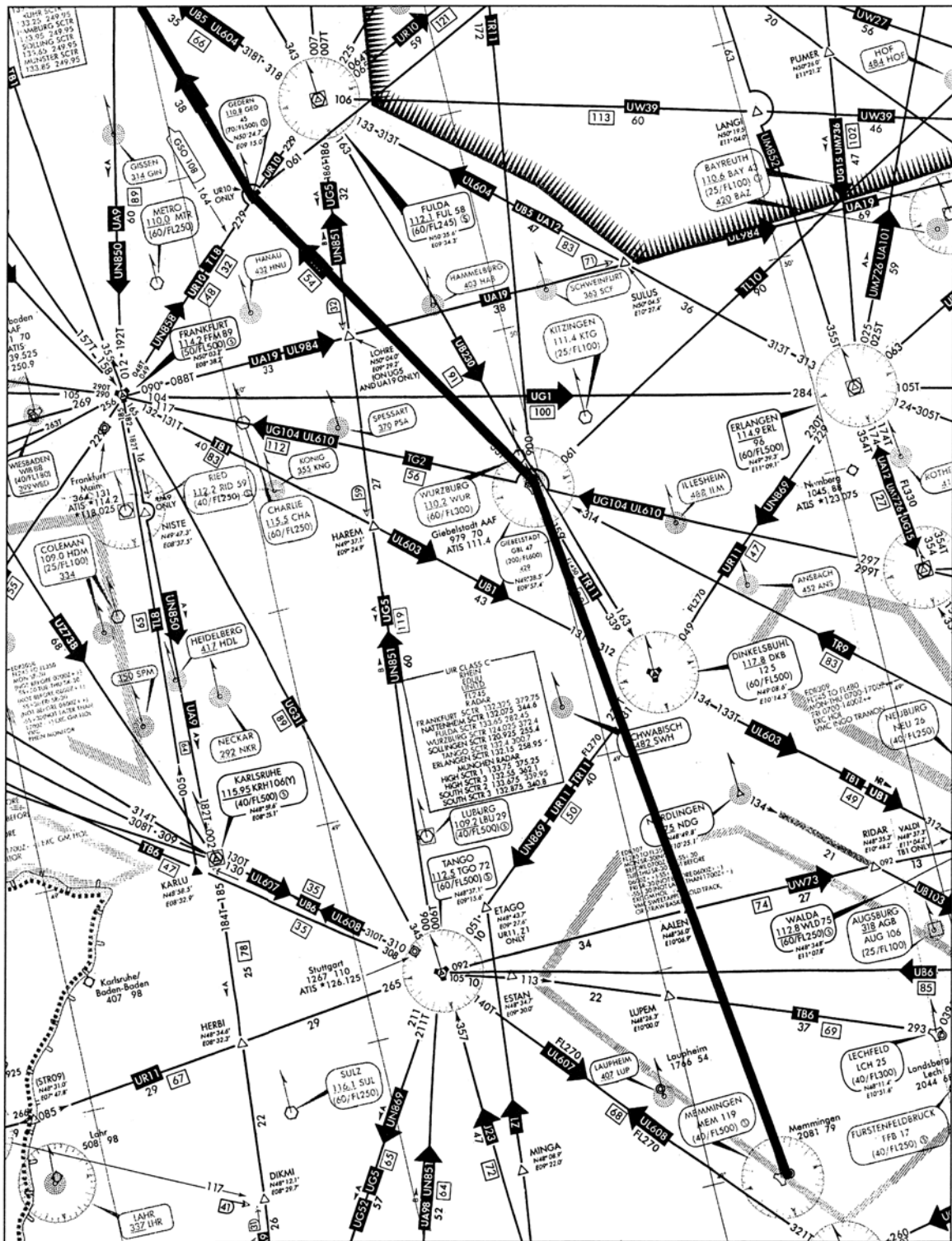


Abb. 20.3: Teil der Streckenführung ETSM-ETNS

Da der Flugweg durch verschiedene Zuständigkeitsbereiche der Flugverkehrskontrolle führt, bekommt die Crew jeweils die Aufforderung, über die angegebene Frequenz nun die nachfolgende Bereichskontrolle zu rufen. „ME 15 contact Frankfurt now on 373,80“. So geht es weiter durch die Bereiche Frankfurt und Düsseldorf nach Bremen. Schließlich, nach einer Flugzeit von 50 Minuten wird „ME 15“ von Bremen Radar an die Anflugkontrolle Schleswig per Frequenzwechsel übergeben.

20.3.6 Das Anflugverfahren

Das Anflugverfahren (Abb. 18.4) beginnt. Die Crew hat sich entschlossen einen TACAN-Anflug auf die Landebahn 23 in Schleswig zu fliegen. Die „descent and recovery checks“ werden durchgeführt, die Landegeschwindigkeit errechnet. Noch fliegt der Tornado in einer geschlossenen Wolkenschicht. Schleswig liegt unter den Wolken vor ihm, er fliegt sauber auf dem Gleitpfad und der Mittellinie („on course, on glide path“ informiert ihn der GCA Controller). Pflichtgemäß hat Hptm X bestätigt, dass er die Landekonfiguration eingenommen hat und das Fahrwerk ausgefahren ist. Wie vom „Wetterfrosch“ versprochen, bekommt die Crew im Endanflug (final) bei 300 ft Höhe Bodensicht. Hptm X bestätigt, dass er den Platz in Sicht hat (runway in sight) und führt die Landung durch. Die Anflugkontrolle übergibt ME 15 an den Kontrollturm, der ihm nach der Landung die Rollfreigabe zum Abstellplatz gibt.

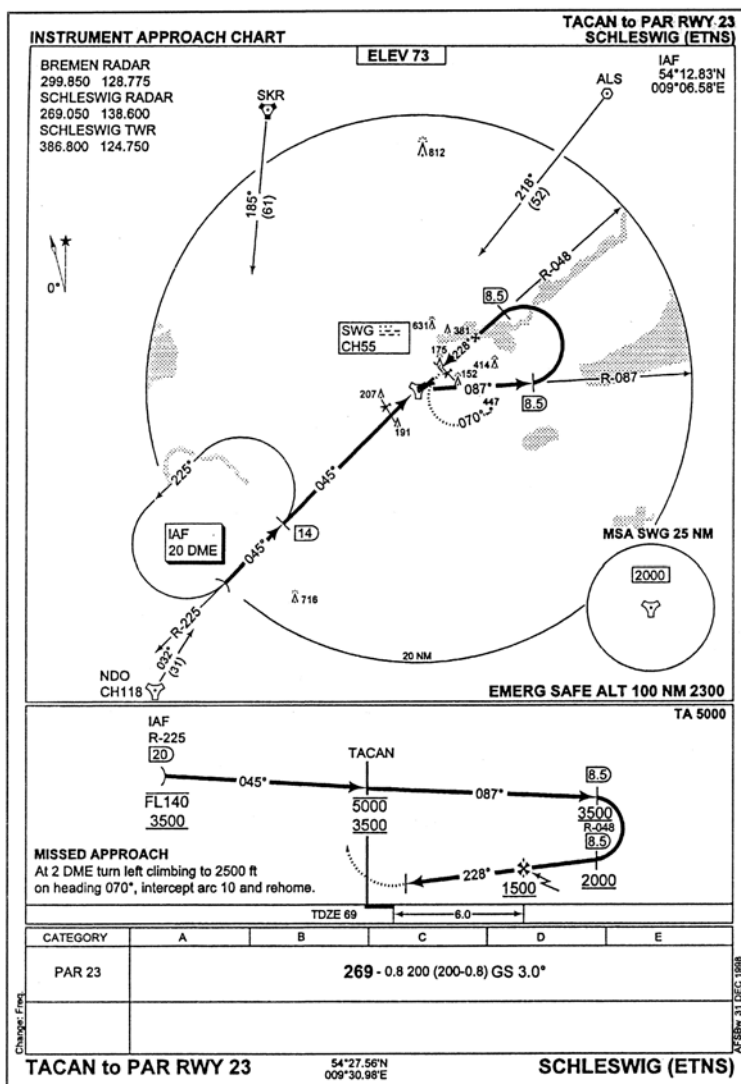


Abb. 20.4: Instrumentenanflugverfahren Flugplatz Schleswig

20.3.7 Die Beendigung des Flugauftrages

Am Abstellplatz angekommen, empfängt ihn „Cross Servicing“ zum Auftanken und zur weiteren technischen Versorgung des Flugzeuges. Hierbei teilt die Crew dem Bodenpersonal etwaige technische Beanstandungen des Flugzeuges mit, damit diese behoben werden können.

Der Aerodrome Officer (AO) wartet schon mit einem Fahrzeug auf Hptm X und OL Y, um sie zur Flugabfertigung zu bringen. Dort wird der Flugplan geschlossen. Der Flug wurde sicher und ordnungsgemäß durchgeführt.

Von dort aus geht es in eine der fliegenden Staffeln. Hier erfolgt die Nachbesprechung zwischen Piloten und Waffensystemoffizier, das sog. Debriefing. Bei diesem Debriefing werden alle flugrelevanten Punkte angesprochen und die Planung mit der tatsächlichen Flugausführung verglichen. Dieses Debriefing dient der Erkennung von Fehlern, um diese beim nächsten Flug vermeiden zu können.

20.4 Flugregeln

Ähnlich wie im Straßenverkehr die Straßenverkehrsordnung für alle Teilnehmer verbindlich ist, kommt auch der Luftverkehr nicht ohne eine verbindliche Ordnung aus. Es ist dies die Luftverkehrsordnung (LuftVO). Innerhalb der Bundeswehr regelt eine Zentrale Dienstvorschrift den Flugbetrieb, die ZDv 19/2 VS-NfD, „Flugbetriebsordnung für die Bundeswehr“.

Hier sollen nur die wichtigsten Regeln vorgestellt werden.

Es wird u.a. unterschieden zwischen:

- Grundsätzen und Voraussetzungen für den Flugbetrieb
- Allgemeinen Flugregeln
- Sichtflugregeln
- Instrumentenflugregeln

20.4.1 Die Luftverkehrsordnung

Da der § 1 der LuftVO, insbesondere im Hinblick auf die Auswirkungen auf Unbeteiligte (Lärmbelastigungen/Umweltfragen) sowohl für die zivilen Luftfahrzeugführer als auch den Militärflugzeugführer von großer Bedeutung ist, soll er an dieser Stelle wörtlich zitiert werden:

- (1) Jeder Teilnehmer am Luftverkehr hat sich so zu verhalten, dass Sicherheit und Ordnung im Luftverkehr gewährleistet sind und kein anderer gefährdet, geschädigt oder mehr als nach den Umständen unvermeidbar behindert oder belästigt wird.
- (2) Der Lärm, der bei dem Betrieb eines Luftfahrzeugs verursacht wird, darf nicht stärker sein, als es die ordnungsgemäße Führung oder Bedienung unvermeidbar erfordert.
- (3) Wer infolge des Genusses alkoholischer Getränke oder anderer berauschender Mittel oder infolge geistiger oder körperlicher Mängel in der Wahrnehmung der Aufgaben als Führer eines Luftfahrzeugs oder sonst als Mitglied der Besatzung behindert ist, darf kein Luftfahrzeug führen und nicht als anderes Besatzungsmitglied tätig sein.

20.4.2 Die allgemeinen Flugregeln

umfassen im Einzelnen z.B. Bestimmungen über

- die Sicherheitsmindesthöhe
- das Abwerfen von Gegenständen
- Vermeidung von Zusammenstößen (Abstände)
- Ausweichregeln (so gilt generell auch in der Luft die Ausweichregel rechts vor links, wenn nicht andere in diesen Paragraphen angegebene Verfahren zutreffen)
- Außenstart und Außenlandung mit Luftfahrzeugen
- Aufstiege von Ballonen, Drachen, Flugmodellen und Flugkörpern mit Eigenantrieb (So ist z.B. das Steigenlassen von Drachen im Umkreis von 3 km von Flugplätzen verboten)
- die Lichterführung von Luftfahrzeugen
- Flugplanungsaufgabe, Flugverkehrs freigabe, Funkverkehr, Standortmeldungen sowie Start- und Landemeldungen

20.4.3 Sichtflugregeln

Flüge nach Sicht werden nach Sichtflugregeln durchgeführt, d.h., wenn Sichtflugwetterbedingungen (VMC = Visual Meteorological Conditions) herrschen. Die erforderlichen Wetterminima hängen von der jeweiligen Luftraumstruktur ab. Da der Luftraum über der Bundesrepublik Deutschland überwiegend kontrolliert ist, seien hier beispielhaft die Wettermindestbedingungen für den kontrollierten Luftraum außerhalb der Kontrollzonen aufgeführt:

Flugsicht 8 km und Mindestabstand von den Wolken waagrecht 1,5 km sowie 1000 ft Vertikalabstand.

20.4.4 Instrumentenflugregeln

Instrumentenflüge werden unter Instrumentenwetterbedingungen (Instrument Meteorological Conditions - IMC) nach Instrumentenflugregeln erforderlich. Diese finden nur im kontrollierten Luftraum statt. Da hier der Flugzeugführer seine Informationen über Lage und Position ausschließlich von seinen Instrumenten im Cockpit bekommt, müssen besondere Flugregeln ihn vor Zusammenstößen und Einflügen in Hindernisse schützen. So liegt z.B. die Sicherheitsmindesthöhe (außer bei Start und Landung) bei 300 m (1000 ft) über der höchsten Erhebung, von der das Luftfahrzeug weniger als 8 km entfernt ist.

Aus Sicherheitsgründen sind auch für Instrumentenflugverfahren Wetterminima festgelegt. Ein Flug zum Ausweichplatz (alternate) wird dann erforderlich, wenn diese Wettermindestbedingungen nicht mehr gegeben sind.

20.5 Der Hubschrauber

20.5.1 Konstruktions- und Antriebsmerkmale

Eine besondere Konstruktionsart von Luftfahrzeugen stellen die Drehflügelflugzeuge dar. Man unterscheidet zwischen:

- Tragschraubern
- Hubschraubern
- Flugschraubern
- Verwandlungshubschraubern
- Kombinationsflugschraubern.

In der Militärluftfahrt finden allerdings fast ausschließlich Hubschrauber Verwendung. Beim Hubschrauber übernehmen die Drehflügel (Rotoren), die von einem oder mehreren Triebwerken angetrieben werden, die Auftriebserzeugung, die bei einem Flächenflugzeug dem Tragwerk zukommt.

Je nach Anzahl und Anordnung der Rotoren wird unterschieden zwischen

- ein- bis vierrotorig
- Tandemanordnung
- Koaxialanordnung
- ineinander kämmender Anordnung
- nebeneinander liegender Anordnung

Außerdem unterscheidet man nach der Antriebsart Hubschrauber mit Wellenantrieb (am häufigsten) und solche mit Blattantrieb (seltener). Als Triebwerke finden Kolbenmotoren und Gasturbinen Verwendung, wobei aus Gründen der Wirtschaftlichkeit der Turbine die Zukunft gehört. (Alle in der Bundeswehr verwendeten Hubschrauber werden von Turbinen angetrieben).

Das Triebwerk übt bei mechanisch angetriebenen Rotoren ein Drehmoment auf den Rotorast aus, welches seinerseits ein gleichgroßes, in entgegengesetzter Richtung wirkendes Drehmoment auf den Rumpf ausübt. Würde dieses nicht ausgeglichen, so würde sich der Rumpf um die Hochachse entgegengesetzt der Rotordrehrichtung drehen. Ein Ausgleich des Drehmoments wird bei einrotorigen Hubschraubern durch den Heckrotor bewirkt, der gleichzeitig auch mit Hilfe der Pedale eine Steuerung um die Hochachse ermöglicht. Bei Hubschraubern neuester Bauart erfolgt dieser Drehmomentausgleich über einen gerichteten Luftstrom, der den Heckrotor ersetzt (NOTAR = no tail rotor).

20.5.2 Die Bauteile eines Hubschraubers

Ein Hubschrauber besteht im Wesentlichen aus folgenden Bauteilen (Abb 18.5):

- Rumpf mit Cockpit und Laderaum sowie Heckausleger einschließlich Trimmflosse
- Hauptrotor mit Rotormast, Rotorblättern und Rotorkopf,
- Heckrotor, Heckrotorwelle, Heckrotorgetriebe,
- Triebwerk, Hauptgetriebe, Hauptantriebswelle,
- Steuerung
- Landegestell (Fahrwerk, Kufen, Schwimmer oder deren Kombinationen).

20.5.3 Die Aerodynamik des Hubschraubers

ist grundsätzlich mit der eines Flächenflugzeuges vergleichbar, wenn man das einzelne Rotorblatt als Tragfläche betrachtet. Aufgrund der Umdrehung des Rotors ergeben sich allerdings an jedem einzelnen Rotorblatt je nach Position in der 360 °-Drehung (Rotorkreisfläche) anders gelagerte Auftriebsverhältnisse. Sie führen zum Schlagen (Vertikalbewegung) und Schwenken (Horizontalbewegung) der einzelnen Blätter.

20.5.4 Die Steuerung eines Hubschraubers

erfolgt auf drei Arten durch die:

- kollektive Blattverstellung mit dem Blatt (Einstellwinkel) Verstellwinkel (collective pitch lever),
- periodische Blattsteuerung mit dem Steuerknüppel (cyclic stick) und
- Steuerung um die Hochachse mit den Pedalen (pedals).

Unter **kollektiver Blattverstellung** wird die Veränderung des Einstellwinkels der Rotorblätter mit Hilfe des Blatteinstellwinkelverstellhebels (pitch) verstanden.

Dadurch wird nach Bedarf größerer oder geringerer Auftrieb erzeugt und somit eine Auf- oder Abwärtsbewegung des Hubschraubers eingeleitet.

Periodische Blattsteuerung nennt man die Verstellung des Anstellwinkels der Rotorblätter und damit eine Neigung der Rotorebene. Dadurch wird eine Bewegung in eine gewünschte horizontale Richtung (vorwärts, rückwärts, seitwärts) eingeleitet.

Schließlich dient die **Heckrotorsteuerung** mit Hilfe der Pedale dem Ausgleich des Drehmoments bei variabler Triebwerksleistung und der Steuerung des Hubschraubers um die Hochachse.

Der Hubschrauber kann grundsätzlich senkrecht gestartet und gelandet werden. Diese Verfahren erfordern jedoch die höchste Triebwerkleistung. Da je nach Gewicht der Zuladung diese jedoch nicht immer zur Verfügung steht, müssen vom Hubschrauberführer unter Berücksichtigung der Umweltverhältnisse (z.B. Hindernisse, Außentemperatur, Platzhöhe) auch andere Start- / Landeverfahren gewählt werden können. **Flachstart** (Rollstart), **Normalstart** und **Steilstart** sind Startarten, bei denen der Vorteil der Vorwärtsbewegung zur Auftriebserzeugung genutzt wird. Dementsprechend wird beim Landeanflug und der Landung selbst zwischen Steil-, Normal- und Roll-Landung unterschieden.

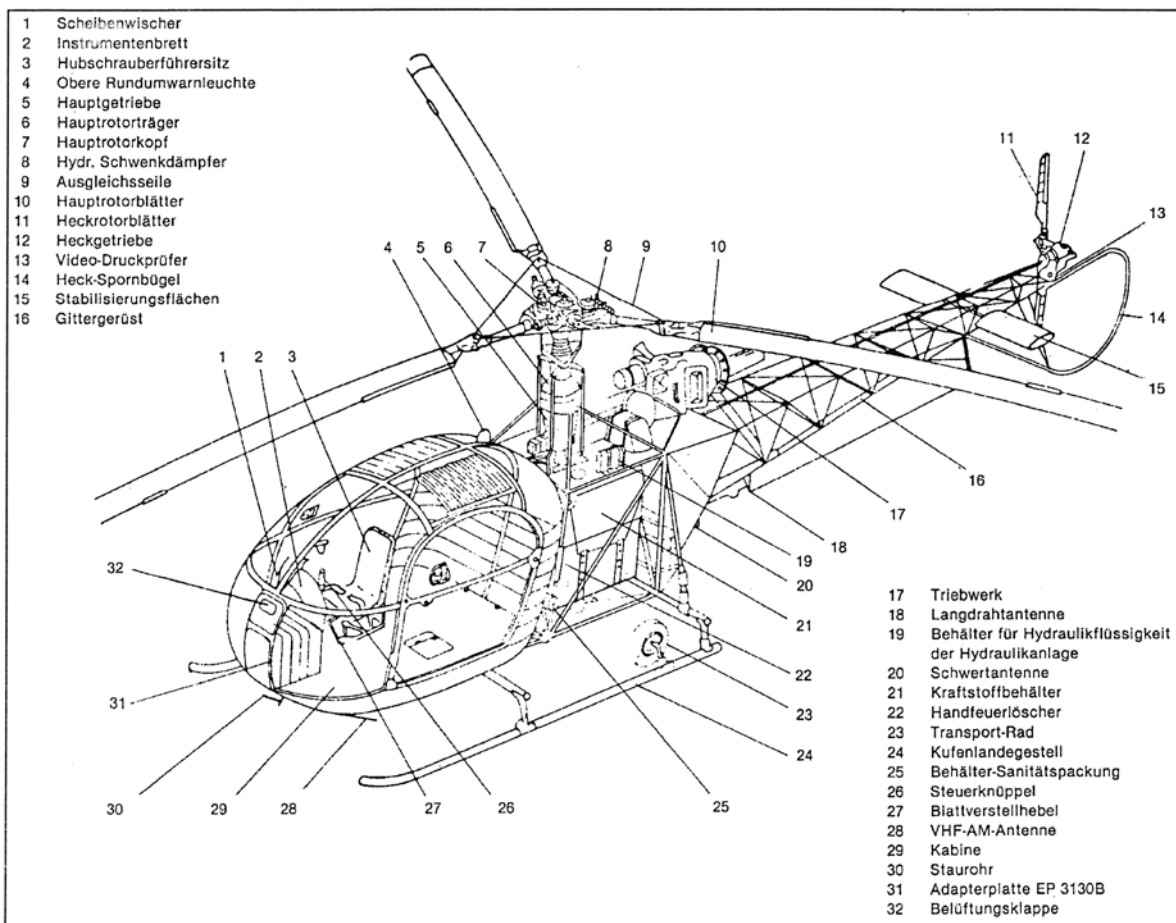


Abb. 20.5: Bauteile des Verbindungshubschraubers „Alouette II“

20.5.5 Die Autorotation

ist ein Flugzustand, bei dem der Rotor bei Triebwerksausfall durch die noch strömende Luft angetrieben wird. Während im Normalflug mit Triebwerksleistung der Luftdurchsatz durch den Rotor von oben nach unten erfolgt, strömt im Autorotationsvorgang die Luft von unten nach oben (Prinzip: Flug der geflügelten Spaltfrucht des Ahorns). Während der Autorotation wird der Blatteinstellwinkel auf einem Minimum gehalten, um den Widerstand klein und damit die Rotordrehzahl groß zu halten. Kurz vor der Landung wird maximaler Auftrieb durch Ziehen des Blattverstellhebels und somit Vergrößerung des Einstellwinkels erzeugt, so dass die Sinkgeschwindigkeit im Moment der Bodenberührung fast auf Null ist.

20.6 Kleine Instrumentenkunde

Die Flugzeuginstrumente sind visuelle Informationsquellen für Flugzeugführer und weitere Besatzungsangehörige. Damit der fliegerische Laie von der Vielfalt der Instrumente auf dem Instrumentenbrett (instrument panel) nicht überfordert wird, soll hier in Form einer kleinen Instrumentenkunde auf deren Funktion und Bedeutung für eine sichere Flugdurchführung eingegangen werden. Was auf den ersten Blick verwirrend wirkt, wird sich bald als geordnetes Ganzes herausstellen.

Bei den Instrumenten unterscheidet man zunächst zwischen Großgruppen nach ihrem Verwendungszweck. Hierzu zunächst eine Auswahl:

20.6.1 Flug(überwachungs-)instrumente

Fahrtmesser (airspeed indicator)

Der Fahrtmesser ist wohl eines der wichtigsten Instrumente überhaupt. Nach einer alten Fliegerweisheit ist nämlich „Fahrt das halbe Leben“. Der Fahrtmesser zeigt an, mit welcher Geschwindigkeit sich das Flugzeug gegenüber der anströmenden Luft bewegt. Gemessen wird der Staudruck, dessen Größe von der Luftdichte und der Geschwindigkeit abhängt. Sensor ist das Staurohr (pitot tube).

Die angezeigte Geschwindigkeit in Knoten (KTS) nennt man IAS (= indicated airspeed). Unter CAS (= calibrated airspeed) versteht man eine kalibrierte Anzeige, die systemimmanente Fehler bereits berücksichtigt. Da man aber für die Berechnung der Flugdauer die „wahre“ Eigengeschwindigkeit benötigt, muss die CAS noch um die Luftdichte (aus Druckhöhe und Außentemperatur) erweitert werden. Dies ergibt die wahre Eigengeschwindigkeit (TAS = true airspeed). Für die Berechnung der Flugzeit spielt allerdings die Geschwindigkeit über Grund (GS groundspeed) die entscheidende Rolle. Dies ergibt sich aus der Einkalkulierung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit.

Faustregel:

Wind von hinten ergibt als GS: TAS plus Windgeschwindigkeit. Wind von vorne ergibt als GS: TAS minus Windgeschwindigkeit.

Bei schnelleren Flugzeugen gibt es als Geschwindigkeitsinformation zusätzlich die Mach-Anzeige (z.B. M 0,8 = 480 KTS TAS).

Höhenmesser (altimeter)

Der Höhenmesser misst den Luftdruck und wandelt Druckänderungen in Höhenanzeigen (in ft oder m) um. Im Höhenmesser befindet sich ein Fenster, in welchem der Luftdruck eingestellt wird. Es gibt insgesamt 3 Höhenmessereinstellungen (Bezugssysteme):

Der Höhenmesser wird am Boden auf Platzdruck (= „0“ Höhe) eingestellt. Er zeigt während des Fluges die Höhe über dem Startplatz (QFE) an. Normalerweise wird dem Flugzeugführer am Boden der Platzdruck, reduziert auf Meereshöhe, das QNH übermittelt. Wird dieser Wert als Bezugswert in das Fenster eingegeben, zeigt der Höhenmesser am Boden die Höhe des Flugplatzes über dem Meeresspiegel (z.B. 2081 ft in Memmingen) an. Beim Instrumentenflug wird bei Erreichen einer bestimmten Höhe (transition altitude, geländeabhängig, je nach Einteilung des Luftraumes, in Deutschland 5000 ft, in USA 18000 ft) im Steigflug (und dann wieder bis zum Erreichen einer bestimmten Höhe im Sinkflug) der Luftdruck der Internationalen Standard Atmosphäre in das Fenster gedreht (1013,2 hPa). Der Höhenmesser zeigt nun die Höhe über der Standardbezugsfläche an (Flugflächensystem/Flight Level System).

Diese Höhenmessereinstellung gewährleistet beim Instrumentenflug eine sichere Höhenstafelung, da alle mit dieser „Reiseflughöheneinstellung“ fliegen.

Radarhöhenmesser liefern in modernen Zivil- und Militärflugzeugen eine aktuelle und echte Abstands-(höhen-)messung zwischen Flugzeug und der senkrecht darunter befindlichen Bodenoberfläche. In der Instrumentenfliegerei geben sie Zusatzinformationen über die aktuelle Höhe über Grund (bis 5000 ft).

Variometer (vertical velocity indicator, VVI)

Das Variometer zeigt die Steig- und Sinkgeschwindigkeit des Flugzeuges an (m/s oder ft/min). Im Instrumentenflug werden u.U. ganz bestimmte Steig- und Sinkraten vorgegeben. Generell muss ein Flugzeugführer, ob Segelflieger oder Kampfpilot stets wissen, ob und wie schnell er steigt oder sinkt.

Wendezeiger (turn and slip indicator)

Der Wendezeiger zeigt als „Einfachinstrument“ die Bewegung des Flugzeuges um die Hoch- und Querachse an. Für Instrumentenflugverfahren sind bestimmte Winkel der Querlage vorgeschrieben (Rate of turn/bank). Die Kugel in der sog. Libelle zeigt Schiebebewegungen um die Hochachse an, z.B. durch eine falsche Bedienung der Pedale bedingt (Yaw, Gieren).

Künstlicher Horizont (attitude director indicator, ADI)

Der künstliche Horizont gibt dem Flugzeugführer Informationen über die Lage des Luftfahrzeuges im Raum. Er ist das wichtigste Instrument beim Instrumentenflug, hat daher eine zentrale Lage am Instrumentenbrett und ist bei Luftfahrzeugen, die für den Instrumentenflug zugelassen sind, mindestens zweimal vorhanden und an unterschiedlichen Energiequellen angeschlossen (Gleichstrom / Wechselstrom / Druckluft).

Durch die Übernahme der MiG 29 durch die Bundeswehr existieren zurzeit zwei Geräte mit unterschiedlichen Darstellungsweisen in den Flugzeugen der Luftwaffe: der NATO-Typ AI ist vom sogenannten „inside out“, der MiG 29 AI ist vom „outside in“-Typ. Im ersten Fall bewegt sich der Horizont in Relation zu einem fixierten Flugzeugsymbol, bei der MiG 29 bewegt sich ein Flugzeugsymbol in Relation zu einem fixierten Horizont. Dadurch können Orientierungsprobleme für Piloten entstehen, die von dem einen auf das andere System wechseln.

Head Up Display (HUD)

Das Head Up Display kombiniert die Informationen vieler konventioneller Instrumente (air speed indicator, altimeter, ADI, VVI, radar altimeter, etc.) und gibt zusätzliche Informationen für den Piloten. Die HUD befindet sich vor der Frontscheibe. Die Informationen werden in grünlicher Farbe und ins Unendliche fokussiert von unten eingespiegelt. Der Pilot sieht so also durch die HUD hindurch und hat seine wichtigsten Informationen direkt und immer vor Auge. Neben Höhen-, Geschwindigkeits- und Fluglageinformationen werden auch Ziel- und Angriffsparameter in die HUD eingespiegelt. So wird z.B. erreicht, dass das Ziel (target) im Auge behalten werden kann und gleichzeitig die Waffeneinsatzparameter dem Piloten sichtbar sind.

Die HUD ermöglicht so einen besseren Waffeneinsatz und eine leichtere Kontrolle des jeweiligen Flugzustandes.

20.6.2 Navigationsinstrumente:

Flüssigkeitsmagnetkompass

Der Flüssigkeits-Magnetkompass (in der Fliegersprache „Whiskey compass“ genannt), ist als Einfachinstrument (standby compass) auch in modernsten Flugzeugen zu finden. Er richtet sich auf „Magnetisch Nord“ aus. Die Kompassfehler, wie Ortsmissweisung (Variation), als auch konstruktionsbedingt die Deviation sowie die Drehfehler bei Kursen in Richtung Süd und Nord müssen jedoch vom Flugzeugführer kalkuliert werden.

Kreiselkompass

Zuverlässiger ist der kreiselgestützte Kompass, der sowohl im Geradeausflug als auch im Kurvenflug genaue Informationen über den Kurs (bezogen auf magnetisch Nord) gibt. Modernste Geräte sind lasergestützt.

Global Positioning System (GPS)

Das modernste Navigationsgerät ist das Global Positioning System (GPS). Es ist satellitengestützt. Von den Satelliten in der Erdumlaufbahn werden zeitcodierte Signale ausgesandt. Diese werden vom Empfänger im Flugzeug integriert und daraus die Position errechnet. Für eine exakte Positionsbestimmung im Raum müssen die Signale von drei Satelliten empfangen werden. Die Position im dreidimensionalen Raum kann so in einem Quader von einer Seitenlänge von 10 Metern genau bestimmt werden.

Das GPS ist von allen anderen Referenzen unabhängig. Es erlaubt präzisiertes Fliegen und einen exakten Waffeneinsatz. Auf Grund seiner Genauigkeit gehört es bei den neuesten Flugzeugen zur Standardausrüstung. Bei eingeführten Lfz-Mustern wird es zurzeit Zug um Zug nachgerüstet.

Borduhr

Die Borduhr mit Stoppeinrichtung ist nicht nur für vielerlei Zeitmessungen an Bord, sondern auch für die Navigation von großer Bedeutung: Koppelnavigation heißt: „Wann war ich wo? Wann muss ich wo sein?“

Elektronische bzw. Funk-Navigationsgeräte

Elektronische Funk-Navigationsgeräte erhalten ihre Signale von Bodenstationen und zeigen dem Luftfahrzeugführer, wo er sich befindet, z.B. zeigt

- die ADF-Nadel (Automatic Direction Finding) zum (ungerichteten) Funkfeuer, das gerastet wurde
- die VOR-Nadel (Very high Frequency Omni Directional Radio Range) auf eine gewählte VOR -Station
- die TACAN-Nadel (Tactical Air Navigation) auf eine bestimmte TACAN -Station
- DME (Distance Measurement Equipment) die Entfernung von einer Navigationsanlage (in Meilen) an

20.6.3 Triebwerküberwachungsinstrumente:

- Drehzahlmesser (NH)
- Kraftstoff-Menge/Druck/Durchfluss (fuel quantity/fuel pressure/fuel flow)
- Öl-Menge/Druck (oil pressure)
- Hydraulikdruck (hydraulic pressure)
- Abgastemperatur (EGT),
- Außenlufttemperatur u.a.m.

Die Triebwerküberwachungsinstrumente informieren den Flugzeugführer über alle wesentlichen Parameter seiner Triebwerke, wie Drehzahl, Kraftstoff-Menge, -Druck, -Durchfluss, Öl-Menge und -Druck, Hydraulikdruck, Abgastemperatur, Zulufttemperatur etc.. Innerhalb von farbigen Bereichsmarkierungen bekommt er eine Schnellinformation darüber, ob im „grünen Bereich“ alles richtig funktioniert, im „gelben Bereich“ technische Systeme mit Einschränkung funktionieren oder im „roten Bereich“ ausgefallen sind.

20.6.4 Sonstige Instrumente:

- G-Meter
- Sauerstoffvorrat
- AOA (Angle of Attack)
- Fahrwerksanzeige
- Waffenstationen u.a.m.

20.6.5 Anordnungen der Instrumente und Ausblick auf künftige Cockpitlayouts

Die Anordnung aller Bedienelemente wie auch der Instrumente (auf dem „panel“) selbst ist leider in jedem Muster anders. Von Bedeutung ist aber, ob die Anordnung nur für einen Flugzeugführer (single seater) ausgelegt ist oder für einen zweiten (Co-)Piloten, auch natürlich, ob eine Nebeneinander- oder Tandem-Sitzordnung vorgesehen ist. Dennoch lässt sich am Beispiel des Cockpits einer C-160 Transall (Abb. 18.6) die funktionelle Zuordnung der Anzeigen zu den unterschiedlichen Aufgaben einer mehrköpfigen Besatzung zeigen:

Der linke Panelbereich (für den Piloten) ist weitgehend baugleich mit dem rechten (CoPilot). Zentral angeordnet sind hier die Instrumente für Fluglage und Navigation. In der Mitte sind für den Bordtechnischen Offizier (BTO) zentral die Instrumente für die Triebwerksüberwachung angeordnet. (Der Navigationsoffizier hat mit eigenem Anzeigenbrett seinen eigenen Arbeitsplatz).

Bei der Gestaltung moderner Cockpitlayouts ist die Loslösung von den vielen Einzelinstrumenten (den klassischen „Uhreninstrumenten“) hin zu einem oder mehreren zentralen „Bildschirminstrumenten“ unverkennbar:

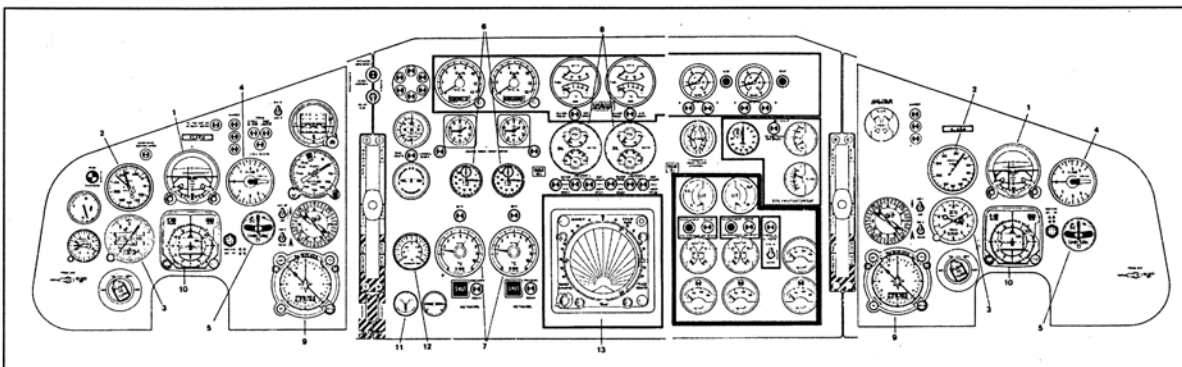


Abb. 20.6: Instrumentenbrett der C-160 „Transall“

Derzeitige Studien haben zum Ziel, dem Flugzeugführer auf einem einzigen übergroßen Bildschirm nicht nur integrierte Instrumentenanzeigen anzubieten, sondern durch die zusätzliche Einblendung von Radarbildern, Kartenausschnitten, Nachtsicht- und anderen bildlichen Informationen ein „virtuelles Cockpit“ zu schaffen.

Wieder eine andere Entwicklung versucht, visuelle Informationen direkt in den Frontsichtbereich des Helmes einzuspiegeln (Helmet Mounted Display, HMD).

Eine bereits eingeführte Art, Instrumenteninformationen mit der Sicht nach draußen zu verbinden, stellt das Head Up Display (HUD) dar (s.18.6.1.6).

Neue Technologien werden das „klassische Cockpit“ weiter revolutionieren und immer einsatzspezifischer gestalten lassen. Der Bildschirm (einer Kathodenstrahlröhre) erlaubt die integrierte Mehrfach- und Mehrzweckdarstellung (Multi Function Display, MFD) vieler Anzeigen zugleich, sogar in verschiedenen Farben und Darstellungsarten (analog, digital, graphisch), wobei bestimmte Anzeigen auch nicht ständig, sondern nur auf Abruf, also bei Bedarf abgerufen werden können.

Instrumentenbrett Pilot	Mittleres Instrumentenbrett	Instrumentenbrett Copilot
1-Flugüberwachungsinstrumente	Künstlicher Horizont (1) Fahrtmesser (2) Höhenmesser (3) Variometer (4) Wendezeiger (5)	
2. Triebwerküberwachungsinstr.	Drehzahlanzeiger Abgasturbinentemperatur-Anzeiger (7)	
3. Navigationsinstrumente	Triebwerköl Temperatur- und Druckanzeige (8) Haupt PHI (Position and Homing Indicator) (9) Leitkursanzeiger (10)	(die meisten am Arbeitsplatz der Bordnavigationsfunkers)
4. Sonstige Instrumente	Seitenrudertrimmungsanzeige (11) Außentemperaturanzeige (12) Wetter- und Navigationsradar (13)	

20.7 Der militärische Such- und Rettungsdienst (SAR - Search And Rescue)

20.7.1 Rechtliche Grundlagen

Der militärische SAR-Dienst der Bundeswehr ist eine Einrichtung der Streitkräfte zur Einsatzunterstützung. Aufgrund der Zugehörigkeit der Bundesrepublik Deutschland zur ICAO (International Civil Aviation Organization) ist der SAR-Dienst zugleich Teil des nationalen Such- und Rettungsdienstes.

Das Hoheitsgebiet der Bundesrepublik Deutschland ist zu diesem Zweck in zwei SAR-Bereiche aufgeteilt. Für jeden dieser Bereiche ist eine SAR-Leitstelle verantwortlich (RCC - Rescue Coordination Center).

Diese befinden sich für den Bereich Nord- und Ostsee sowie Schleswig-Holstein und Hamburg in Glücksburg (Tel. 04631/6013), für den übrigen Bereich der Bundesrepublik Deutschland in Münster (Tel. 0251/135757).

Die Verantwortung für Such- und Rettungsmaßnahmen bei Seenotfällen liegt bei der Deutschen Gesellschaft zur Rettung Schiffbrüchiger. Für die Alarmierung und Koordinierung steht die (zivile) Seenotleitstelle Bremen zur Verfügung.

20.7.2 Die Aufgaben

Der SAR-Dienst hat im nationalen Hoheitsbereich folgende Aufgaben wahrzunehmen:

- Suche nach vermissten oder abgestürzten Luftfahrzeugen. Dazu gehören auch jene, die gemäß den Daten eines vor Antritt des Fluges abgegebenen Flugplans „überfällig“ sind. Die Nationalität dieser Luftfahrzeuge spielt dabei keine Rolle
- Rettung der Besatzungen und Passagiere
- Leistung von Erster Hilfe für Verletzte und bei Bedarf deren Transport in Krankenhäuser/ Spezialkliniken zur Weiterbehandlung
- Hilfe bei Naturkatastrophen und besonders schweren Unglücksfällen. Die SAR-Leitstellen können SAR-Mittel ersten Grades einsetzen. Einsätze im Zusammenhang mit Flugunfällen haben jedoch Vorrang.

20.7.3 Die Ausrüstung

Für diesen Auftrag stehen im Bereich Luftwaffe leichte Transporthubschrauber vom Muster Bell UH-1D (Abb 18.7) zur Verfügung, die speziell für Rettung und Transport von Kranken und Verwundeten umgerüstet werden. Die Besatzung besteht aus dem Piloten, dem Bordtechniker (BT) und dem speziell ausgebildeten Luftrettungsmeister (LRM).



Abb. 20.7: SAR-Hubschrauber Bell UH-1D

Im Bereich Marine findet das Hubschraubermuster Westland „Sea King“ MK 41 Verwendung. Dessen Besatzung besteht aus dem Piloten, Copiloten, SARO (SAR Operation Officer), Bordtechniker sowie bei Bedarf einem mitfliegenden Arzt (SanOffzArzt).

Außer den Hubschraubern befindet sich ständig ein Sonderflugzeug vom Muster Breguet Atlantic in Bereitschaft, das vom MFG 3 in Nordholz gestellt wird.

Für großräumige Sucheinsätze sind insbesondere der Tornado (Infrarot-Suche) und die Transall C-160 (Notsenderpeilung) geeignet. Für Versorgung und Transport bei Großschadensereignissen/Massenunfällen können Hubschrauber (Sikorski CH-53) der Heeresfliegertruppe eingesetzt werden. Ausrüstung und medizinisches Personal aus den Bundeswehrkrankenhäusern Koblenz und Ulm ermöglichen die lebenserhaltende medizinische Versorgung für bis zu 12 Schwerverletzten, auch während des Fluges.

20.7.4 Die Bereitschaftszeiten

SAR-Hubschrauber an Rettungszentren sind täglich von 07.30 Uhr bis Sonnenuntergang jedoch nicht länger als 21.00 Uhr in Sofortbereitschaft. Der Start zu einem Rettungseinsatz erfolgt in der Regel innerhalb von 2–3 Minuten.

Die übrigen SAR-Hubschrauber sind täglich von 7.30 Uhr bis Sonnenuntergang +30 min. in 15 min. Bereitschaft, außerhalb dieser Zeit in 60 min. Bereitschaft. Ein Start ist tagsüber innerhalb von 15 Minuten und bei Nacht innerhalb von 60 Minuten möglich.

20.7.5 Die Alarmstufen

Innerhalb dieser Bereitschaftsstufen erfolgt die Alarmierung in Abhängigkeit von der Dringlichkeit in drei Stufen

- Ungewissheit (INCERTA)
 - Verdacht eines Flugunfalles
 - Überfälligkeit eines Lfz
 - Vorunterrichtung von Rettungseinheiten

- Bereitschaftsstufe (ALERFA)
 - Fortsetzung der Nachforschungen
 - Erhöhung der Alarmbereitschaft
 - Ausarbeitung eines Suchplans
 - Benachrichtigen benachbarter SAR-Leitstellen
- Notstufe (DETRESFA)
 - Einsatzanweisung an Rettungseinheiten
 - Standortfeststellung mit allen zur Verfügung stehenden Mitteln
 - Festlegen der Suchverfahren

20.7.6 Der fliegerische Einsatz

Die Suche erfolgt je nach Art des Einsatzes optisch innerhalb international festgelegter Suchverfahren („search pattern“) und/oder akustisch durch Abhören von Signalen, die von Notsendern abgestrahlt werden. Eine weitere Möglichkeit bietet die elektronische Suche.

Nach Erreichen des Unfallortes wird der Hubschrauber dort unter Berücksichtigung von Hindernissen möglichst dicht an der Unfallstelle gelandet. Die Verletzten werden nach notwendiger Erstversorgung durch einen Luftretter bzw. Arzt auf Krankentragen in den Hubschrauber verbracht. Für den Fall, dass eine Landung nicht möglich ist, stehen auch Rettungswinden zur Verfügung (z.B. bei Einsätzen über See und im Gebirge).

Lokalisierung von Notfunksignalen durch Satelliten

Der SAR-Dienst der Bundesrepublik Deutschland nutzt das internationale Satellitensystem SARSAT/COSPAS (Search and Rescue Satellite Aided Tracking/Russische Bezeichnung für SARSAT). Dies ist ein System von weltweit verteilten Bodenstationen und derzeit vier Satelliten, die auf einer niedrigen polaren Umlaufbahn die Erde umkreisen.

Die Satelliten können Signale von Notsendern empfangen und lokalisieren. Ein Bordcomputer errechnet die Position des Notsenders und sendet sie mit Angaben über Empfangsfrequenz und –Uhrzeit zu einer Bodenstation, die diese Informationen an die örtlich zuständigen SAR-Leitstellen (Rescue Coordination Center = RCC) weiterleitet.

Jeder Satellit kann gleichzeitig bis zu 90 Notsender orten, d.h. bis zu 2.000 Notsignale pro Umlaufbahn. Notsignale im Frequenzbereich 406 MHz werden im Bordcomputer gespeichert und abgestrahlt, wenn sich der Satellit im Empfangsbereich einer Bodenstation befindet. Signale auf den Frequenzen 121.1 und 234 MHz hingegen können nur im Sichtbereich einer Bodenstation übermittelt werden, da das aufgefangene Signal vom Satelliten nicht gespeichert, sondern sofort zur Erde reflektiert wird. Eine wesentliche Verbesserung des Systems soll durch die Einbeziehung von geostationären Satelliten erreicht werden. Durch SARSAT/COSPAS wird vor allem in schwer zugänglichen Gebieten die Suche nach abgestürzten oder überfälligen Luftfahrzeugen erheblich erleichtert. Bekannt sind hier hauptsächlich Rettungsaktionen in Kanada, aber auch im Alpenraum. In Deutschland wird zur Zeit eine zentrale Stelle zur Registrierung von Notfunkgeräten eingerichtet. Außerdem werden nationale Kodierungen und Zulassungskriterien geprüft und festgelegt. Seit 1992 ist die Bundesrepublik Deutschland offizieller USER-State (Nutzer-Staat) des SARSAT/COSPAS Systems.

20.7.7 Würdigung der fliegerischen Leistung

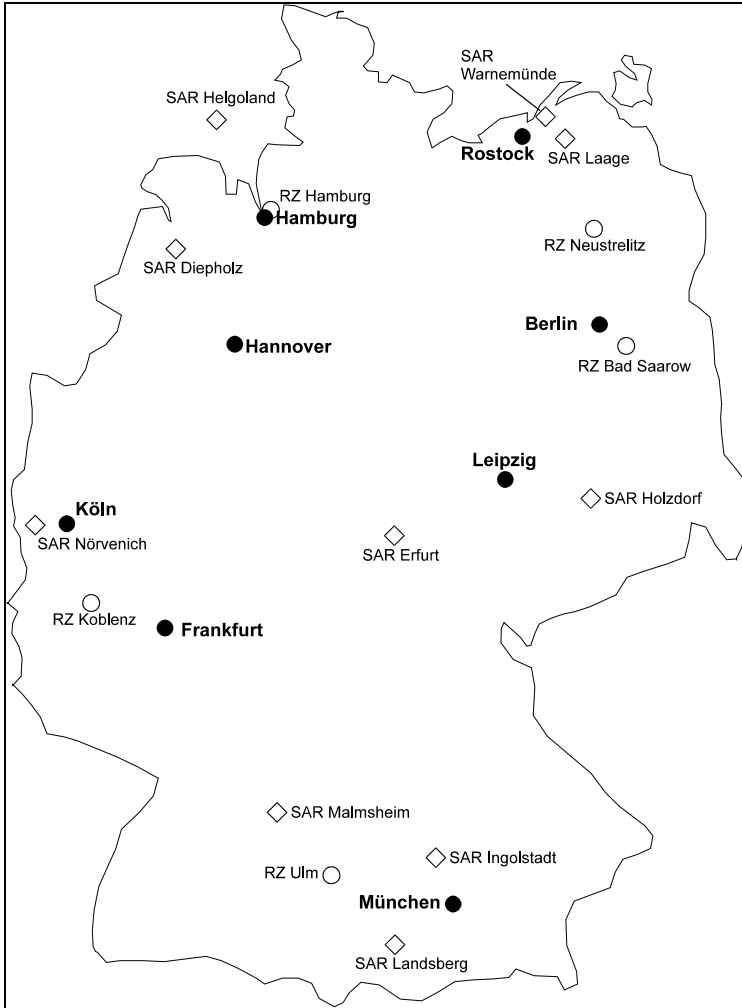


Abb. 20.8: Standorte der ständigen SAR-Einrichtungen

Aus fliegerischer Sicht verlangen SAR-Einsätze langjährige Erfahrung und höchstes Können von allen Besatzungsangehörigen. Besondere Belastungen ergeben sich aus den häufig widrigen Flugwetterverhältnissen, aus dem Zwang zur Improvisation bei der Flugplanung und aus der begrenzten technischen Ausrüstung. Der „Erfolgszwang“ beim Retten von Menschenleben und der damit verbundene hohe Entscheidungsdruck sowie das Ertragen der Bilder von Schwerstverletzten (Kindern!) kommen als psychische Beanspruchung noch hinzu. Bisher haben die „Engel der Luft“ über 100.000 Personen in Not versorgt und dabei Tausende von Menschenleben gerettet. Ferner haben sie in Fällen von dringender Nothilfe bei internationalen Katastropheneinsätzen ihr Können unter Beweis gestellt. Den Besatzungen gilt Dank und Anerkennung.

20.8 Begriffe und Abkürzungen in der Fliegersprache

AIR BASE	AB	militärischer Flugplatz
ABORT - ground/air	GA AA	Abbruch des Flugvorhabens bzw. des Fluges aus technischen oder sonstigen Gründen
AIR COMBAT MANEUVERS	ACM	Luftkampfmanöver
ATTITUDE DIRECTOR INDICATOR	ADI	Künstlicher Horizont
AILERON		Querruder; Steuerfläche zum Steuern eines Flugzeugs um die Längsachse
UNITS ANGLE OF ATTACK	AOA	Anzeigegerät/Einheiten zur Darstellung des Anstellwinkels eines Luftfahrzeuges
AUXILIARY POWER UNIT	APU	Triebwerkstartgerät
AS SOON AS POSSIBLE	ASAP	Unverzüglich
AIR TRAFFIC CONTROL	ATC	Flugverkehrskontrolle
BARRIER		Fanganlage

BASIC FIGHTER MANEUVERS	BFM	Grundflugmanöver im Luftkampf
BRIEFING		Kurzvortrag
CEILING		Hauptwolkenuntergrenze
CHOCKS		Bremsklötze
CLEAN		Flugzeugrüststand = keine Außenlasten
CLEARANCE		Flugverkehrsfreigabe, Abstand zu Hindernissen
CROSSWIND-LEG		Seitenwind, Teil der Platzrunde 90 ° querab zur Startrichtung
CROSSCHECK		Überprüfung der Instrumente und technischen Subsysteme
DASH-1		Flughandbuch für Flugzeugmuster
DOWNWIND (leg)		Teil der Platzrunde, Gegenrichtung zur Startrichtung
ELEVATOR		Höhenruder eines Luftfahrzeuges, bewegt Lfz um die Querachse
EMERGENCY (procedures)		Notfall (Notverfahren)
FINAL (final approach)		Endanflugteil einer Platzrunde
FLARE		Abfangen des Lfz vor der Landung; Leuchtkörper
FLIGHT LINE		Flugbetriebsbereich
FLIGHT PLAN		Flugplan
Flug Betriebs Handbuch	FBH	Festlegung fliegerischer Standardverfahren
FOREIGN OBJECT DAMAGE	FOD	Fremdkörper, die vom Triebwerk angesaugt werden und Schäden verursachen
FULL STOP (ldg)		endgültige Landung
GROUND CONTROLLED APPROACH	GCA	Radargeführter Anflug
GROUND CONTROLLED INTERCEPTION	GCI	Radargeführter Abfangvorgang (für Jagdflugzeuge)
GEAR		Fahrwerk
GO AROUND-PROCEDURES		Durchstartverfahren
HEAD UP DISPLAY	HUD	Frontscheibensichtgerät
INSTRUMENT FLIGHT RULES	IFR	Instrumentenflugregeln
INSTRUMENT LANDING SYSTEM	ILS	Anflugverfahren, gestützt durch einen Gleitpfadsender und einen Mittelliniensender (Glide slope localizer)
INSTRUMENT METEOROLOGICAL CONDITIONS	IMC	Instrumentenflugwetterbedingungen

INITIAL		Beginn des Sichtanflugverfahrens bei Strahlflugzeugen
LINE TAXI		Fahrzeug für Fahrten im Flugfeldbereich
LOCAL OPERATING PROCEDURES	LOP	vorgeschriebene örtliche Verfahrensweisen
NIGHT VISION GOGGLES	NVG/BIV	Bildverstärker-Brille, Nachtsehhilfe
NOTICE TO AIRMEN	NOTAM	Nachrichten für Luffahrer
ON REQUEST	O/R	auf Anfrage
OUT AND BACK	O/B	Flug mit Landung auf einem fremden Platz
PRECISION APPROACH RADAR	PAR	Radaranfluggerät
PASSENGER	PAX	Passagier
PITCH		Anstellwinkel
MISSION BRIEFING		Flugvorbesprechung
PETROL, OIL and LUBRICANTS	POL	Teileinheit Betriebsstoffe
POSTFLIGHT (-check,-briefing)		Nachflugkontrolle, Nachflugbesprechung
PRIOR PERMISSION REQUIRED	PPR	nur nach vorheriger Genehmigung
PREFLIGHT (-check,-briefing)		Vorflugkontrolle, Vorflugbesprechung
PRECISION SURVEILLANCE RADAR	PSR	Suchradar
	QNH	Luftdruck des Platzes auf MSL reduziert
QUICK REACTION ALERT	QRA	Alarmbereitschaft von Alarmrotten
REMAIN OVER NIGHT	RON	Übernachtung auf einem fremden Flugplatz
RUDDER		Seitenruder
SEARCH AND RESCUE	SAR	Such- und Rettungsdienst
STANDING OPERATING PROCEDURES	SOP	Standardisierte Verfahrensweisen
STALL		Strömungsabriss an den Tragflächen
SQUAWK (to squawk)		Absetzen eines Identifizierungssignals
STAND CHECK		Standardisierungs-Check = Überprüfungsflug und fliegertheoretische Überprüfung
TARGET	Tgt	Ziel
TOUCH AND GO		aufsetzen und durchstarten
VISUAL APPROACH SITUATION INDICATOR -lights	VASI	Optische Landeanflughilfe
VISUAL METEOROLOGICAL CONDITIONS	VMC	Sichtflugwetterbedingungen
WEAPON SYSTEM OPERATOR	WSO	Waffensystemoffizier

21 AEROMEDICAL EVACUATION

21.1 Geschichte

Die Geschichte des Verwundeten- und Krankentransportes in Luftfahrzeugen (Aeromedical Evacuation – AE) ist erst kurz und eng verbunden mit der bemannten Luftfahrt.

Die ersten, vorerst theoretischen Überlegungen werden dem niederländischen Sanitätsoffizier De Mooy zugeschrieben, der um 1910 erste Konzepte eines integrierten Verwundeten-transportsystems entwickelte, das als Transportvehikel Straßen-, Schienen- aber auch Luftfahrzeuge vorsah.

Lufttransporte Verwundeter in Heißluftballons aus dem eingeschlossenen Paris 1870 während der Belagerung durch die Preussen, über die mancherorts anekdotenhaft berichtet wird, sind wohl eher der Phantasie entsprungen; historisch belegbar ist dies jedenfalls nicht.

Franzosen setzten die ersten Luftfahrzeuge während des ersten Weltkrieges (ab 1917) routinemäßig für den Transport Kranker und Verwundeter ein; Capitaine Dr. Chassaing ließ eine Dorand AR so umbauen, dass zwei übereinanderliegende Tragen durch oben angebrachte Luken in den Rumpf eingebracht werden konnten.

Während des spanischen Bürgerkrieges wurde AE von den Deutschen (Legion Condor) erstmals in größerem Umfang betrieben; das Mehrzweck-Transportflugzeug JU 52 wurde dazu mit 10 Tragen ausgerüstet; die Kabine war beheizbar und für den Flug in größeren Höhen mit Möglichkeiten zu Sauerstoffapplikation ausgestattet.

Im zweiten Weltkrieg war das Prinzip des Lufttransportes von Verwundeten und Kranken im militärischen Alltag auf Seiten der Achsenmächte wie der der Alliierten voll etabliert. Das US-Army Air Corps evakuierte bis 1945 1,25 Millionen Soldaten in Luftfahrzeugen und mit einer eingeschränkten medizinischen Versorgung an Bord (Flight Nurses).

Während im zweiten Weltkrieg noch ca. 4 % der Verwundeten auf dem Weg zur ersten chirurgischen Versorgung verstarben, konnte dieser Prozentsatz im Vietnamkrieg durch die Einführung von Rettungshubschraubern in vorderster Linie auf 1 % reduziert werden.

Die operationelle Notwendigkeit eines qualifizierten AE-Systems kann auch in jüngster Zeit aus den Erfahrungen des Golfkrieges abgeleitet werden, als ungefähr 30 000 alliierte Soldaten aus gesundheitlichen Gründen aus dem Konfliktgebiet ausgeflogen wurden.

Während des Einsatzes auf dem Balkan 1999 evakuierte die Deutsche Luftwaffe 302 Soldaten durch Lufttransport, 25 Patienten davon in kritischer Verfassung.

Im Verlauf der UN Interfet Mission (21.10.99 – 23.02.2000) flogen deutsche C 160 Transall 230 Soldaten und Zivilisten von Ost-Timor nach Darwin/Australien aus, von denen 25 Patienten Intensivpflege benötigten.

21.2 Operationelle Anforderungen

Die NATO Strategie änderte sich mit dem Ende des kalten Krieges. Die Integration von Krisenreaktionskräften in die neue Militärstrategie der NATO, die durch die Schlagwörter **Kräftkonzentration, Flexibilität, globale Beweglichkeit, Multinationalität** und **schnelle Verstärkung** umschrieben werden kann, setzt einen effizienten Sanitätsdienst voraus. Zusätzlich zu eigenständigen nationalen Aufgaben muss er fähig sein, in internationalem Rahmen mit anderen Sanitätsdiensten zusammenzuarbeiten (Standardisierung).

Dies beschreibt auch die Einsatzmöglichkeiten des Sanitätsdienstes im nationalen Bereich, in der kollektiven Verteidigung und in Friedenunterstützenden Operationen.

In diesem Zusammenhang ist es eine militärische Notwendigkeit, dass der Sanitätsdienst die gleiche Flexibilität und Beweglichkeit besitzt wie die zu unterstützenden militärischen Einheiten. Auf diese Weise kommt dem Transport von Verwundeten und Kranken eine neue – und wichtigere – Bedeutung zu, was Qualität und Quantität anbelangt.

Die Reaktionsfähigkeit des Sanitätsdienstes und speziell die eines AE-Systems muss angepasst sein der Reaktionsfähigkeit von internationalen UN-Krisenreaktionskräften, NATO Reaction Forces und von Einheiten, die zu Rettungs- und Evakuierungsoperationen eingesetzt werden. Darüber hinaus muss sich der Sanitätsdienst auf ad-hoc Operationen bei Katastrophen einrichten. Um solche Operationen durchhaltefähig ausführen zu können, ist ein effizientes AE-System operationell unabdingbar.

Der Inspekteur des Sanitätsdienstes der Bundeswehr hat in den **Fachlichen Leitlinien** zur sanitätsdienstlichen Versorgung von Soldaten im Auslandseinsatz vom 27.09.1995 folgende Maxime festgelegt:

„Die Maxime der sanitätsdienstlichen Auftragserfüllung ist, dass den Soldaten bei einem Einsatz außerhalb des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland für den Fall einer Erkrankung, eines Unfalls oder einer Verwundung eine medizinische Versorgung zuteil wird, die im Ergebnis dem fachlichen Standard in der Bundesrepublik entspricht.“

Dies gilt sicherlich auch für die ineinandergreifende Kette sanitätsdienstlicher Transporte.

Die Durchführungsanweisungen zum deutschen AE-System sind in den „**Fachdienstlichen Anweisungen des Inspektors des Sanitätsdienstes der Bundeswehr**“ B 45.01 beschrieben. Das Nato – Standardisierungsabkommen **STANAG 3204** legt alle für eine AE in NATO-Zusammenarbeit notwendigen Vorgaben – Ausrüstung und Verfahren - fest.

Aeromedical Evacuation (AE) ist definiert als Transport von Patienten unter sanitätsdienstlicher Betreuung in Luftfahrzeugen. Sie umfasst bis zu drei aufeinander folgende Phasen:

Forward AE. Diese Phase beschreibt den Transport von Patienten vom Punkt der Verwundung (battlefield) zu Punkten der ersten und folgenden sanitätsdienstlichen Versorgung innerhalb der Kampfzone (combat zone).

Tactical AE. Diese Phase beschreibt den Transport von Patienten von der Kampfzone zu Punkten einer höherwertigen sanitätsdienstlichen Versorgung der Communication Zone (COMMZ) oder innerhalb der COMMZ.

Strategic AE. Die strategische AE beschreibt den Transport von Patienten aus dem Einsatzgebiet nach Deutschland, bzw. in das Heimatland des Soldaten.

Zusätzlich zu den operationellen Vorgaben und Planungen, die einen Lufttransportbedarf von Kranken und Verwundeten voraussagen, wird der Umfang von AE durch die „Evacuation Policy“ beeinflusst, die die militärische Führung festlegt. In dieser Evacuation Policy ist festgelegt, bis zu wieviel Tagen ein kranker/verwundeter Soldat im Einsatzland versorgt werden darf. Wird er nach Einschätzung der behandelnden Ärzte diese Frist überschreiten, muss er so bald wie möglich und wenn es sein gesundheitlicher Zustand erlaubt, zurücktransportiert werden – per AE.

21.3 Allgemeine / flugmedizinische Aspekte

AE ist gewöhnlich die schnellste und in vielen Fällen die einzige lebensrettende Transportform. Dies erwächst aus dem Wissen, dass die schnellstmögliche klinische Behandlung akuter Erkrankungen/Verletzungen die Prognose für die Patienten erheblich verbessert, was Sterblichkeit, Invalidität und die Entwicklung von posttraumatischen Stresserkrankungen (PTSD) angeht. Die Dislozierung von modularen sanitätsdienstlichen Einheiten im Einsatzland ist daher genauso unabdingbar wie die Einrichtung eines AE-Systems auf allen Ebenen, das in der Lage ist, schnellen Transport von Patienten zwischen den sanitätsdienstlichen Einrichtungen zu bewerkstelligen, ohne den Level der medizinischen Versorgung während des Transportes herunterzuschrauben.

Vorausgesetzt, genügend Material „state of the art“ und entsprechend ausgebildetes Personal sind vorhanden, sollte es nach ausreichender und sorgfältiger Vorbereitung keine absolute Kontraindikation gegen eine AE geben. Ein qualifizierter Lufttransport von Verwundeten

und Kranken kann nur dann so effizient wie möglich durchgeführt werden, wenn die medizinisch-technischen Voraussetzungen gegeben sind und das begleitende sanitätsdienstliche Personal entsprechend ausgebildet ist. Dazu gehören grundlegende Kenntnisse vom Fliegen, von Flugmedizin und Flugphysiologie, aber auch die klinisch-technische Expertise in Notfall- und Intensivmedizin.

Das begleitende sanitätsdienstliche Personal ist Teil der Besatzung (Additional Crew Member - ACM) und muss auf die Besonderheiten und Rettungseinrichtungen des Luftfahrzeuges eingewiesen sein.

Der immense logistische und finanzielle Aufwand für solch ein AE-System kann nur dadurch gerechtfertigt werden, dass auch die medizinische Versorgung während des Fluges dem Standard der medizinischen Versorgung zu Hause entspricht.

In diesem Zusammenhang sind jedoch die physikalischen und physiologischen Faktoren, die während eines Fluges auf die Patienten, das medizinische Team und auf die Ausrüstung wirken, von besonderer Bedeutung:

21.3.1 Abnahme des Luftdruckes

Der Luftdruck in einer Flugzeugkabine sinkt je nach Flugzeugmuster und Flughöhe bis zu ca. 560 mm Hg (8000 ft bzw. 2400 m). Nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte dehnen sich trockene Gase dabei um den Faktor 1,35 aus, feuchte Gase um den Faktor 1,39. Überall, wo im Körper eines Patienten Lufteinschlüsse nachzuweisen oder zu vermuten sind, ist dieser Gasausdehnung Rechnung zu tragen:

- Luft in der Nasenebenhöhlen und im Mittelohr – abschwellende Nasentropfen; Patienten im Sinkflug wecken; bei bewussten Patienten ggfs Parazentese
- Lufteinschlüsse nach Operationen (Schädel, Augen, Thorax, Abdomen) – ausreichende Drainagen, Magensonde, Darmrohr, Thoraxdrainagen offen oder mit Ventil
- Infektionen durch gasbildende Bakterien (Gasbrand) – Entlastungsschnitte, Analgetika

Die Gasausdehnung beeinflusst aber auch medizinisches Gerät:

- Im Tubuscuff steigt der Druck – Cuffdruckmesser!
- Vakuummatratzen werden weich.
- In pneumatischen Schienen steigt der Druck und gefährdet die Perfusion der Extremität.
- Infusionen aus Glasflaschen und ohne ausreichende Belüftung werden zu Druckinfusionen.

Leidet der zu transportierende Patient an einer Dekompressionskrankheit, kann durch den weiter abfallenden Luftdruck die Symptomatik verschlimmert werden. Solche Patienten sollten deshalb zumindest in der Ausgangsplatzhöhe transportiert werden.

21.3.2 Abnahme des O₂-Partialdruckes

Mit der Abnahme des Luftdruckes kommt es nach dem Gesetz von Dalton auch zu einer Abnahme des O₂-Partialdruckes von 160 mmHg in sea level auf 117 mmHg in 8000 ft Höhe. Diese Verringerung des O₂-Partialdruckes ist für einen gesunden Passagier sicher unerheblich; ein Patient mit einer Störung der Ventilation, des Gasaustausches und/oder der Perfusion (z.B. Asthma, chron. Bronchitis, KHK, Anämie), der unter normalen Bedingungen gerade noch kompensiert ist, kann durch das verringerte Sauerstoffangebot dekompensieren.

Darüberhinaus muss sich jeder Intensivmediziner darüber im Klaren sein, dass aufgrund des niedrigeren Luftdruckes eine Beatmung mit 100 % O₂ in einer Höhe von 8000 ft nur noch einer Beatmung mit ca. 75 % O₂ in Sea level entspricht. Andererseits kann er natürlich in dieser Höhe aus einer Sauerstoffflasche rund 30 % „mehr“ Gas entnehmen.

21.3.3 Temperaturänderungen

Wie schon in Kap. 1 gezeigt, nimmt die Temperatur um ca. 2 °C je 1000 ft Höhe ab. In Luftfahrzeugen, deren Innenraum nicht sehr gut wärmegeklämt ist, oder deren Klimaanlage nicht überall für eine gleichmäßige Temperatur sorgt, wie z.B. in der C 160 Transall, können deshalb Patienten auf bestimmten Tragenplätzen schnell auskühlen, insbesondere, wenn sie in Kontakt mit Metallteilen der Tragenhalterungen kommen. Der durch die Abkühlung erhöhte Sauerstoffbedarf kann die Problematik des verminderten Sauerstoffangebot in der Höhe noch zusätzlich verschärfen.

21.3.4 Luftfeuchtigkeit

Die äußerst geringe Luftfeuchtigkeit in Flugzeugen (3 – 15 %), die durch die technische Auslegung der Klimaanlage bedingt ist, führt sehr schnell zur Austrocknung von Schleimhäuten, besonders natürlich bei bewusstlosen Patienten (Augen, Mundschleimhäute), aber auch zur schnellen Dehydratation, wird dem nicht durch Gabe von Getränken oder vermehrten Infusionen entgegengewirkt.

21.3.5 Lärm

Der z.T. sehr hohe Geräuschpegel in Luftfahrzeugen macht einerseits die Kommunikation von Sanitätspersonal zu Patienten mühsam, aber auch die innerhalb des Sanitätsteams. Akustische Alarmsignale von medizinischen Überwachungsgeräten werden überhört; der Gebrauch eines Stethoskopes zum Abhören von Herztönen oder Lungengeräuschen ist sinnlos.

Sehr hohe Lärmpegel, wie sie in Hubschraubern auftreten, können zu unerwünschten vegetativen Reaktionen bei den Patienten führen; in solchen Fällen sind sie – auch die bewusstlosen - mit einem geeigneten Gehörschutz zu schützen.

21.3.6 Vibrationen

Vibrationen durch Triebwerke, Rotoren und Propeller führen zu Körpererschütterungen, die insbesondere bei Patienten mit Frakturen unerwünscht sind; eine gute Abpolsterungen des Frakturbereiches und eine ausreichende Analgesierung müssen hier Beachtung finden.

21.3.7 Beschleunigungen

Beschleunigungen wirken auf die Patienten nicht nur während Start und Landung, sondern auch während des Fluges bedingt durch Turbulenzen, die auch die Piloten manchmal nicht voraussehen können (clear air turbulences). Zusammen mit den Vibrationen, Treibstoff-/Ölgerüchen und persönlichen Ängsten wird hier die Basis für Kinetosen gelegt, die jede Erkrankung während eines Fluges noch weiter verschlechtern können.

21.4 Aeromedical Evacuation in der Bundeswehr

Bei der taktischen und strategischen AE muss mit mehrstündigen Transportzeiten gerechnet werden, was die Verwendung von medizinischen Überwachungsgeräten für schwerverletzte und intensivpflichtige Patienten unbedingt notwendig macht. Gleichzeitig muss eine bisher durchgeführte Therapie weitergeführt werden können.

Im Lichte der o.g. Maxime der Verwundetenversorgung müssen u.a. folgende Krankheits-/Verletzungsbilder umgehend mit schnellem (Luft-) Transport in eine geeignete hochwertige und definitive sanitätsdienstliche Versorgung gebracht werden:

- Patienten mit schweren Verbrennungen, die mit vergleichsweise geringen Umständen innerhalb der ersten 24 Stunden, in denen Komplikationen noch selten sind, in eine Spe-

zialklinik zu einer adäquaten Versorgung (Hauttransplantation, Dialyse, Intensivtherapie) evakuiert werden können.

- Polytrauma-Patienten mit oder ohne Verbrennungen, denen ein posttraumatisches Nierenversagen mit konsekutivem Multiorganversagen droht und die deshalb nach einer ersten chirurgischen Notversorgung umgehend zu einer sanitätsdienstlichen Einrichtung weitertransportiert werden müssen, die außer der Dialyse auch eine definitive chirurgische Versorgung anbieten kann.
- Patienten mit Nervenverletzungen benötigen nach der notwendigen neurochirurgischen Versorgung die Weiterbehandlung/Rehabilitation in einer Spezialklinik (Tetraplegie; Apallische Syndrom u.ä.)
- Patienten mit Vergiftungen durch chemische Waffen benötigen häufig eine Langzeitbeatmung, insbesondere nach Inhalation des Giftes; solche Patienten müssen zur Entlastung der sanitätsdienstlichen Kapazitäten im Einsatz möglichst schnell in eine entsprechende Therapie- und Rehabilitationseinrichtung verlegt werden.

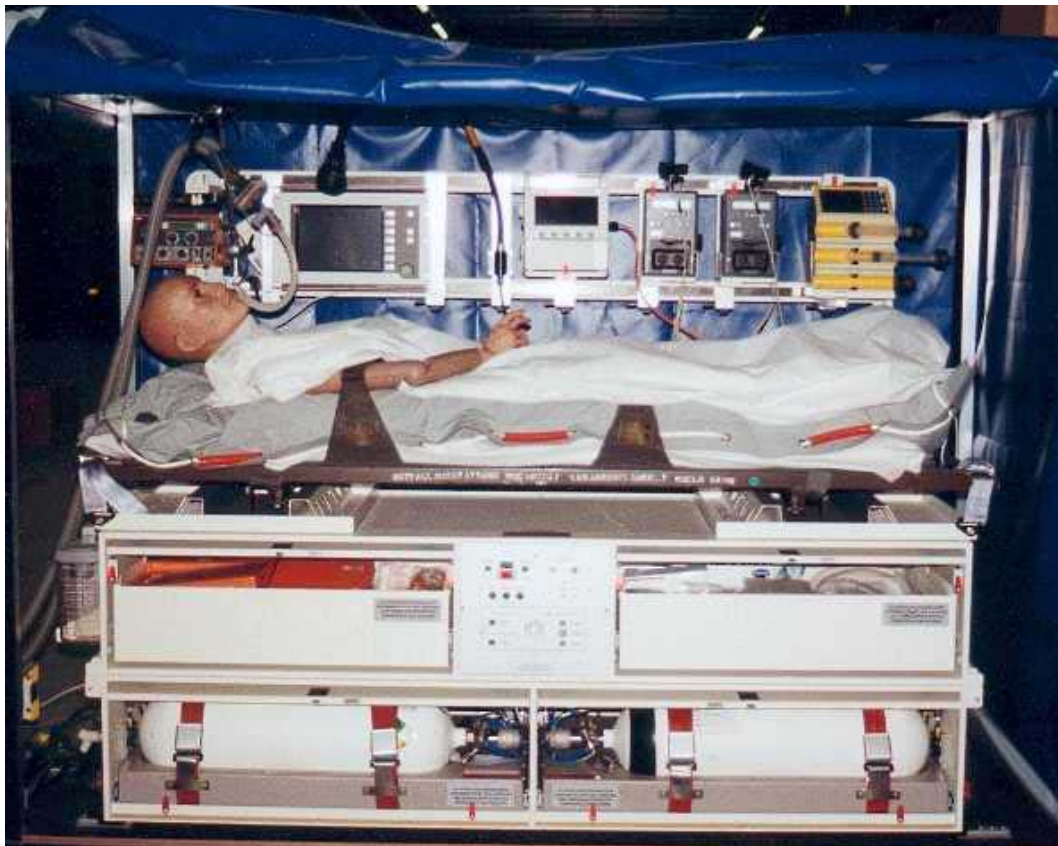


Abb. 21.1: PTE (Patiententransporteinheit)

Um solche Patienten während eines mehrstündigen (bis zu 8 Stunden Dauer) Fluges versorgen und überwachen zu können, entwickelte die Bundeswehr eine Patiententransporteinheit (PTE), die all den beschriebenen Anforderungen gerecht wird, und in die unterschiedlichen Flugzeugmuster der Bundeswehr eingebaut werden kann.

Die PTEs sind so ausgelegt, dass intensivbeatmungspflichtige Patienten darauf bis zu 8 Stunden versorgt und überwacht werden können. Dazu sind sie mit einem Respirator (Evita 4) und einem Notfallrespirator (Oxylog 2000), einem Multifunktionsmonitor (Propaq 106 EL: RR-Messung, EKG, Pulsoxymetrie, Kapnometrie, Temperatur, invasive Drücke), 3-er Kombi-Spritzenpumpen (Combimat CS 03), einem Infusomaten (IP 200 V) und einer Absaugpumpe

(Accuvac Rescue) ausgestattet. Ein Defibrillator (Zoll M) und eine Schaufeltrage werden mitgeführt. Die med. Geräte der PTE sind mit Schnellverschlüssen auf einer Doppelschiene mittels Adaptern eingeklinkt, wodurch höchste Flexibilität gewährleistet ist. Selbst während des Fluges können Geräte sekundenschnell getauscht werden. An der PTE kann man alle Arten von zugelassenen Tragen befestigen. Standardmäßig wird die NATO-Trage eingesetzt. Die Strom-Versorgungs-Einrichtung der PTE wandelt den vom Lfz produzierten Strom (110 V/400 Hz) in „haushaltsüblichen“ Wechselstrom (220 V / 60 Hz), sowie in Gleichstrom verschiedener Spannungen um, wie er zum direkten Betrieb der medizinischen Geräte erforderlich ist. In den Schubladen unterhalb der Trage befinden sich Medikamente, medizinisches Verbrauchsmaterial und je zwei Sauerstoff- und Luftflaschen zum Betrieb des Respirators.

Zwischen dem Patienten und der Geräte-Doppel-Schiene befindet sich eine Steck-Dosen-Leiste, die vom PTE Trafo versorgt wird. Alle medizinischen Geräte, auch die Evita 4, sind über Akkus für die Dauer von 4 Std. abgepuffert. Die beiden Schmalseiten der PTE sind identisch aufgebaut, so dass die PTE sowohl an der rechten, als auch an der linken Seite des LFZ eingebaut werden kann. Auch die Absaugpumpe kann an beiden Schmalseiten montiert werden. Die PTE besteht aus mehreren Teilen, die mit Schnellverschlüssen verbunden sind. Eine PTE kann in weniger als 30 Minuten komplett im Lfz zusammengebaut, adaptiert und mit medizinischem Gerät bestückt werden.



Abb. 21.2: PTE eingerüstet in eine C-160 „Transall“

identisch aufgebaut, so dass die PTE sowohl an der rechten, als auch an der linken Seite des LFZ eingebaut werden kann. Auch die Absaugpumpe kann an beiden Schmalseiten montiert werden. Die PTE besteht aus mehreren Teilen, die mit Schnellverschlüssen verbunden sind. Eine PTE kann in weniger als 30 Minuten komplett im Lfz zusammengebaut, adaptiert und mit medizinischem Gerät bestückt werden.

Diese PTE können für die taktische AE in der Transall C 160 (Abb. 21.2) eingebaut werden: Dabei können bis zu 3 intensivpflichtige Patienten auf je einer PTE und zusätzlich bis zu 10 weitere liegende Patienten, ebenfalls mit Monitorüberwachung, transportiert werden. Grundsätzlich besteht die medizinische Crew in einem solchen Fall aus einem Fliegerarzt, einem Anästhesisten, einem Arzt mit der Fachkunde Rettungsdienst, vier Rettungsassistenten und vier Rettungsassistenten.

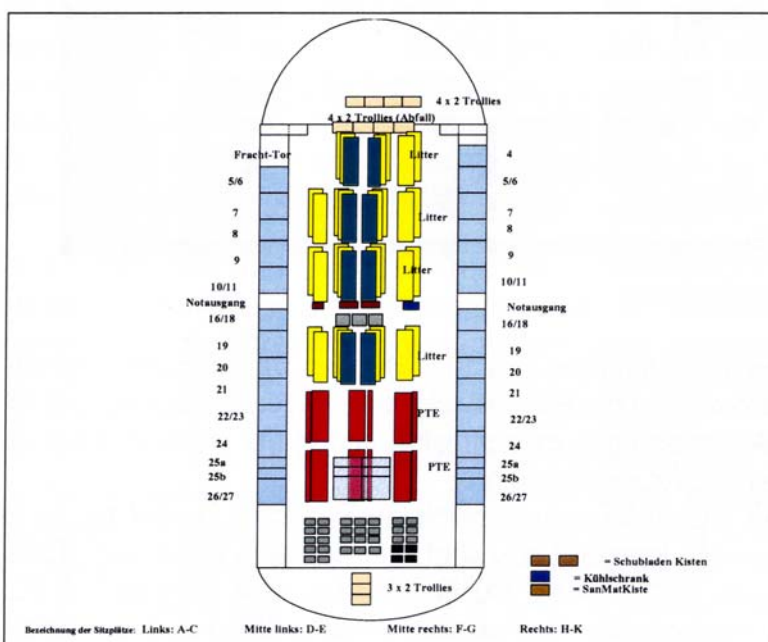


Abb. 21.3: Rüstplatz im Airbus A-310 mit 6 PTE

Für die strategische AE können Airbus A 310 der Flugbereitschaft BMVg eingesetzt werden (Abb. 21.3), die in der Lage sind, bis zu sechs intensivpflichtige Patienten auf PTE und zusätzlich bis 38 liegende Patienten auf Tragen zu transportieren. Die medizinische Crew wird auch hier grundsätzlich bedarfsabhängig zusammengestellt und umfasst bis zu 25 Ärzte, Rettungsassistenten und Sanitäter. Je nach Einsatz (humanitäre Hilfseinsätze) können zusätzlich Verwandte (Eltern) oder Dolmetscher mitgenommen werden.

21.5 Zusammenfassung

Ausreichende und qualifizierte AE-Kapazitäten bei und zwischen allen Ebenen der Verwundetenversorgung sind die Voraussetzung für einen schnellen und, wenn indiziert, medizinisch intensiv überwachten Transport von kritisch Kranken und/oder Verwundeten zu Sanitätseinrichtungen der definitiven Versorgung oder Rehabilitation.

Um den Patientenflow zu kontrollieren und zu koordinieren, muss den strukturellen und prozeduralen Voraussetzungen (Command, Control, Communication, Computer, Information = C4I) die höchsten Priorität eingeräumt werden. Diese Organisation muss in der Lage sein, kompetent und schnell auf alle denkbaren mit AE verknüpften Szenarios zu reagieren, sei es auf nationale, internationale Einsätze, humanitäre oder militärische Operationen, Kurz- oder Langstrecke.

Dies erfordert:

- Qualifizierte ausgebildete und in Übung gehaltene designierte AE- Einheiten
- Zentralisierte Command, Control und Communication - Strukturen (C3)
- Internationale Standards für Geräte und Verfahren
- Kompatibilität der medizinischen Geräte
- Luftfahrzeuge, die bei jedem Wetter, bei Tag und Nacht fliegen können und weltweite Kommunikationsmöglichkeiten besitzen
- Eingeübte zivil-militärische Zusammenarbeit

Die gerätemäßigen Voraussetzungen dafür sind mit der Einführung der PTE in der Bundeswehr geschaffen worden; die Luftfahrzeuge sind vorhanden; am Flugmedizinischen Institut der Luftwaffe in Fürstenfeldbruck werden AE-Lehrgänge für Sanitätsoffiziere und Unteroffiziere durchgeführt, für die als Teilnahmevoraussetzung Grundkenntnisse in Flugmedizin sind sowie eine Ausbildung in Notfallmedizin. Seit Februar 2002 wird zusätzlich ein Kurs für Anästhesisten und Intensivpersonal angeboten.

Die Bundeswehr besitzt damit ein leistungsfähiges AE-System, das seinesgleichen auf der Welt sucht.

Mit dieser Art der AE betritt die kurative Medizin die dritte Dimension.

21.6 Verwendete und weiterführende Literatur

STANAG 3204 Fachliche Leitlinien zur sanitätsdienstlichen Versorgung von Soldaten im Auslandseinsatz vom 27.Sept.1995

„Fachdienstliche Anweisung des Inspektors des Sanitätsdienstes der Bundeswehr“ B 45.01

Martin Terence, Rodenberg Howard D. Aeromedical Transportation: A Clinical Guide. Avebury Aviation, Hants, 1988

Rödig E., Lufttransport von Verwundeten und Kranken im humanitären und militärischen Einsatz. Europäische Sicherheit 5, 21 – 24, 1998

Howell F. J., Brannon R. H. Aeromedical evacuation: remembering the past, bridging to the future. Military Medicine, 165 (6), 429 – 433, 2000

Ternus M. P. Bosnia and Kosovo: aeromedical evacuation in the initial stages of deployment. *Aviat. Space Environ. Med.*, 72, 357 – 360, 2001

Marby W., Munson R. A., Richardson L. A. The wartime need for aeromedical evacuation physicians. The U.S. Air Force experience during operation Desert Storm, *Aviat. Space Environ. Med.*, 64, 941 – 6, 1993

Barbash G. I, Ribak J., Revach M., Swedenburg M. G., Dolev E. Management control of aeromedical evacuation systems. *Aviat. Space Environ. Med.*, 59, 172 – 5, 1988

Lyons J. L., Connor S. B. Increased flight surgeon role in military aeromedical evacuation. *Aviat. Space Environ. Med.*, 66, 927 – 9, 1995

22 TROPENMEDIZIN

Der zunehmende Tourismus in die warmen Länder und Wanderungsbewegungen aufgrund politischer Krisen führen zum Auftreten von Infektionskrankheiten, die bei uns kaum oder gar nicht vorkommen. Obwohl die Tropenkrankheiten eine hohe Aktualität haben, ist die Tropenmedizin in Deutschland ein Fach mit untergeordneter Bedeutung. Die Approbationsordnung verlangt keine tropenmedizinische Ausbildung. Demzufolge sind die tropenmedizinischen Kenntnisse bei unseren Medizinern nicht ausreichend. Nach den ersten großen Tropeneinsätzen der Bundeswehr in Kambodscha 1992 – 1993 und Somalia 1993 – 1994 wurde klar, dass sich der Sanitätsdienst mit allen Aspekten der Tropenmedizin auseinandersetzen muss. Bis zum Einsatzbeginn 1992 waren tropenmedizinische Qualitäten im Sanitätsdienst nur in wenigen Einzelfällen gefragt. Ausgenommen hiervon ist sicher der Marinesanitätsdienst. Tropenkrankheiten müssen zunehmend in differentialdiagnostische Überlegungen einbezogen werden. Zu Recht wird von den Fernreisenden eine fachgerechte Beratung hinsichtlich prophylaktischer und reisemedizinischer Maßnahmen gefordert. Durch die Erweiterung des Aufgabenspektrums der Bundeswehr wurde es notwendig, auch für längere Einsatzzeiten in spezifisch belasteten Einsatzorten Vorsorge zu treffen. Die sanitätsdienstliche Mitversorgung fremder Streitkräfte im Rahmen internationaler Einsätze sowie die medizinische Nothilfe bei humanitären Einsätzen fordern eine breite tropenmedizinische Fachkompetenz.

22.1 Definition und historische Entwicklung:

Allgemein wird die Tropenmedizin als die Erkennung, Behandlung und Prävention von Erkrankungen verstanden, die typischerweise in tropischen Klimazonen vorkommen.

Sie befasst sich mit der

- Epidemiologie
- Ätiologie
- Pathogenese
- Diagnostik, klinischen Symptomatik, Therapie und Prophylaxe übertragbarer und nicht-übertragbarer tropischer Erkrankungen.

Die Tropenmedizin entstand als eigenständige Disziplin im 19. Jahrhundert aus der Notwendigkeit heraus, Seeleute, Kolonisten und Soldaten vor den gesundheitlichen Gefahren in den Tropen zu schützen. Die Inhalte der Tropenmedizin waren und sind einem stetigem Wandel unterzogen. Aus Sicht der Streitkräfte können 4 Aufgabenschwerpunkte in der Tropenmedizin definiert werden:

- Infektionsepidemiologie
- Klinische Tropenmedizin
- Präventivmedizin
- Tropenlabordiagnostik

Tropentauglichkeit (d.h. Lebensfähigkeit unter besonderen Bedingungen) wird durch drei Faktoren bestimmt:

1. Mensch (körperlich und psychisch)
2. Umgebung (Klima, soziales Umfeld, Krankheitsspektrum)
3. Zeit

Die Tropenmedizin in den Streitkräften muss neben der Situation in den prospektiven tropischen Einsatzländern auch die Besonderheiten des militärischen Dienstes berücksichtigen.

Ziel ist es, durch rechtzeitige Erkennung und Behandlung sowie durch geeignete Maßnahmen zur Verhütung von Tropenkrankheiten die Gesundheit des einzelnen Soldaten zu schützen oder wiederherzustellen. Um eine Gefährdungsbeurteilung mit entsprechenden Empfehlungen für Präventivstrategien bei einer Tropenexposition vornehmen zu können, muss man zunächst die Rahmenbedingungen des geplanten Aufenthaltes in den Tropen betrachten. Soldaten sind in unterschiedlichen Funktionen und von unterschiedlicher Dauer tropischen Gesundheitsgefahren ausgesetzt. Langzeitaufenthalte, Urlaubsaufenthalte mit verschiedenen Reiseprofilen (Hotel, Strandurlaub, Trekkingreise), Marinesoldaten mit immer wieder neuen Häfen, fliegendes Personal (z.T. mit Kurzaufenthalten) und größere Kontingente von Soldaten in internationalen Einsätzen bedürfen einer differenzierten Betrachtung.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die infektionsepidemiologische Risikobewertung.

Dazu gehören:

- die Überwachung der Prävalenz und Inzidenz endemischer Infektions- und Tropenerkrankungen, auch von auftretenden Epidemien,
- die geographische und demographische Verteilung in den entsprechenden Ländern sowie eine mögliche Saisonalität von Erkrankungen (z.B. Malariaphylaxe in Afghanistan von Mai – November).

Auch das Vorkommen von Gifttieren oder –pflanzen muss berücksichtigt werden.

Desweiteren sind Informationen zu Wetterdaten (z.B. Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsprofile) wichtig, um potentielle Belastungen einschätzen zu können. Die so zusammengeführten Informationen erlauben eine erste Risikoanalyse und Beratungs- und Vorsorgemaßnahmen. Idealerweise sollte bei größeren Einsätzen ein qualifiziertes Vorkommando vor Ort die Gegebenheiten verifizieren und damit gegebenenfalls eine Optimierung der Vorsorgemaßnahmen ermöglichen.

22.2 Ausgewählte Beispiele einsatzrelevanter Tropenerkrankungen:

22.2.1 Malaria: (mala aria = schlechte Luft)

Die Malaria ist noch immer die bedeutendste Krankheit in den Tropen. 300 – 500 Millionen Menschen erkranken jährlich an dieser Parasitose. Nach Bekämpfungsmaßnahmen in den 60er Jahren und einem zeitweiligen Rückgang der Erkrankungszahlen, wird seit Jahren eine weltweite Inzidenz- und Prävalenzzunahme beobachtet. Ursachen sind die Resistenz der Vektoren gegen Insektizide, Resistenz der Erreger gegen Chemotherapeutika und –prophylaktika. Begünstigend wirken sich die politische und ökonomische Destabilisierung in vielen Endemiegebieten aus. Die Erkrankung wird durch 4 verschiedene Plasmodienarten verursacht und durch die nachtaktiven weiblichen Mücken der Gattung Anopheles übertragen. Bei den nichtimmunen Europäern kann der Erreger der Malaria tropica (*Plasmodium falciparum*) sehr schnell einen tödlichen Verlauf verursachen.

Wichtig für die Prognose ist die Früherkennung und Behandlung. Leider kommen in Deutschland Todesfälle noch immer weitaus häufiger vor als in anderen westlichen Industriestaaten. Das liegt im wesentlichen an der späten Diagnostik und dem verzögerten Behandlungsbeginn. Eine *Diagnose* der Malaria ist mit relativ einfachen Mitteln (Mikroskop, Färbelösung) möglich, eine entsprechende Erfahrung des Untersuchers vorausgesetzt. Diese Diagnose muss einsatznah und vor Ort durchgeführt werden können. Die Behandlung muss rechtzeitig mit der für die geographische Region richtigen Chemotherapie beginnen. *Praxistip:* Jedes Fieber nach Tropenaufenthalt ist malariaverdächtig. Die frühe Diagnose ist daher entscheidend für das Überleben des Patienten. Dicke Tropfen und Ausstriche sollten unverzüglich mehrfach angefertigt und bei bestehendem Verdacht wiederholt werden.

Die individuelle *Malariaphylaxe* besteht aus der Expositionsprophylaxe, der Chemoprophylaxe sowie der Mitnahme einer Therapiereserve („stand-by“). Letzteres ist keine Prophylaxe im eigentlichen Sinne. Reisende sollten sie dann einsetzen, wenn Fieber oder andere malariaähnliche Symptome auftreten und ärztliche Hilfe nicht unmittelbar erreichbar ist. Die *Empfehlungen zur Malariaphylaxe* unterliegen jedoch Änderungen und müssen auch innerhalb des Landes unterschiedliche epidemiologische Bedingungen berücksichtigen. Aktuelle Informationen (speziell für Kinder und bei Langzeitaufenthalten) sollten bei den Tropeninstituten, entsprechenden Beratungsstellen oder der Deutschen Gesellschaft für Tropenmedizin (DTG) eingeholt werden (s. Anhang)

22.2.2 Durchfallerkrankungen:

Eine klassische Hygienemangelerkrankung ist die **Cholera**. Bei mangelnder Sanitärhygiene kann sich die Krankheit explosionsartig ausbreiten. Die Wirksamkeit von Impfstoffen gegen Cholera ist bisher ungenügend.

Typhus: neben der oralen Lebendvaccine steht jetzt auch ein parenteraler Totimpfstoff zur Verfügung. Die Vielzahl der bakteriellen, viralen und parasitären Auslöser machen Durchfallerkrankungen zu einer ernststen Bedrohung für jeden Auslandsaufenthalt. Die einfache, sogenannte *Reisediarrhoe*, ist in der Regel mit symptomatischen Maßnahmen (Flüssigkeits- und Elektrolytersatz) nach 3 Tagen ausgestanden. Sobald aber *Fieber oder Blutbeimengungen* im Stuhl beobachtet werden, müssen Erreger wie **Shigellen, Salmonellen, Campylobacter** oder auch **Protozoen** wie Amöben ausgeschlossen werden. Auch hier sind *einsatznahe Diagnostik und Therapie* notwendig. Bei gehäuftem Auftreten von Durchfallerkrankungen müssen die präventivmedizinischen Maßnahmen überprüft werden. Prophylaktisch am sichersten ist die Verwendung von Einsatzverpflegung und aufbereitetem Wasser.

Amöbiasis: Man unterscheidet heute zwischen den gewebsinvasiven Parasiten *Entamoeba histolytica* und den zweiten *apathogenen, Entamoeba dispar*. Morphologisch sind beide nicht zu unterscheiden. Eine entsprechende Symptomatik mit mikroskopischem Amöbennachweis muss jedoch im Einsatz eine spezifische Behandlung zur Folge haben.

Leishmaniose: Hierbei handelt es sich um eine durch die Gattung *Leishmania* hervorgerufene Protozoenerkrankung, die entstellende Haut-, Schleimhaut- und Organinfektionen verursachen kann. Diese werden durch Sandmücken (Phlebotomen) übertragen. Sie sind nachtaktiv und können in niedriger Höhe auch Moskitonetze durchdringen. Reservoir für die Erreger sind, je nach Spezies, Hunde, Füchse oder wildlebende Nager.

Tropische Arboviren: Beispiele sind das Dengue-Fieber und Gelbfieber, die durch tagaktive *Aedes*-Mücken übertragen werden. Die Abfallhygiene ist ein wichtiges Element der Prävention. *Aedes*-Mücken finden schon bei kleinsten Wassermengen gute Brutbedingungen (z.B. alte Autoreifen, Konservenbüchsen). Schutz vor Mückenstichen, auch tagsüber, ist essentiell.

Bezüglich weiterer Erkrankungen in den Tropen (z.B. Wurminfektionen) sei auf die einschlägige Literatur verwiesen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Prävention im Tropeneinsatz (-reise) eine entscheidende Bedeutung zukommt.

22.3 Präventionsmaßnahmen:

- Verhaltenssteuerung **vor dem Einsatz** bzw. Reise
- Tauglichkeits-/ Verwendungsuntersuchung
- serologische Untersuchung, Tuberkulintestung, aktive Immunisierung,
- Beginn einer Chemoprophylaxe

Während des Einsatzes

- ◆ Unterbrechung des Kontaktes Vektor-Mensch
- ◆ persönliche Schutzmaßnahmen (z.B. Imprägnierung der Uniform, Repellentien, imprägniertes Moskitonetz, angepasste Kleidung, regelmäßige Zeckensuche und –entfernung)
- ◆ Chemoprophylaxe (z.B. gegen Malaria)
- ◆ passive Immunisierung nach Exposition
- ◆ Umgebungsmaßnahmen; z.B. Insektizidanwendung, Nagervernichtung, Vernichtung von Moskitobrutplätzen, Lagerhygiene, keine Tierhaltung im Lager
- ◆ Schutz gegen Haut- und Schleimhautpenetration von Erregern
- ◆ Meiden von: Süßwassergewässern, Barfußgehen, Wild- und Haustierkontakten
- ◆ Vermeiden von Tätowierungen und Piercing
- ◆ Beachten der persönlichen Hygiene
- ◆ Kondombenutzung

22.4 Schlussfolgerungen:

Für den Sanitätsdienst besteht auch in Zukunft die Notwendigkeit, sich intensiv mit Aspekten der Infektions- und Tropenmedizin auseinanderzusetzen.

Mit der Verabschiedung des Fachkonzeptes Tropenmedizin wurde dem Rechnung getragen. Der tropenmedizinisch-infektiologische Schwerpunkt Koblenz nimmt präventivmedizinische Aufgaben in Referenzfunktion wahr. Hierbei unterstützen das FIMedInstLw und das SchiffMedInstM in ihren jeweiligen Zuständigkeits- bzw. Einsatzbereichen. Dazu zählen auch Tropicendienstverwendungsfähigkeits- und Rückkehreruntersuchungen, Gelbfieberimpfungen sowie generelle und spezielle Impf- und Prophylaxeberatung. In diesem Fachkonzept sind weitere Zuständigkeiten und Qualifikationsmaßnahmen festgelegt. Bei *fliegerischen Einsätzen* der Bundeswehr erfordert die Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung von Einsätzen in den Tropen die *besondere Berücksichtigung tropenmedizinischer und flugmedizinischer Belange*. Diese umfassen in der Vorbereitung die Untersuchung von fliegendem Personal auf Wehrflieger- und Tropicendienstverwendungsfähigkeit, zum anderen die Empfehlung gezielter Prophylaxemaßnahmen, die die Flugdienstverwendungsfähigkeit nicht beeinflussen. Außerdem ist die qualifizierte Diagnostik und Therapie von möglichen Tropenerkrankungen sicherzustellen. Fliegerärzte benötigen einsatzorientierte tropenmedizinische Kenntnisse. Sie müssen in der Lage sein, unabhängig von den Einrichtungen der fachärztlichen Versorgung, die wichtigsten Tropenkrankheiten zu erkennen und erstzubehandeln. Diese Kenntnisse werden in entsprechenden Lehrgängen vermittelt, die u.a. seit 1995 am SchiffMedInstM durchgeführt werden. Im Jahr 2000 wurde der Kurs von der Deutschen Gesellschaft für Tropenmedizin und Gesundheit zertifiziert und ist damit, neben seiner berufsgenossenschaftlichen Anerkennung zur G 35-Ermächtigung, auch für das Zertifikat Reisemedizin anerkannt. Tropenmedizin im fliegerärztlichen Dienst beinhaltet auch die Auswertung gesundheitlicher und epidemiologischer Daten aus Einsätzen in Zusammenarbeit mit militärischen und zivilen nationalen und internationalen Kompetenzzentren.

Auch in der Tropenmedizin hat sich außerordentlich bewährt, dass Aus- und Fortbildung in Spezialdisziplinen wie der Flugmedizin aus der Praxis heraus durchgeführt werden. Es ist mit Sicherheit davon auszugehen, dass in Zukunft die Tropenmedizin auch am FIMedInstLw einen noch größeren Stellenwert einnehmen wird.

22.5 Verwendete und weiterführende Literatur

- Boeken, G. 5 Jahre Tropen- und Präventivmedizin am Schifffahrtsmedizinischen Institut der Marine. Wehrmed. Mschr. 45 (9) 2001
- Boeken, G. Tropenmedizin für die Bundeswehr. Wehrmedizin und Wehrpharmazie 3, 1999
- Diesfeld, K. A., Krause, G. Praktische Tropen- und Reisemedizin. Thieme, 1997
- Frühwein, N., Nothdurft, H. D. Gesundheit auf Reisen. Fink-Kümmerly+Frey, 1999
- Knobloch, J. Tropen- und Reisemedizin. G. Fischer, 1996
- Lang, W. Tropenmedizin in Klinik und Praxis. Thieme, 1996
- Müller, M. Michel, R. Sobe, D. Intestinale Wurminfektionen in der ärztlichen Praxis. Wehrmed. Mschr. Volume (5), 1993
- Strickland, G.T. Hunter's Tropical Medicine and Emerging Infectious Diseases. W. B. Saunders Company, 2000
- Thode, Ch. Zöller, L. Q-Fieber: Eine wehrmedizinisch relevante Zoonose. Wehrmed Mschr 4 (2-3), 2000
- Weinke, T. Nothdurft, H. D. Prophylaxe und Therapie wichtiger importierter Tropenkrankheiten (außer Malaria). Dtsch Med Wschr 122, 299-301, 1997

22.6 Vorschriften der Bundeswehr:

- BesAnGenArztLw 707/5096
- III. Wehrfliegerverwendungsfähigkeit und allgemeine Verwendungsfähigkeit
- ◆ Auslandsverwendungsfähigkeit (243.-244.)
 - ◆ Tropendienstverwendungsfähigkeit (245.-246.)
- BesAnGenArztLw TropMedFlgÄrztIDst Bw, Az: 42-13-33
- FA InspSan D 40.01 und 40.02
- Begutachtung auf Verwendungsfähigkeit in den Tropen
- Fachkonzept Tropenmedizin in der Bundeswehr (Dez. 2000)
- GenArztLw, Az 32-15-00 vom 13.11.1998
- Betr.: „Epidemiologisches Bulletin“ des RK, Nr. 43/98, S. 305
„Vorgehen bei fraglicher Impfanamnese“
- GenArztLw, Az: 42-15-60, 01.12.1998
- Betr.: Impfprogramm der Luftwaffe
- Impfprogramm KRK Luftwaffe in Vorbereitung auf Auslandseinsätze
(GenArztLw, Stand 29.07.1998, Az: 42-15-60)

22.7 Einige wichtige Internet-Adressen:

CDC Center for Disease Control Travel Information

<http://www.cdc.gov/travel/travel/html>

Deutsche Tropenmedizinische Gesellschaft

<http://www.tropmed.dtg.org/>

WHO International Travel and Health

<http://jupiter.who.ch/yellow/welcome.htm>

Robert-Koch-Institut (allgemeine Empfehlungen zu Impfungen)

<http://www.rki.de/GESUNDHEIT/STIKO/STIKO:HTM>

22.8 Einige wichtige Adressen:

Schiffahrtsmedizinisches Institut der Marine

Fachgebiet I / 3

-Infektions-, Tropen- und Präventivmedizin-

Kopperpähler Allee 120

24119 Kronshagen

Ansprechpartner: Flottenarzt Dr. Boecken, Oberstabsarzt Dr. Erkens

Tel.: 0431 – 5409 – 1707, -1532, -1569

Fax: 0431 – 5409 – 1778, -1707

Bw: 90-7425-....

e-Mail: tropenmed.Marine@t-online.de

Centrum für Reisemedizin CRM

Oberrather Str. 10

40472 Düsseldorf

Tel.: 0211-90 42 90

Fax: 0211-90 42 99 9

(„Reisemedizinischer Informations-Service“ – gelbe Broschüre, erscheint 2x/Jahr)

Tropeninstitut München:

„Infektions- und Tropenmedizinischer Konsiliardienst für Ärzte“

Tel.: 089 – 39 88 44 oder 089 – 2180 – 3517

(vorzugsweise Mo-Fr. 08.00 bis 11.00 Uhr und

Mo-Do 14:00 bis 17.00 Uhr)

in Notfällen außerhalb der Öffnungszeiten (keine Impfauskünfte) – nur für Ärzte:

über die Pforte der Medizinischen Universitätsklinik Innenstadt

Tel.: 089 – 5160 – 2111 (mit diensthabendem Arzt verbinden lassen !)

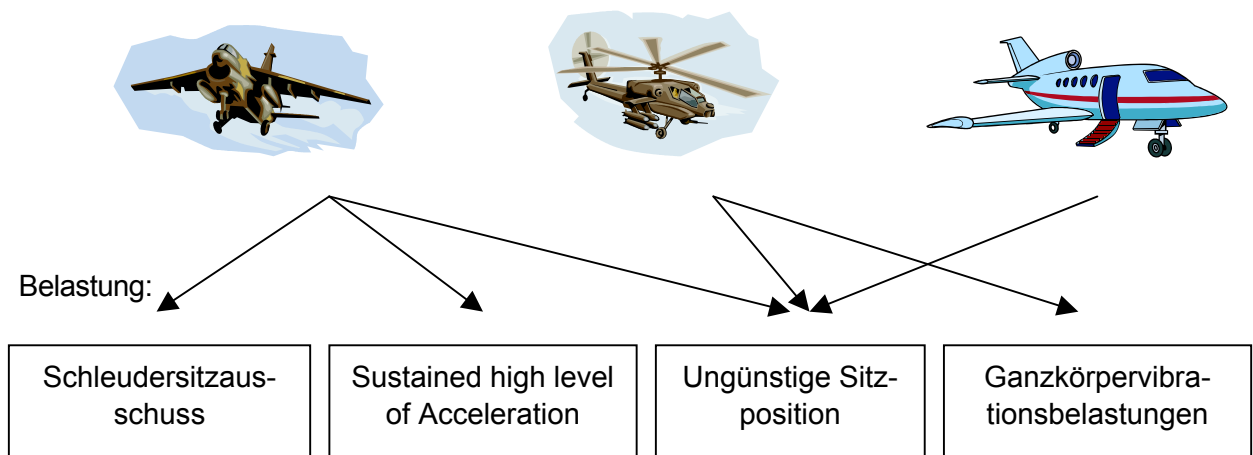
23 ORTHOPÄDIE

23.1 Einleitung

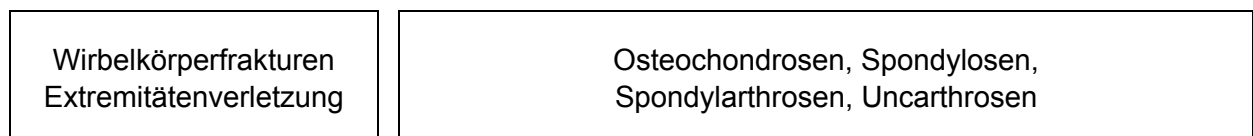
Beim Fliegen eines militärischen Luftfahrzeuges sind Piloten und Besatzungsmitglieder hohen physischen und psychischen Belastungen ausgesetzt. Folgende Belastungsfaktoren des Bewegungssystems sind bei der Beurteilung der Wehrfliegerverwendungsfähigkeit (WFV) zu berücksichtigen:

- Gz-Beschleunigungen beim Rettungsausschuss (16-20 Gz) in einem Strahlflugzeug mit Schleudersitzen (JET),
- Gz- Gx- Gy- (neg. und pos.) -Beschleunigungen beim Fliegen eines Strahlflugzeuges (z.B. – 3 Gz bis +9 Gz, MiG-29, Eurofighter), G-onset (bis 12 G/s),
- Sitzhaltung im Luftfahrzeug, bedingt durch die Anordnung der Steuerelemente im Hubschrauber (HUB) und durch die Konfiguration des Schleudersitzes (JET),
- Ganzkörpervibrationsbelastungen im Sitzen,
- Helmgewicht und zusätzliche Gewichtsbelastung (z.B. NVG) mit Verlagerung des Kopfschwerpunktes (JET, HUB),
- Fliegerbekleidung (Anti-G-Anzug, Seenotbekleidung, Überlebensweste, Splitterschutzwesten, etc.),
- Langzeitflüge mit eingeschränkter Mobilität.

Unter Berücksichtigung dieser Belastungsfaktoren können die militärischen Luftfahrzeuge in 3 Hauptgruppen unterteilt werden (Bild 1, nach BECK):



Daraus resultierende mögliche Schädigungen :



23.2 Orthopädisches Screening vor Aufnahme des fliegerischen Dienste (SWFV I)

Die Orthopädie befasst sich definitionsgemäß als medizinische Disziplin mit der Funktion und den Erkrankungen des Bewegungsapparates (Extremitäten, Wirbelsäule; Knochen, Gelenke, Muskulatur, Bindegewebe). Im weiteren Sinne betätigt sich der Orthopäde auf den Gebieten der Traumatologie, Onkologie, Rheumatologie, Sportmedizin, Manuelle Medizin, Radiologie, Gerontologie, Endokrinologie, Physiotherapie, Rehabilitation.

Untersuchungsmethoden und Verwendungsfähigkeitsanforderungen an das Bewegungssystem sind in der ZDv 46/6 niedergeschrieben. Diese Bestimmungen werden regelmäßig dem aktuellen Wissensstand angepasst, dies gilt sowohl für die Untersuchungsmethoden als auch für die Anforderungen. Um überhaupt ein Luftfahrzeug sicher fliegen zu können, benötigt der Pilot/Besatzungsmitglied die volle Gebrauchsfähigkeit von Kopf, Rumpf und Gliedmaßen.

Das orthopädische vorfliegerische Screening umfasst die Erhebung der orthopädischen Anamnese, die Erhebung eines orthopädischen Ganzkörperstatus, ein radiologisches Wirbelsäulen-Screening (Magnetresonanztomographie = MRT) der Ganzwirbelsäule (Halswirbelsäule, Brust-/Lendenwirbelsäule) und radiologische Zielaufnahmen (digitale Radiographie). Weiterführende diagnostische Maßnahmen (z.B. digitale Radiographie, Sonographie, Labor) richten sich nach individueller Indikation.

Bei der klinischen Untersuchung berücksichtigen wir den orthopädischen Leitsatz von GUTMANN (zitiert bei Lewitt): „Die Wirbelsäule muss so beweglich wie möglich und so fest wie nötig sein.“ Dieser Leitsatz beinhaltet die drei Grundfunktionen der Wirbelsäule:

- Schutz- und Stützfunktion,
- Funktion als Bewegungsachse des Körpers,
- Anteil an der Aufrechterhaltung des Gleichgewichts.

Dieser scheinbare Gegensatz (Mobilität-Stabilität) zeigt sich am Beispiel der Kopfgelenke: diese haben auf der einen Seite ein hohes Bewegungsausmaß, auf der anderen Seite befinden sich in dieser Höhe (C0/C1) vitale Zentren des verlängerten Rückenmarks.

Aus orthopädischer flugmedizinischer Sicht legen wir großen Wert auf die Stabilität der Wirbelsäule und ihre Schutzfunktion nervaler Strukturen (Rückenmark, Spinalnerven) und Blutgefäße (A. vertebralis), da die Wirbelsäule im Flugdienst hohen Belastungen ausgesetzt werden kann.

Die ungestörte Funktion der Wirbelsäule als Bewegungsachse des Körpers ist auch Voraussetzung für normale Funktionsabläufe am gesamten Bewegungssystem.

In der Gesamtschau der klinisch-funktionellen orthopädischen und radiologischen Befunde werden Tauglichkeitsurteile („wehrliegerverwendungsfähig“, „vorübergehend nicht wehrliegerverwendungsfähig“ oder „nicht wehrliegerverwendungsfähig“) gegebenenfalls mit Einschränkungen, Auflagen und Empfehlungen für den WFV-Grad I vergeben.

Erteilte Einschränkungen betreffen den Luftfahrzeugführer (Besatzungsmitglied) selbst und müssen in den Militärluftfahrzeugführerschein eingetragen werden (z.B. Einschränkung „17“ = nicht geeignet für die Verwendung als Strahlflugzeugführer bei Veränderungen im Bereich der Wirbelsäule mit einem erhöhtem Verletzungsrisiko bei einem möglichen Rettungsausschuss mit dem Schleudersitz, Einschränkung „07“ = nicht geeignet für die Verwendung als Hubschrauberpilot).



Abb. 23.2: MRT HWS



Abb. 23.3: MRT BWS/LWS ap



Abb. 23.4: MRT BWS/LWS seitl

Typische Wirbelsäulenveränderungen, welche die **WFV I** ausschließen, sind:

- strukturelle Skoliosen über 15°;
- Spondylolyse/Spondylolisthesis;
- M. Scheuermann mit mehr als 3 Keilwirbeln;
- symptomloser Bandscheibenvorfall, auch Z.n. erfolgreicher Bandscheibenoperation;
- Erkrankungen des rheumatischen Formenkreises;

Typische Wirbelsäulenveränderungen, welche die WFV-I nicht ausschließen, aber die Verwendung als Strahlflugzeugführer (JET) in der Bundeswehr (Bw) nicht zulassen, sind (Einschränkung „17“):

- cervikale Segmentationsstörungen (z.B. congenitaler Blockwirbel);
- Flachrücken, Hohlrundrücken;
- fixierte Fehlhaltungen im Bereich der HWS (z.B. nach Beschleunigungsverletzung der HWS; Fliegerhelm !);
- Wirbelkörperhämangiome (vorder- und hinterkantennah, mehr als 50% des WK-Volumens);
- ausgeprägte Defizite im Bereich der paravertebralen Muskulatur;

Typische Wirbelsäulenveränderungen, welche die Verwendung als Hubschrauberpilot in der Bw nicht zulassen sind (Einschränkung „07“):

- symmetrische und asymmetrische lumbosakrale Übergangsvarianten (Lumbalisation oder Sakralisation) mit Ausbildung von sog. Assimilationsgelenken;
- mehrsegmentale asymptotische und symptomatische Bandscheibenveränderungen;
- fixierte Fehlhaltungen der HWS (Fliegerhelm !).

Alle angeborenen und erworbenen Missbildungen und Deformitäten, sowie Verletzungsfolgen der oberen und unteren Gliedmaßen, die das einwandfreie Erfüllen der Aufgaben im Flugdienst und den sicheren Gebrauch der Rettungsgeräte beeinträchtigen, schließen die WFV-I ebenfalls aus.

Neben der orthopädischen Untersuchung erfolgt eine anthropometrische Vermessung der Anwärter für den fliegerischen Dienst in der Bw. Die für Luftfahrzeugmuster mit anthropometrischen Einschränkungen zulässigen Maße sind in der Anlage 6 zur Ziffer 307. der ZDv 46/6 aufgeführt.

23.3 Orthopädische Nachuntersuchungen auf WFV am FIMedInstLw

Die Untersuchungsmethoden und Verwendungsanforderungen sind in der ZDv 46/6 (gegebenenfalls in der ZDv 46/1) festgeschrieben und werden regelmäßig dem wissenschaftlichen Kenntnisstand angepasst.

Bei der Nachuntersuchung auf WFV am FIMedInstLw wird eine orthopädische Anamnese erhoben, beiliegende fachbezogene Fremdbefunde werden bewertet, es erfolgt die Erhebung eines orthopädischen Ganzkörperstatus. Weiterführende diagnostische Maßnahmen (MRT, Röntgen, Sonographie, Labor) werden nach individueller Indikation durchgeführt.

Des Weiteren erfolgt eine anthropometrische Vermessung der Probanden.

Nach 5 Jahren Flugdienst erfolgt bei JET- und HUB-Piloten eine MRT-Nachuntersuchung der HWS und LWS (ZDv 46/6 Ziffer 240).

Nach schweren Verletzungen (z.B. Polytrauma bei Verkehrsunfall), nach größeren chirurgischen therapeutischen Eingriffen im Bereich der Extremitäten (z.B. bandplastische Operationen) und der Wirbelsäule (z.B. nach Bandscheibenoperationen), bei der Diagnose einer Erkrankung des rheumatischen Formenkreises (z.B. Morbus Bechterew) und bei therapieresistenten Beschwerden des Bewegungssystems (Arthrosen, degenerative Wirbelsäulenerkrankungen) erfolgt zur Neubeurteilung der WFV eine Teiluntersuchung am FIMedInstLw. Dafür wird eine interdisziplinäre Begutachtung angestrebt (z.B. bandscheibenbedingte Erkrankungen der Wirbelsäule mit den Fachgruppen (FG) Radiologie und FG Neurologie/Psychiatrie; rheumatische Erkrankungen mit den FG Innere Medizin und FG Labor; Tinnitus/Vertigo mit der FG HNO). Führen die festgestellten Veränderungen des Bewegungssystems zu einer Belastungsminderung oder Behinderung im Luftfahrzeug, oder können diese Veränderungen durch den Flugdienst verschlimmert werden, so ist die WFV-II nicht mehr gegeben.

Entspricht ein Untersucher nicht den festgelegten Anforderungen der WFV, so kann auf Antrag eine fliegerärztliche Sondergenehmigung (SG) erteilt werden. Die Verfahrensweise für die Erteilung einer Sondergenehmigung (WFV-Grad I, II und III) ist in der ZDv 46/6 (Teil A Kapitel 1 IV. Fliegerärztliche Sondergenehmigung 117. bis 122.) festgelegt. Eine Sondergenehmigung darf nicht erteilt werden, wenn eine Gesundheitsstörung durch den Flugdienst verschlimmert werden kann.

23.4 Strahlflugzeuge mit Schleudersitzen (Jet)

23.4.1 Rettungsausschuss mit dem Schleudersitz

Der Rettungsausschuss mit dem Schleudersitz stellt die höchste Belastungsform beim Fliegen eines militärischen Luftfahrzeuges dar. Der Schleudersitz hat schon tausenden Piloten und Besatzungsmitgliedern das Leben gerettet und stellt nach Erfindung des Fallschirms die bedeutendste Errungenschaft der Luftrettungsmittel dar (FOWLIE).

1944 erfolgte erstmals der Serieneinbau von Schleudersitzen in Kampfflugzeugen.

Um ein Überleben der Besatzungen bzw. das Verletzungsrisiko der Wirbelsäule (Gliedermaßen) bei einem notwendigen Rettungsausschuss mit dem Schleudersitz zu minimieren, fordert MARTIN (zitiert bei BÖGER/KIRCHHOFF) folgende technische Anforderungen an das Rettungssystem Schleudersitz:

- die Spitzenbeschleunigung sollte den Wert von 21 G nicht überschreiten,
- das Anwachsen der Beschleunigung sollte nicht mehr als 300 G/s. betragen,
- bei der Einwirkung dieser Beschleunigung sollte der Körper in einer Lage gehalten werden, die sicherstellt, dass die Rückenwirbel vertikal übereinander stehen.

Die Leistungsfähigkeit des Rettungssystems Schleudersitz zeigt sich auch darin, dass sich der Pilot/Waffensystemoffizier (WSO) auch am Boden stehend erfolgreich retten kann (0-0-Fähigkeit des Rettungssystems Schleudersitz).

Aus der Begutachtungsmedizin wissen wir, dass Wirbelkörper eine erhebliche Festigkeit unter axialer Belastung aufweisen. Nach Untersuchungen von SONODA ergaben sich für Personen im 4.-5.Lebensjahrzehnt für den Halswirbelkörper im Mittel Bruchlasten von 370kg (3700 N), für den Lendenwirbelkörper 730kg (7300 N). Jenseits des 45. Lebensalters nimmt die Druckfestigkeit aufgrund des physiologischen Alterungsprozesses ab.

Vergleicht man die Axialbelastbarkeit von Wirbelkörpern und Zwischenwirbelscheiben, so kann festgestellt werden, dass Zwischenwirbelscheiben weit höhere Axialbelastungen als Wirbelkörper tolerieren.

Der mit 730kg (7300 N) ermittelten Bruchlast für einen Lendenwirbelkörper steht eine Bruchlast von 1500kg (15000 N) für die zugehörige Lendenbandscheibe gegenüber. Diese Feststellung gilt für alle Wirbelsäulenabschnitte. BROWN und ROAF konnten am isolierten Bewegungssegment der Wirbelsäule nachweisen, dass unter axialer Belastung zunächst die Deckplatte des angrenzenden Wirbelkörpers einbricht ohne sichtbare Schädigung des Bandscheibengewebes.

Bei SERGEJEW finden wir Grenzwerte für Belastungen und Beanspruchungen verschiedener Wirbelsäulenbereiche:

Wirbel	Überlastung in G	
	max.	min.
C IV	52,0	47,0
Th VIII	24,9	20,8
Th IX	25,0	21,0
Th X	25,7	21,0
Th XI	25,1	20,8
Th XII	24,5	18,6
L I	23,0	18,2
L II	23,9	19,1
L III	25,2	20,4
L IV	24,3	19,7
L V	25,7	21,2

Diese biomechanischen Erkenntnisse erklären die Tatsache, dass wir bei einem erfolgreichen Rettungsausschuss mit dem Schleudersitz typische Kompressionsfrakturen im Bereich der mittleren und oberen Brust- und oberen Lendenwirbelsäule der wirbelsäulenverletzten Piloten/WSO sehen (75% aller WS-Frakturen in Höhe Th-8 bis L-2).

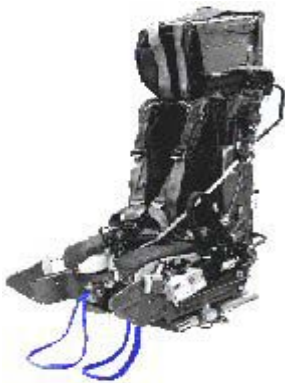


Abb. 23.5: MK-10



Abb. 23.6: Ausschuss (0-0)



Abb. 23.7: Ausschuss

In der flugmedizinischen Literatur finden sich folgende Häufigkeitsangaben über tödlich verletzte Piloten/Besatzungsmitglieder bei einem Rettungsausschuss mit dem Schleudersitz:

Land/Autor	Untersuchungszeitraum	Häufigkeit in %
USAF (Pletcher)	1949 – 1969	17,6%
USAF (Pletcher)	1950 – 1956	18,9%
RCAF (Smiley)	1952 – 1961	24,3%
RCAF (Smiley)	1952 – 1966	21,2%
USAF (Chubb)	1960 – 1964	21,5%
Italia (Italiano)	1954 – 1965	6,8%
CF (Rowe)	1972 – 1982	6,5%
GAF (Becker)	1957 – 1969	19,7%
GAF (Beckmann)	1958 – 1971	18,3%
GAF (Beckmann)	1964 – 1971	24,3%
Spain (Vasquez)	1979 – 1995	14,6%
Bulgaria (Milanow)	1953 – 1993	16,7%
Jordania (Abu-Ghash)	?	9,1%
Australia (Newman)	1951 – 1992	8,3%
Sweden (Sandstedt)	1967 – 1987	4,3%
Finland (Visuri)	?	5,9%
GAF (Pippig)	1975 – 2002	9,7%

Über die Häufigkeit von WS-Frakturen bei erfolgreichen und überlebten Rettungsausschüssen mit dem Schleudersitz finden sich folgende Angaben:

Land/Autor	Untersuchungszeitraum	Häufigkeit in %
US Navy (Jones)	1958 – 1963	20,6%
RAF (Fryer)	1949 – 1960	18,7%
RCAF (Smiley)	1952 – 1961	18,2%
Sweden (Hirsch)	1952 – 1961	23,6%
Italia (Italiano)	1956 – 1964	18,2%
GAF (Becker)	1957 – 1969	10,5%
GAF (Pippig)	1975 – 2002	31,0%



Abb. 23.8: Kompressionsfraktur (Röntgen)



Abb. 23.9: Kompressionsfraktur (MRT)

Aufgrund der hohen Wirbelsäulenfrakturrate nach einem erfolgreichen und überlebten Rettungsausschuss mit dem Schleudersitz (31%, Pippig) ist jeder Pilot/WSO nach einem Ausschuss wie ein „Wirbelsäulenverletzer“ zu versorgen:

- Bergung, Rettung und Transport (STIFFNECK, Vakuummatratze);
- adäquate Diagnostik (Röntgen, CT, MRT);
- Therapie und Rehabilitation in Abhängigkeit der Verletzungsart mit dem Ziel der Wiederherstellung der vollen Belastbarkeit des Achsenorgans;
- Neubeurteilung der WFV im Rahmen einer Teiluntersuchung am FIMedInstLw mit Einbeziehung aller relevanten Fachgruppen (Polytrauma !);
- nach Abschluss der Therapie- bzw. Rehabilitationsmaßnahmen ist vor der Wiederaufnahme der fliegerischen Verwendung als Pilot/WSO zunächst ein Belastungsversuch (entweder in der Humanzentrifuge oder im fliegenden Verband unter fliegerärztlicher Kontrolle) durchzuführen. Danach erfolgte die definitive Entscheidung über die weitere Verwendung in einem JET.

Therapiemaßnahmen, Heilungsverlauf und Unfallfolgen einer Wirbelsäulenverletzung (Gliedmaßenverletzung) nach einem Ausschuss zeigen keine wesentlichen Abweichungen gegenüber Unfallverletzungen der WS (Gliedmaßen) im zivilen Sektor.

Die Wiedereingliederung in den Flugdienst kann nach erfolgreicher Therapie und Rehabilitation und vollständig wiederhergestellter Belastbarkeit der WS erfolgen, in der Regel frühestens nach 6 Monaten.

Bei der Ursachenforschung für das Auftreten einer WS-Verletzung haben Faktoren wie Körpergewicht/Konstitution, Körpergröße/Sitzhöhe/relative WS-Länge, Vorerkrankungen/Deformitäten/Alter, Flugzeugtyp/Schleudersitz, Flughöhe/Fluggeschwindigkeit/Fluglage keinen signifikanten Einfluss auf die Verletzungshäufigkeit. Die Sitzhaltung zum Zeitpunkt des Ausschusses und die Sitzauslösung haben den größten Einfluss für das Entstehen einer WS-Fraktur (HÖRNER, ANTON, DELAHAYE).

Bei ca. 50% der überlebenden Piloten/WSO bei einem Rettungsausschuss mit dem Schleudersitz werden Gliedmaßenverletzungen gefunden. Diese umfassen das gesamte traumato-logische Spektrum (Distorsion, Kontusion, Luxation, offene und geschlossene Frakturen).

23.4.2 G-Belastungen im Flugdienst

In Abhängigkeit des LFZ-Musters (hier besonders sog. High Performance Aircraft (HPA) der 3. und 4. Generation: MiG-29, Eurofighter, F-16, F-22, Joint-Strike-Fighter, Rafale, Gripen) und des Aufgabenprofils (Luftkampf) ist der Pilot/WSO hohen positiven wie negativen Gz-, Gx- und Gy-Beschleunigungen ausgesetzt.

In der internationalen flugmedizinischen Literatur finden wir Berichte über so gen. „ +Gz-induced non-ejection neck injuries“ (SCHALL, VANDERBEEK, NEWMANN) andere Autoren (HÄMÄLÄINEN) berichten über häufigere und schwerwiegendere degenerative Veränderungen im Bereich der HWS bei Jagdfliegern als bei nicht fliegenden Vergleichspersonen.

Eine multinationale Studie der NATO, welche die Belastungen der HWS im Flugdienst auf akute und chronische Folgen untersuchte (RTO Technical Report 4, 1998), kam zu folgendem Ergebnis:

„To conclude, repeated exposures to sustained higher levels of G can cause serious acute injuries to the cervical spine that will affect mission readiness. Also exposures to G appear to accelerate the normal aging process of spinal degeneration but this does not effect mission readiness. However this increased rate of degeneration may slow or even stop temporarily with the elimination of increases G exposures. Thus this degeneration of the cervical spine of fighter pilots eventually returns to the normal aging process.“

23.4.3 Helmgewicht / -masse und G-Belastung

Das Fliegen mit einem Helm (Masse bis 2,5kg (Gewicht: 25 N)) unter G-Belastungen stellt hohe Anforderungen an die Belastbarkeit der HWS der Piloten/WSO. Nach MATTHIAS belastet der aufrecht getragene Kopf die untere HWS (C6/C7) mit einem Durchschnittsmasse von 6,8kg (Gewicht: 68 N). Bei typischer vorgeneigter Schreib-/ Lesehaltung des Kopfes steigt das Belastungsgewicht auf 21kg (210 N). Berücksichtigt man die max. Gz-Belastung in einem HPA (+ 9 Gz) und das Helmmasse (ca. 2,0kg (Gewicht: 20 N)), so können kurzfristig weit höhere Lastgewichte auf die HWS einwirken. Auch hier bewertet die o.g. NATO-Studie die Gefährdung der HWS von Piloten/WSO:

„ Any additions to helmet weight must be treated with caution because of the risks of injury in sustained neck flexed and rotated positions. Also increased helmet weight adds to the risk of serious neck injury by far exceeding neck structural strength limits in the event a pilot ejects, during the first ms of acceleration before this equipment is released.“



Abb. 23.10: JET-Helm (HGU55P)



Abb. 23.11: Start auf einem Flugzeugträger

23.4.4 Sitzhaltung im JET

Die Sitzhaltung im JET (Phantom, Tornado, MiG-29) wird bestimmt durch die Konfiguration des Schleudersitzes, d.h. Sitzfläche und Rückenlehne bilden einen rechten Winkel. Durch diese aufrechte Sitzhaltung werden sowohl Zwischenwirbelscheiben als auch Rückenmuskulatur stark beansprucht. Der Flüssigkeitsaustausch zwischen Zwischenwirbelscheibe und Umgebung ist stark herabgesetzt, die Aktionspotenziale der Rückenmuskulatur sind deutlich erhöht.

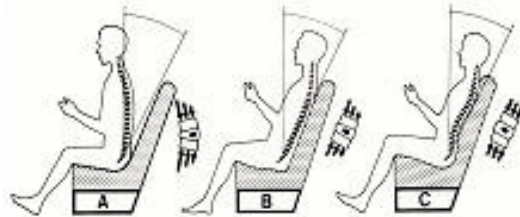


Abb. 23.12: Verteilung der Druckverhältnisse an der LWS in verschiedener Sitzposition (nach JUNGHANNS)

In anderen JET ist die Rückenlehne des Schleudersitzes nach hinten geneigt, z.B. F-16 um 40°, EFA um 18°. Ziel dieser Konfiguration ist es, die G-Toleranz der Piloten zu steigern.

23.5 Wirbelsäulenbelastungen in Hubschraubern

Unbestritten klagen Hubschrauberpiloten und Besatzungsmitglieder häufig über Wirbelsäulenbeschwerden während und nach dem Flugdienst. In der flugmedizinischen Literatur findet man folgende Häufigkeitsangaben (bei BECK):

Auffret, Delahye	66%
Dietrichs	95%
Fischer u. M.	59,2%
Fischer u. Zitzelsberger	54,5%
Missenard u. Graber	50%
Montagnard u. M.	60%
Race u. Chappelow	21%
Schulte-Wintrop u. Knoche	51%
Sliosberg	87%
Braunhohler	66%

PIPPIG u. KRIEBEL konnten nachweisen, dass bei Hubschrauberpiloten der Bundeswehr häufiger bandscheibenbedingte Beschwerden im Bereich der Hals- und Lendenwirbelsäule als bei JET-Piloten zu finden sind (9,9% zu 6,6%), aber im Vergleich zu einer nichtfliegenden Kontrollgruppe fanden sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Piloten und Nichtpiloten. Als Ursache der Beschwerden werden die vorwiegend ungünstige statische Körperhaltung, bedingt durch die Anordnung der Steuerelemente im Hubschrauber (der Rumpf ist

nach vorn gebeugt und rotiert) und Ganzkörpervibrationsbelastungen im Sitzen angesehen. Zusätzliche Belastungsfaktoren des Achsenskeletts, besonders der HWS, sind ein relativ schwerer Helm mit zusätzlicher Gewichtsbelastung durch z.B. NVG (bis 30 N Gesamtgewicht) und die Verlagerung des Kopf-Helm-Schwerpunktes nach vorn.

23.5.1 Ganzkörpervibrationsbelastungen im Sitzen

Vibrationen sind definitionsgemäß fortdauernde strukturelle Bewegungen fester Körper, die auf den menschlichen Körper übertragen und durch andere Sinne als das Gehör wahrgenommen werden. Sie charakterisieren sich als Schwankungen einer mechanischen Größe um einen Ruhewert in Abhängigkeit von der Zeit. Der Frequenzbereich (Hertz) der Schwingungen, die den menschlichen Körper im Inneren wesentlich beeinträchtigen, liegt zwischen einer Schwingung in der Sekunde (= 1 Hz) und etwa 100 Hz. Die Beeinflussung der menschlichen Organe durch die Schwingungen hängt von der Eigenresonanz ab. Für die Wirbelsäule gilt eine Resonanzfrequenz von 5 Hz, für die meisten Organe ein Bereich von 3 – 9 Hz. Die in der Medizin genutzten therapeutischen Schwingungen (Vibrations- und Massagegeräte) fördern die Durchblutung und regen auf nervalen Wege die psychische Aktivität an. Diese Schwingungen haben eine kurze Einwirkungszeit und übertragen nur geringe Energien. Eine längere Einwirkungszeit von Schwingungen erzeugt einen Zustand der Monotonie, führt zur Anpassung, zur Verminderung der Aktivität und schließlich zur Ermüdung. Eine gesundheitliche Gefährdung setzt sich aus der erregenden Schwingungsbelastung und der Expositionsdauer zusammen.

Nach MAGID und COERMANN werden folgende Beschwerdesymptome in verschiedenen Organbereichen in Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz beobachtet:

Kopfschmerzen	13 - 20 Hz
Sprechstörungen	13 - 20 Hz
Unterkieferresonanz	6 - 8 Hz
Rachen- Kehlkopfstörungen	12 - 16 Hz
Atembeschwerden	4 - 8 Hz
Schmerzen im Brustkorb	5 - 7 Hz
Rückenschmerzen	8 - 12 Hz
Unterleibschmerzen	4 - 10 Hz
Harn- Stuhldrang	10 - 18 Hz
Erhöhte Muskelspannung	13 - 20 Hz
Allgemeines Unbehagen	4 - 9 Hz

Die erweiterte Berufskrankheitenverordnung (1993) mit der Erweiterung um die BK Nr. 2108, Nr. 2109 und Nr. 2110 ist grundsätzlich bei der Beurteilung degenerativer Wirbelsäulenerkrankungen und wehrdienstlicher Tätigkeiten (wie für berufliche Tätigkeiten) zu berücksichtigen. In dieser finden wir den wissenschaftlichen Kenntnisstand des Belastungs-Beanspruchungs-Zusammenhanges bzw. der quantitativen Dosiswirkungsbeziehungen bei der Bewertung einer Kausalverbindung von degenerativen Bandscheibenerkrankungen der Lendenwirbelsäule und Ganzkörpervibrationsbelastungen im Sitzen im Hubschrauber (BK 2110).

Resonanzschwingungen des Rumpfes und der WS, vorwiegend bei erregenden Schwingungen mit Schwingungsfrequenzen zwischen 3 und 5 Hz gefährden die lumbalen Zwischenwirbelscheiben.

Nach dem ärztlichen Merkblatt für die BK Nr. 2110 wird als Schwellenwert (= gesundheitliche Gefährdung) eine Beurteilungsschwingstärke von Kr größer gleich 12,5 bei ungünstiger Körperhaltung (verdrehte, stark nach vorn gebeugte oder seitgeneigte Körperhaltung)

festgelegt, die von der Schwingungsintensität (bewertete Schwingstärke K_{eq}) und von der Dauer der Schwingungsexposition pro Tag T_e abhängt.

Dazu haben KONIETZKO/DUPUIS/ROSE im Auftrag des BMVg - InSan neun Hubschrauber der Bw und des Bundesgrenzschutzes auf ihr Schwingungsverhalten untersucht. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Ergebnisse:

Luftfahrzeug	Bewertete Schwingstärke K_{Zeq}	Beurteilungsschwingstärke K_{Zr} bei täglicher Expositionsdauer			
		1 h	2 h	3 h	4 h
UH 1 D (alte Sitzführung)	12,2	4,3	6,1	7,4	8,6
UH 1 D (neue Sitzführung)	9,2	3,2	4,6	5,6	6,5
SEA-LYNX	4,6	1,6	2,3	2,8	3,3
SEA-KING MK 41	10,3	3,6	5,1	6,3	7,3
PUMA	5,5	1,9	2,8	3,4	3,9
CH 53	11,3	4,0	5,7	6,9	8,0
Alouette II	7,4	2,6	3,7	4,5	5,2
BO 105 VBH	5,5	1,9	2,8	3,4	3,9
BO 105 PAH	6,8	2,4	3,4	4,1	4,8

Tab. 23.1: Bewertete Schwingungsstärke K_{Zeq} und Beurteilungsschwingstärke K_{Zr} auf dem Pilotensitz von Hubschraubern bei unterschiedlicher Expositionsdauer.

Unter Berücksichtigung der geltenden wissenschaftlichen Kenntnisse der BK Nr. 2110 und der Untersuchungsergebnisse (Bild 14) erreichen die Schwingungsbelastungen beim Fliegen eines Hubschraubers, in Abhängigkeit von der täglichen Expositionsdauer bis zu 4 Stunden, den Schwellenwert von 12,5 nicht.

„So müsste beispielsweise der Hubschrauber CH 53 zehn Stunden am Tage geflogen werden (mindestens 10 Jahre), um den Schwellenwert $K_{Zr}=12,5$ zu erreichen.

Somit kommt nach dem derzeitigen Wissensstand eine Wehrdienstbeschädigung (WDB) für Hubschrauberpiloten im Sinne der BK 2110 nicht in Frage.

23.5.2 Sitzhaltung im Hubschrauber

Die Sitzhaltung im Hubschrauber wird durch die Anordnung der Steuerelemente bestimmt: Der Oberkörper ist nach vorn gebeugt und rotiert. Dadurch werden die Zwischenwirbelscheiben ungleichmäßig belastet (Störung der Diffusionsvorgänge) und auch der Tonus der Rückenmuskulatur ist erhöht (erhöhte Aktionspotentiale im EMG). Diese Körperhaltung im HUB ist noch unergonomischer als im JET.

Die Ernährung der Zwischenwirbelscheiben ist als prinzipiell kritisch anzusehen, da diese nicht über ernärende Blutgefäße verfügen. Der Stoffaustausch mit der Umgebung erfolgt durch Diffusionsvorgänge. Bei Belastungen, wie z.B. aufrechtem Stehen, Sitzen oder Heben, wird Flüssigkeit aus der Zwischenwirbelscheibe herausgepresst und Stoffwechselprodukte werden abgegeben. Bei Entlastung der Zwischenwirbelscheibe, vor allem beim Liegen, nimmt diese Flüssigkeit und Nährstoffe auf. Diese eingeschränkte Stoffwechselfähigkeit bedingt schon frühzeitig Verschleißvorgänge (bereits ab dem 30. Lebensjahr).

Eine direkte vollständige Messung der Belastung der Wirbelsäule (Zwischenwirbelscheiben) ist bisher aber nicht möglich. Die umfangreichsten Messergebnisse liegen für den intradiskalen Druck und für die Belastung von Implantaten zur Stabilisierung der Wirbelsäule vor. Der intradiskale Druck ist von allen Messgrößen wahrscheinlich diejenige, welche die Wirbelsäulenbelastung am Besten wieder spiegelt. Durch intradiskale Druckmessungen, in-vivo Diskometrie (NACHMESON, WILKE), wurde die intradiskale Druckbelastung bei verschiedenen Körperhaltungen gemessen.

Der durchschnittliche intradiskale Druck für das Stehen beträgt 0,50 MPa. Dieser Wert wurde als 100% gesetzt und die Werte für die anderen Aktivitäten darauf bezogen:

aufrechtes Stehen	100%
Liegen in Rückenlage	20%
Liegen in Bauchlage	22%
Liegen in Seitenlage	24%
Entspanntes Sitzen	90%
Betont aufrechtes Sitzen	110%
Vorneigung des Oberkörpers im Sitzen	170%
Vorneigung des Oberkörpers im Stehen	216%
Anheben (Masse 20 kg)	460%
Halten in Brusthöhe (Masse 20 kg)	220%

Welchen quantitativen Beitrag diese Untersuchungsergebnisse bei der wissenschaftlichen Beurteilung im Sinne einer Berufskrankheit bzw. WDB erhält, ist noch nicht sicher geklärt.

23.5.3 Helmgewicht / -masse und Kopfhaltung im Flugdienst

Auch beim Hubschrauberpiloten ist die Halswirbelsäule durch das Tragen eines relativ schweren Helmes mit zusätzlichem Gewicht (z.B. NVG) und durch die Verlagerung des Kopf-Helmschwerpunktes nach vorn stark beansprucht. Ob sich daraus vermehrte degenerative Veränderungen im Bereich der Halswirbelsäule entwickeln bzw. verschlimmern, ist wissenschaftlich noch nicht geklärt.

Aufgrund der häufig geklagten Beschwerdesymptomatik im Bereich der HWS beim oder nach dem Flugdienst mit NVG sind sowohl präventiv-medizinische als auch therapeutische Maßnahmen indiziert. Beim vorfliegerischen Screening (MRT) und den flugmedizinischen Nachuntersuchungen (MRT-Kontrollen alle 5 Jahre) sind diese Beanspruchungen der HWS zu berücksichtigen.

23.6 Belastungen beim Fliegen eines Transportflugzeuges der Bundeswehr

Beim Fliegen eines Transportflugzeuges der Bundeswehr sind weder Gz-Beschleunigungen noch Ganzkörpervibrationsbelastungen im Sitzen als WS-gefährdende Faktoren relevant.

Hier sind es vor allem langanhaltende statische Belastungen des Achsenskeletts mit eingeschränkter Mobilitätsmöglichkeit bei Langstreckenflügen. Der Sitz und auch die Körperhaltung beim Fliegen sind ergonomisch günstiger als beim Fliegen eines JET oder HUB. Wirbelsäulenbeschwerden bzw. degenerative Wirbelsäulenveränderungen führen nur selten zur Fluguntauglichkeit.

23.7 Zusammenfassung

Unter Kenntnis der hohen WS- und Extremitätenbeanspruchungen beim Fliegen eines militärischen Luftfahrzeuges ist ein sorgfältiges orthopädisches vorfliegerisches Screening notwendig (WFV-I). Untersuchungsmethoden und Verwendungsanforderungen sind in der ZDv 46/6 (evtl. ZDv 46/1) festgeschrieben, und werden nach dem geltenden Wissensstand aktualisiert. Aus flugmedizinischer Sicht stellen wir höchste Anforderungen an die Stabilität der Wirbelsäule und fordern eine volle Gebrauchsfähigkeit von Rumpf und Extremitäten. Auch bei orthopädischen Nachuntersuchungen (WFV-II- und WFV-III) fordern wir die volle Gebrauchsfähigkeit von Rumpf und Extremitäten. Entwicklungsbedingte (z.B. degenerative), entzündliche oder tumoröse Veränderungen und Unfallfolgen im Bereich des Bewegungssystems dürfen zu keiner Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit des Piloten oder Besatzungsmitgliedes im Flugdienst führen (Flugsicherheit) und die festgestellten Veränderungen dürfen nicht durch den Flugdienst verschlimmert werden (WDB).

23.8 Verwendete Literatur

Anton, D.: Injuries associated with escape from fast jet aircraft. Royal Air Force, Institute of Aviation Medicine, Farnborough Hampshire. 1991.

Beck, A.: Spätreaktionen der Wirbelsäule bei Flugzeugbelastungen. Wehrmed. Mschr. Heft 2/1981

Böger J, Kirchoff HW: Wirbelsäule und Wehrfliegerverwendungsfähigkeit. Wehrmed. Mschr. 3/1965

Brown T, Hansen RJ, Yorra AJ: Some mechanical test on the lumbosacral spine with particular reference to the intervertebral disc. J Bone Joint Surg (Am) 39/1957.

Delahaye RP et al: Das Herausschleudern von Piloten aus Kampfflugzeugen. Revue international du service de sante. 1976.

Fowle, DG, Aveline MO: The emotional consequences of ejections, rescue and rehabilitation in the Royal Air Force Aircrew. Brit. J Psychiat 1985; 146: 609-13.

Hämäläinen O, Vanharanta H, Kuusela T: Degeneration of Cervical Intervertebral Disks in Fighter Pilots Frequently Exposed to High +Gz Forces. Aviat Space Environ Med. 64/1993.

Hämäläinen O, Vanharanta H, Bloigu R: +Gz-Related Neck Pain: A Follow-up Study.

Aviat Space Environ Med. 65/1994.

Hämäläinen O, Kuronen P, Vanharanta H: Nackenschmerzen bei Jagdfliegern. Wehrmed. Mschr. 39/1995.

Hörner R: Wirbelfrakturen beim Schleudersitzausstieg aus strahlgetriebenen Kampfflugzeugen. Dissertation aus der Orthop. Universitäts- und Poliklinik Friedrichsheim der J.W. Goethe Universität Frankfurt a.M., 1997.

Junghans H: Die Wirbelsäule in der Arbeitsmedizin Teil II. Hippokrates Verlag Stuttgart, 1979.

Konitzko J, Dupuis H, Rose DM: Schwingungsbelastung und Berufskrankheit. Schriftenreihe Präventivmedizin – PM2, 1996

Lewitt K: Manuelle Medizin, Johann Ambrosius Barth Verlag, 1992, S.35

Magid EB, Coermann RR: The reaction of the human body to extreme vibrations. Proc. Inst. Environm. Sci. 135/1960

Matthiaß H: Arbeitshaltung und Bandscheibenbelastung. Arch. Orthop. Unfallchir. 48/1956.

Nachemson A: The load an lumbar disc in different positions of the body. Clin Orthop Rel Res 45/1966.

Nachemson A: Disc pressure measurements. Spine 6/1981.

Nachemson A, Morris J: In vivo measurements of intradiscal pressure. J. Bone Jt. Surg. 46/1964.

Newmann DG: +Gz-Induced Neck Injuries in Royal Australian Air Force Fighter Pilots. Aviat Space Environ Med. 68/1997.

Pippig T, Kriebel J: Prevalence of Lumbar and cervical Disc Disorders of GAF-Aviators. AsMA May 1999, Detroit Mi USA.

Pippig T: Spinal Injuries of GAF-Aviators due to Emergency Escape with Ejection Seat. AsMA, May 2003, San Antonio Tx USA.

Roaf R: A study of the mechanics of spinal injuries. J Bone Joint Surg (Br) 42/1960.

Schall DG: Non-Ejection Cervical Spine Injuries Due to + Gz in High Performance Aircraft. Aviat Space Environ.Med. 60/1989.

Schmidtke H, Dupius H: Arbeitstische, Konsolen und Sitze, in Schmidtke, Ergonomie2, Hanser München 1974.

RTO Technical Report 4: Cervical Spinal Injury from Repeated Exposures to Sustained Acceleration, 1999.

Sergejew AA: Fiziolosicekie mechanizmy dejstvija uskorenij. Izdatelstvo Nauka. Leningr. 1967.

Sonoda T: Studies on the strength for compression, tension and torsion of the human vertebral column. J Kyoto Prof Med 71/1962.

Moreno Vazquez JM, Duran Tejada MR, Garcia Alcon JL: Report of ejections in the Spanish Air Force, 1979-1995: An epidemiological and Comparative study. Aviat Space Environ Med 70/1999.

Vanderbeek RD: Period Prevalence of Acute Neck Injury in U.S. Air Force Pilots Exposed to High G Forces. Aviat Space Environ Med. 59/1988.

Wilke HJ, Neef P, Caimi M, Hoogland T, Claes L: New intradiscal pressure measurements in vivo during daily activities. Soine 24/1999

24 STICHWORTVERZEICHNIS

A

A. vertebralis S.326, S.252
Abhängigkeit S.331, S.334
Abkürzungen S.308, S.287
Active Noise Reduction Systems S.172
Adaptation S.58, S.94, S.122, S.123, S.127, S.129, S.157, S.196, S.197, S.200
ADF (Automatic Direction Finding) S.234
Adipositas S.219, S.222
Aedes-Mücken S.321
Aeroembolismus S.78
Aeroemphysem S.78
Airbus A 310 S.317
Akklimatisation S.199
Alkalose S.39, S.45
Alkohol S.56-58, S.153, S.156, S.158, S.161, S.198, S.200, S.203, S.211, S.219, S.220, S.222, S.241, S.253, S.262-265, S.297
Alkoholkonsum S.56, S.58, S.262-265
Alveolen S.37, S.38, S.41, S.42, S.46-48, S.53-55, S.62, S.71
Amnesie S.99, S.254, S.255
Amöbiasis S.321
Anaeroidbarometer S.28
Analgetika S.198, S.221, S.313
Anämische Hypoxie S.55, S.57, S.95
Anamnese S.219, S.240, S.249, S.250, S.253, S.254, S.259, S.262, S.323
Aneurysma S.100, S.259
Anfälle S.80, S.150, S.247, S.248, S.249, S.250, S.255, S.256, .259
Anflugverfahren (GCA; TACAN; VOR; NDB) S.289, S.296, S.309
Anomaloskop S.136
Anopheles S.320
Anoxie S.51
Anthropometrische Vermessung S.327
Anti-Airsickness-Trainingsprogramm S.157, S.161
Anticholinergika S.222
Anti-G-Anzug S.50, S.325
Anti-G-Hose S.102, S.117, S.291, S.293
Anti-G-Manöver S.92, S.102-104
Antihistaminika S.161, S.222
Antihypertensiva S.222
AOA (Angle of Attack) S.304, S.308
Apoplex S.100
Arachnoidalzysten S.252, S.256
Arbeitsbelastung (mental workload) S.122, S.185
Argon S.21, S.137
Armfesselsystem („ Arm Restraint System“) S.112
Arteriosklerose S.219, S.222, S.252, S.253
Atelektasen S.51, S.62

Atemgrenzwert S.40
Atemmaske S.60, S.64, S.66, S.67, S.94, S.117
Atemmechanik S.38, S.39
Atemminutenvolumen S.40, S.51
Atemmuskulatur S.61
Atemwege S.36, S.60, S.151
Atemzeitvolumen S.39, S.40
Ätiologie S.240, S.257, S.319
Atmosphäre S.21, S.22, S.29, S.32, S.34, S.53
Atmosphärische Luft S.41, S.64
Auftauchzeiten S.80, S.82
Auge S.58, S.94, S.95, S.98-101, S.103, S.119-124, S.126, S.129-133, S.137, S.139, S.140, S.144, S.147, S.148, S.150, S.157, S.161, S.189, S.253, S.302, S.314
Augeninnendruck S.98, S.120, S.137
Ausatmung (Expiration) S.38, S.40, S.42, S.46, S.75
Auslösegriff S.111, S.113
Autogenes Training S.223
Autokinese S.126
Autonomer Regulationen S.223
Autorotation [Hubschrauber] S.300
Azidose S.39, S.197

B

Bandscheibenvorfall S.327
Barodontalgie S.76
Barometrische Höhenformel S.26, S.34
Barometrischer Druck S.26, S.30, S.34, S.74
Barotitis media S.62, S.74-76
Barotrauma S.30, S.62, S.74, S.174
Bauchraum S.30, S.38, S.77, S.102-104
Beanspruchung S.171, S.209, S.215, S.224
Beinrückholssystem S.111
Belastbarkeit S.87, S.116, S.219, S.227, S.236, S.238, S.239, S.257, S.331, S.332
Belastungsfaktoren S.225, S.325, S.334
Bell UH-1D S.153, S.273, S.306
Bends S.81
Berufskrankheitenverordnung S.334
Beschleunigung S.51, S.56-58, S.87-94, S.96-101, S.105-107, S.110, S.122, S.140, S.144, S.147, S.148, S.156, S.158, S.164, S.314, S.325, S.328, S.331, S.336
Beschleunigungszuwachsrate S.92, S.99
Beurteilungsschwingstärke KZr S.335
Bewegungsapparat S.150, S.326
Bewusstlosigkeit (Loss of Consciousness , LOC) S.45, S.52, S.54, S.58, S.59, S.92, S.93, S.95, S.96, S.98, S.99, S.254, S.255, S.313
Biologische Rhythmen S.205, S.211
BIV-Brille (Bildverstärker-Brille) S.129, S.130, S.132, S.138, S.310
Blackout S.96, S.98, S.99
Blendung S.123, S.137
„Blindenfleck“ S.121
Blut S.37, S.39, S.41, S.44-49, S.46, S.51-58, S.61, S.71, S.79, S.102, S.199
Blutdruck S.48, S.49, S.92, S.95, S.96, S.98, S.101, S.102, S.182, S.201, S.223, S.234
Bluthochdruck S.219
Bluttemperatur S.195
Blutverlust S.55
Blutvolumenverschiebung S.92, S.93, S.97
Boeing E-3A S.277
Bogengänge S.89, S.140, S.144-146, S.155, S.156, S.158
Bogengang-Otolithen Konflikt S.157-159
Bohr-Effekt S.48
BOLTZMANN S.193
Bombardier (Canadair) C1-601 „Challenger“ S.279
Brillengläser S.132, S.138
Bronchitis S.51, S.57, S.313
Brusthöhle (Thorax) S.38
Brustwirbelsäule S.326, S.329

C

Caissonkrankheit S.78
Campylobacter S.321
„Canopy“ S.111, S.112
Cardiovasculärer Reflex S.92, S.93
Celsius S.191
Cerebrale S.45, S.98, S.183, S.241, S.247, S.251, S.255, S.256, S.259
Chemoprophylaktika S.320
Chemorezeptor S.39
Chemotherapeutika S.320
Choke S.81
Cholera S.321
Ciliarmuskel S.121
Circadianer Rhythmus S.195, S.205, S.208, S.212, S.215
CO- Vergiftung S.55, S.56
Cochlea S.139, S.173, S.174, S.175, S.182, S.186, S.188, S.250
Cockpit Layout S.122, S.304
COHb S.47, S.55, S.56
Collective pitch lever S.299
Commotio S.254
Coriolis illusion S.146
Corioliseffekt S.157, S.158, S.159
Critical Incident Stress Debriefing S.229, S.230, S.231
Critical Incident Stress Defusing S.230
Critical Incident Stress Management (CISM) S.228, S.230
Cross-Check S.147, S.244, S.245, S.309
Cross-Servicing S.291, S.296
Cyanidvergiftungen S.56
Cytochromoxydase S.56

D

Dämmerungssehen S.121, S.123
Dassault-Breguet BR 1150 „Atlantic“ S.270
Dauermedikation S.215, S.222
Degenerative Erkrankungen S.257
Degenerative Wirbelsäulenerkrankungen S.258, S.328, 334, S.336
Dehydratation S.201, S.211, S.314
Dehydrierter Zustand S.217
Dekompressionskrankheit S.32, S.78, S.81-83, S.313
Dekompressionssyndrom 255
Demand Pressure Regulator S.64
Demyelinisierende Erkrankungen S.257
Dengue-Fieber S.321
Denitrogenisation S.83
Depression S.213, S.241, S.261
Desynchronisation S.205, S.211-215, S.217, S.259
Deutsche Gesellschaft für Tropenmedizin (DTG) S.321, S.322, S.324
Diagnostik S.176, S.201, S.251-253, S.258, S.259, S.262, S.264, S.319-322, S.331
Diffusion S.41-43, S.47, S.51, S.53, S.54, S.57, S.71, S.80, S.82, S.194
Diffusionsvorgänge S.46, S.335
Disposition S.156, S.233
Distorsion S.331
Distress S.226, S.232
DME (distance measuring equipment) S.303
Doppler/Duplexsonographie S.79, S.252, S.254
Dornier Do 228 S.281
Dosenbarometer S.28
Dosiswirkungsbeziehungen S.182, S.183, S.334
Drehbeschleunigung S.156
Drogen S.156, S.161, S.241, S.262
Druckabfall S.57, S.59, S.60, S.78-80
Druckanzeige S.65, S.305
Druckatmung S.35, S.38, S.45, S.56, S.61, S.64, S.103
Druckausgleich S.62, S.74, S.75, S.77, S.78, S.152
Druckhöhe (Pressure Altitude) S.32, S.48, S.61, S.67, S.301
Druckkammer S.35, S.52, S.54, S.61, S.63, S.67, S.68, S.70, S.84
Druckmaßeinheiten S.26
Drucksturz (Rapide Dekompression) S.79-81
Druckweste S.39, S.117
Dry-bulb S.194
Ductus Semicirculares S.155
Dunkeladaption S.122, S.123, S.127, S.129
Durchfallerkrankungen S.321
Durchflussanzeige (FLOW) S.65
„Dynamic Response Index (DRI)“ S. 110
Dysbarismus S.78

E

Earblock S.74, S.75
Edelgase S.41, S.79
EEG (Elektroencephalogramm) S.206, S.248, S.251, S.253, S.256, S.259, S.269
Eigenfrequenz S.165, S.167
Eigenresonanz S.334
Eignungsfeststellung S.225, S.236-240
Eignungsmerkmale S.225, S.238
Einatmung (Inspiration) S.38, S.41, S.66, S.81, S.103
Einsatzoffizier (EO, auch „Einsetzer“ genannt) S.289, S.292, S.319, S.322
Einsatzsteuerung S.289, S.290
Einschlafen am Steuer S.210
Einsilbenverstehen S.176
Elektrolytverlust S.201
EMG/NLG S.252, S.254, S.335
Emotionale Belastung S.151, S.233, S.234
Emphysem S.51, S.78
Encephalomyelitis disseminata S.251, S.257, S.259
Endanflug (final) S.296, S.309
Energieumsatz S.191, S.192
Entamoeba dispar S.321
Entamoeba histolytica S.321
Entspannungsübung S.223
Epidemiologie S.319, S.321, S.322
Epilepsie S.251, S.254, S.255, S.259
EPT (Effective Performance Time) S.59, S.60, S.71
Erdbeschleunigung (g) S.26, S.34, S.49, S.87, S.88, S.158
Erfrierungen S.197-200
Ergonomie S.153, S.210, S.213, S.225, S.232
Ermüdung S.117, S.122, S.182, S.205, S.209-213, S.334
Ernährung S.58, S.220, S.335
Erschöpfung S.104, S.153, S.197, S.201, S.202, S.226
Erythrozyten S.42, S.43, S.46, S.55, S.252
Euphorie S.58, S.257
Eurocopter (Bölkow) Bo-105M (VBH-1) / Bo-105P (PAH-1) S.272
Eurocopter PAH 2 UH „Tiger“ S.283
Eurofighter EF-2000 „Typhoon“ S.282
Eustachische Röhre S.74, S.174
Evaporation S.194
Evozierte Potentiale S.251, S.258
Exosphäre S.21, S.25
Extrasystole S.96
Extremitätenverletzung S.325
Exzentrische Fixation S.123

F

Fahrenheit S.191
Fahrtmesser (airspeed indicator) S.301, S.305
„Faktor Mensch“ S.119, S.150, S.236, S.243, S.245
Farbsinnstörung S.135-136
Fibroplasie S.62
Flicker-Light-Vertigo S.126, S.151
Fliegerarzt S.82, S.83, S.119, S.162, S.176, S.211, S.213, S.219, S.222, S.223, S.229, S.240, S.245, S.247, S.250, S.260, S.265, S.287, S.291, S.292
Fliegerbekleidung S.325
Fliegerhelm S.66, S.67, S.117, S.130, S.132, S.188, S.189, S.293, S.327
Fliegerkombination S.117
Flight level S.32, S.294, S.301
Flug(überwachungs)-Instrumente S.144-149, S.300, S.301, S.305
Flugabfertigung (Base Operations, abgekürzt Base Ops) S.290, S.293, S.296
Flugauftrag S.130, S.289, S.291, S.292, S.296
Flugbetriebsbereich (flightline) S.287, S.288, S.309
Flugdienstfähig S.221
Flugparameter S.116
Flugplatz S.287-291
Flugplatzfeuerwehr S.291
Flugplatz-Kontrollturm (aerodrome control tower – TWR) S.288, S.289
Flugplatzkontrollzone S.288
Flugpsychologie S.233, S.236, S.240, S.242, S.245
Flugpsychologische Untersuchung S.237, S.240, S.241
Flugregeln S.287, S.297, S.298
Flugsicherheit S.138, S.150, S.162, S.174, S.219, S.221, S.222, S.236, S.242, S.245-247, S.249, S.250, S.255, S.337
Flugsicherheitsoffizier (FSO) S.240v245, S.289
Flugsicherungs-Fernschreibnetz (FSFschrN) S.290
Flugsicht S.150, S.153, S.297
Flugunfall/Luftzwischenfall S.99, S.229, S.233, S.241, S.306
Flugverkehrs freigabe (air traffic control clearance) S.288, S.293, S.297, S.309
Flugvorbereitung S.244, S.245, S.292
Flugzeugschutzbauten (shelter) S.184, S.288
Flüssigkeitsmagnetkompass (Whiskey compass) S.302
FOD – foreign object damage S.288, S.309
Formatio reticularis S.195
Fovea centralis S.121, S.122
Fragebogen S.207, S.211, S.249, S.253
„Fragilisation“ S.111
Fraktur S.94, S.255, S.314, S.325, S.329-331
Freilaufender Rhythmus S.205
Freileitung S.129, S.130
Friedhofsspirale (graveyard spiral) S.145
Friedhofstrudeln (graveyard spin) S.145
Funkverkehr S.24, S.66, S.185, S.297

G

G 35-Ermächtigung S.322
Gallensteine S.220
Ganzkörper-Schwingungen S.163, S.169
Ganzkörpervibrationsbelastung S.189, S.325, S.334, S.336
Gasaustausch S.37-39, S.42, S.46, S.51, S.57, S.313
Gasbrand S.313
Gastrointestinale Symptomatik S.141
G-Belastungen S.102, S.104, S.117, S.221, S.235, S.331, S.332
Gefäß S.48, S.79, S.97, S.102, S.120, S.136, S.252
Gefechtsstand S.289
Gefechtsstandoffizier (OvG) S.289
Gefühl des Hängens (leans) S.145
Gehörgangseinengung S.174
Gehörgangsekzeme S.173
Gehörschutz S.173, S.174, S.183, S.185, S.314
Gelbfieber S.321, S.322
Geomagnetisches Feld S.25
Geophysikalische Beratungsstelle (Wetterberatung) S.290, S.293
Gesetz von Boyle-Mariotte S.29
Gesetz von Charles S.30
Gesetz von Dalton S.31
Gesetz von Henry S.31
Gesichtsfeld S.58, S.98, S.99, S.122, S.124, S.125, S.129, S.132, S.137, S.250, S.258
GKN-WHL Sea King Mk. 41
G-Kräfte S.56, S.93, S.94, S.151, S.221, S.244, S.282
Glanduläre Wasserabgabe S.194
Glasgow-Coma-Scala S.255
Glaskörper S.120, S.121
Glaukom (grüner Star) S.138
Gleichgewichtsorgan S.140, S.141, S.153
Gleitpfad (Glide slope) („on course, on glide path“) S.289, S.296, S.309
Global Positioning System (GPS) S.303
G-rate of onset S.92, S.93, S.99
Greyout S.96, S.98, S.99
Grundumsatz S.191, S.197, S.207
G-Toleranz S.92-94, S.98-104, S.221, S.333
Gz- Gx- Gy- Beschleunigungen S.325, S.331

H

Habituation S.156
Hakenfanganlage (arresting gear) S.287
Halswirbelsäule S.189, S.326, S.336
Hämatotympanon S.74
Hämoglobin S.42, S.45-47, S.53, S.55-57, S.222
Hand-Arm-Schwingungen S.163, S.168, S.169, S.170
Handlungsfrequenz S.234
Hang-Over-Symptome S.222
Hauptwolkenuntergrenze (ceiling) S.292, S.309
Hb-Sättigung S.47, S.48, S.61
Head up Display (HUD) S.302, S.304, S.309
Heckrotorsteuerung S.272, S.299
Helladaption S.123
Helmet mounted display (HMD) S.304
Helmgewicht S.325, S.332, S.336
Helmmasse S.332
Hertz S.334
Herzfrequenz S.96, S.221, S.223, S.234
Herzkranzgefäße S.49
Herzminutenvolumen S.49
Herzschlagvolumen S.49, S.96
HIBLER-Wärmepackung S.198
High Performance Aircraft (HPA) S.87, S.331, S.338
Hirnödem S.202, S.203
Histotoxische Hypoxie S.51, S.56, S.57
Hitzeadaption S.200
Hitzeerschöpfung S.201, S.202
Hitzekrämpfe S.201, S.202
Hitzeschäden (Pathophysiologie und Symptomatik) S.201-203
Hitzschlag S.201, S.202
Höhe über dem Startplatz (QFE) S.301
Höhenkrankheit S.53, S.68
Höhenmesser (altimeter) S.28, S.32, S.34, S.36, S.145, S.301, S.305
Homoiotherme Lebewesen S.191, S.192
Hörbahn S.181
Horopterkreis (=Sehkreis) S.124
Hörschäden S.182, S.186, S.187
Hörschwellenabweichung, vorübergehende (TTS = temporary threshold shift) S.182, S.183
Hörsturz S.187
Hörvermögen S.74, S.176, S.177
„Hosenbodengefühl“ (seat of the pants) S.143
Hubschrauber S.130, S.149-153, S.170, S.184, S.229, S.238, S.241, S.267, S.272-276, S.284, S.287, S.298-300, S.306, S.307, S.311, S.314, S.325-327, S.333-336
Hüfner'sche Zahl S.47
Human Engineering S.246
Human-Factors S.211, S.232, S.242, S.245

Hydromayosis S.200
Hydrostatischer Druck S.95-97, S.99, S.103
Hypämische Hypoxie S.47, S.51, S.55
Hyperbare Oxygenation S.56, S.84-86
Hyperventilation S.39, S.44, S.45, S.48, S.59, S.60, S.151, S.251
Hypoglykämie S.151, S.212, S.215
Hypokapnie S.39
Hypoplasie S.256
Hypothalamus S.195, S.196
Hypothermie S.39, S.197
Hypoxie S.44, S.47, S.51, S.53-57, S.59-61, S.64, S.65, S.68, S.70, S.95, S.97, S.113, S.151, S.200, S.212, S.222

I

IAS (idicated air speed) 272, S.301
ICAO (International Civil Aviation Organisation) S.27, S.36, S.190, S.305
Illusion des Steigens und Sinkens (Somatogravic Illusion) S.147
IMC (Instrument Meterological Conditions) S.244, S.245, S.298, S.309
Impulsschall S.180
Inertgase S.79
Infektionsepidemiologie S.319, S.320
Infektionskrankheit S.58, S.319
Informationsdefizit S.244, S.262
Informationsmangel S.151, S.153
Informationsüberladung S.151, S.153, S.234, S.243
Informationsverarbeitung S.183, S.239
Infrarot S.118
Infusion S.198, S.199, S.202, S.313, S.314
Innenohrhaarzelldefekte S.187
Innenohrhaarzelldegeneration S.186, S.187
Innere Uhr S.205, S.206, S.216
Inspiratorisches Reservevolumen S.40
Instrumentenabflugverfahren S.292
Instrumentenanflugverfahren S.128, S.146, S.289, S.296
Instrumentenbeleuchtung S.125
Instrumentenflug (IFR) S.150, S.153, S.292, S.301, S.302
Instrumentenflugregel S.150, S.289, S.297, S.298, S.309
Instrumentenflugwetterbedingung S.149, S.150, S.284, S.309
Intercostalmuskulatur S.93
Interferenz S.222
Internationale Standard Atmosphäre (ISA nach ICAO (1993)) S.27, S.34, S.301
Ionisation S.23
Ionosphäre S.23

K

Kabinendach S.108
Kabinendrucksysteme S.66
Kälteadaptation S.196
Kälteexpositionen S.55
Kälteschäden S.197-200
Kälteschmerz S.197
Kältezittern S.196, S.197
Kalzitkristalle (Otolithen, Statolithen) S.142
Kammerflimmern S.198, S.199
Kapillaren S.78
Kardioorporale Leistungsfähigkeit S.221
Katapultstart S.91, S.156
Kehlkopf (Larynx) S.36
Keilbeinhöhlen S.74
Kelvin S.26, S.29, S.191
Kinetose S.141, S.155-162, S.314
Kinocilium S.155
Klang S.177, S.178
Klinische Flugpsychologie S.236, S.240
Klinische Tropenmedizin S.319
Knall S.71, S.177, S.178, S.187
Koffein S.211
Kohlendioxid S.20
Kohlenmonoxid S.45
Kollapszeichen S.80
Kollektive Blattverstellung S.299
Konduktion S.194
Konstruktions- und Antriebsmerkmale [Hubschrauber] S.298
Kontaktlinsen S.93
Kontusion S.331
Konvektion S.194
Konverter (LOX-Systeme) S.62
Koordination S.59, S.155, S.183, S.184, S.196, S.221, S.238, S.239, S.245, S.249, S.250
Koppelnavigation S.303
Körperfett S.80
Körperhöhlen S.28
Körperkerntemperatur S.191, S.192, S.195-197, S.201
Körperliche Fitness S.58
Kraftstoffberechnung (fuel calculation) S.292
Krafttraining S.104
Krämpfe S.201
Kreiselkompass S.303
Krisenintervention S.228, S.230, S.231
Künstlicher Horizont (attitude director indicator, ADI) S.145, S.302, S.305, S.308
Kurzzeitgedächtnis S.52, S.212

L

Labor S.201, S.209, S.217, S.252, S.254, S.263, S.265, S.219, S.326-328
Landebahn (runway, abgekürzt RWY) S.127, S.128, S.287, S.289, S.291, S.296
Langeweile S.212
Langzeitflüge S.325
Langzeitgedächtnis S.212, S.239
Lärm S.151, S.156, S.173, S.176-179, S.183-190, S.211, S.214, S.279, S.288, S.314
Lärmbelästigung S.297
Lassègue-Zeichen S.250, S.258
Laserschutzbrille S.137
„last chance check“ S.293
Laterale Beschleunigung S.90
Leishmaniose S.321
Leistungsflug S.216, S.217, S.219
Leistungsgrenze S.116, S.246
Leistungsschwankungen S.209
Lendenwirbelsäule S.170, S.326, S.328, S.329, S.333, S.334
LET L-410-S-UVP „Turbolet“ S.280
Level off check S.294
Lichtempfindlichkeit S.121
Lichterführung S.297
Lichtkanone S.288
Lichtreflexe S.126
Limbisches System S.195
Lineare Trägheitswirkung S.142
Liquid Oxygen (LOX) S.63, S.64
Lokalisierung von Notfunksignalen durch Satelliten S.307
Luft in den Nasennebenhöhlen und im Mittelohr S.313
Luftbewegung S.23, S.191, S.192, S.203
Luftdruck S.24, S.26, S.28, S.29, S.32, S.34, S.36, S.43, S.47, S.53, S.60, S.62, S.67, S.71, S.73, S.74, S.77, S.78, S.94, S.188, S.301, S.310, S.313
Lufteinschlüsse nach Operationen S.313
Luftfahrtveröffentlichungen („post flight infos“) S.290
Luftfeuchtigkeit S.191, S.194, S.203, S.314, S.320
Luftkrankheit S.155, S.161, S.162, S.241
Lufttröhre (Trachea) S.37, S.38, S.170
Luftstraßen (airways) S.278, S.292
Luftverkehrsordnung S.297
Lunge S.36-43, S.46-54, S.57, S.60-62, S.71, S.77-79, S.82-83, S.97, S.102, S.199, S.220
Lungenbläschen (Alveole) S.37, S.41, S.42, S.53, S.54
Lungenoedem S.62
Luxation S.331

M

M1-Manöver S.103
Macula S.121, S.136, S.142, S.155, S.156
Magnetosphäre S.25
Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT) S.252, S.326
Malaria (mala aria = schlechte Luft) S.320-322
Manie S.261
Masse S.26, S.66, S.87-89, S.107, S.120, S.156, S.192, S.227, S.332, S.336
Massenträgheit S.88, S.101
Mastoidrevision S.173
McDonnell-Douglas F-4F „Phantom II“ S.68, S.184, S.269, S.333
Mechanisches Auslösezeitwerk S.112
Medikament S.58, S.137, S.152, S.161, S.162, S.199, S.211, S.215, S.221, S.222, S.316
Medulla oblongata S.39, S.196
Mehrfacharbeit S.238, S.239
Meningeale Reizung S.202
Meningeome S.256
Menschliches Versagen S.209, S.210, S.233, S.242
Menstruationszyklus S.209
Mentale Anforderungen S.209, S.233, S.236
Mentale Grenzbelastungen S.212, S.236
Mentales Training S.228
Mesosphäre S.21, S.24
Migräne S.247, S.250, S.258, S.259
Milde Hypoxie S.222
Missbildungen und Deformitäten S.327
Missbrauch S.241, S.262-265
Mitochondrien S.56
Mittagsschlaf S.206, S.210
Mittellinie (center line) S.289, S.296, S.309
Mittelohr S.62, S.74, S.75, S.174, S. , S.181, S.187, S.313
Molecular Sieve Oxygen Concentrating System (MSOCS) S.63
Monochromasie S.129, S.130
Monotonie S.149, S.210, S.334
Morbus Menière S.187
Mortalitätsstudie S.214
Moskitonetze S.321, S.322
Motion Sickness S.155
Motoneuronerkrankungen S.257
Motorisches System S.195
Müdigkeit S.58, S.151-153, S.155, S.211-213, S.222
Multiple Sklerose S.257
Muskelermüdung S.210
Muskeltraining S.104, S.208, S.209
Myasthenie S.257
Myokardhypertrophie S.220
Myopathie S.254, S.257

N

Nachbesprechung („Debriefing“) S.296, S.322
Nacht- und Schichtarbeit S.213
Nachtarbeitsperiode S.208
Nachtsehen S.121
Nachtsehgerät S.129
Nachtsehtechnik S.123
Nachweisgrenzen von Alkoholmissbrauchsmarkern S.263
Nackensteife S.202
Nahrungsaufnahme S.156, S.206, S.207, S.216
Narkolepsie S.250, S.259
Nasennebenhöhlen S.30, S.37, S.74-76
NATO-Hubschrauber: NH-90 S.284
Nausea S.155, S.259
Navigationsgeräte S.302, S.305
Navigationsinstrumente S.303
„Neck injuries“ S.331, S.337
Negative Rückkopplung S.195
Neoplasien S.256
Nervus acusticus S.181
Nervus opticus S.121, S.250
Nervus vagus S.141, S.250
Netzhaut S.51, S.95, S.98, S.101, S.120-124, S.130-138
Neurologie S.247, S.249, S.252, S.253, S.260, S.328
Neurosen S.241, S.242, S.265
Newton S.87, S.88, S.107
Normalgewicht S.220
Normalsichtigkeit (Ametropie) S.130
Not Sauerstoff S.60, S.63-65, S.111, S.113, S.116
NOTAM (Notices to Airmen) S.290, S.292, S.310
Notausrüstung S.113, S.293
Noxen S.182, S.222
Nullzeittauchgänge S.82
Nystagmus S.141, S.142, S.258

O

O ₂ -Toxizität S.62
Objektive Refraktion S.137
Ohr S. 30, S.62, S.74, S.75, S.82, S.89, S.139, S.173-181, S.185-187
Ohrschmalz (Cerumen) S.174
On Board Oxygen Generating System (OBOGS) S.63, S.64
Operationelle Anforderungen S.311
Operationsbedingte Neuralgien des Nervus Trigemini S.173
Ophthalmologie S.119
„optische Achse“ S.121, S.122
Optische Reaktionszeit S.208, S.209
Optische Täuschung S.126, S.128
Optokinetische Reize S.156
Orthopädie S.250, S.252, S.325, S.326
Orthopädischer Ganzkörperstatus S.326, S.327
Orthopädisches Screening S.326, S.337
Orthostasesyndrom S.222
Ortsmissweisung (variation) S.302
Osteochondrosen S.325
Osteome S.174
Otitiden S.173
Otitis media S.173
Otolithen S.142-144, S.147, S.148, S.156-159
Otolithenapparat S.140, S.142, S.159
Otolithen-Bogengang Konflikt S.158
Otolithen-Otolithen Konflikt S.159
Otoskopie S.174
Overrun S.287
Ozonschicht S.24, S.35

P

Panavia 200 „Tornado“ S.63, S.181, S.184, S.268, S.292, S.293, S.296, S.309, S.333
Papille S.121, S.136, S.257
Parasitose S.320
Paresen S.257, S.258
Parkinson S.257
Partialdruck S.52
Pathogenese S.156, S.256, S.258, S.319
Patiententransporteinheit (PTE) S.315-317
Peak Flow S.40
PEC-Teil („Personal Equipment Connector“) S.64, S.113
Perfusionsstörungen S.97, S.102
Periodische Schwingung S.165, S.167
Persönlichkeitsstörungen S.261, S.265, S.266
Perspiratio insensibilis S.194
Perspiration S.194
Petechien S.81
Phasengleichheit S.205, S.206
Phasenlänge S.205
Phobie S.149, S.241, S.265
Phon S.179
Physische Überanstrengung S.211
Pilot's Workload S.234
Plasmodienart S.320
Platzdruck S.301
Pneumatische Schienen S.313
Pneumothorax S.51, S.57, S.78
PO ₂ S.31, S.39, S.41, S.43, S.44, S.48, S.51, S.53, S.54, S.60
Poikilotherme Lebewesen S.191
Politzer-Versuch S.174
Posttraumatische Amnesie S.254, S.255
Posttraumatische Epilepsie S.254, S.255
Posttraumatische Stresserkrankung (PTSD) S.229, S.230, S.254, S.255, S.322
Präventionsmaßnahmen S.321
Präventivmedizin S.319, S.321-324, S.327
Pressorezeptoren S.49, S.67
Pressurized cabins S.67
PRICE-Check S.60, S.65
Prophylaxe S.162, S.203, S.259, S.319-322
Proportionalregler S.195
Propriozeptives System S.139, S.140, S.155-157
Protozoen S.321
Psychiatrie S.240, S.249, S.252, S.253, S.260, S.328
Psychischer Stress S.212
Psychologische Auswahl des fliegenden Personals S.236
Psychologische Faktoren S.151, S.152
Psychoneurosen S.241

Psychopharmaka S.161, S.260, S.261, S.265
Psychosen S.261
Psychosomatische Symptome S.229, S.240, S.241

Q

QNH (Platzdruck, reduziert auf Meereshöhe) S.301, S.310

R

Rachenraum (Pharynx) S.37
„Radar contact“ S.293
Radiographie S.326
Rate of onset S.79, S.92, S.93, S.99
Raumflüge S.92, S.216, S.217
Räumliche Desorientierung S.126, S.139, S.140, S.144, S.148, S.150-154, S.212, S.245
Räumliche Orientierung S.129, S.139, S.148, S.150, S.152, S.153, S.244
Reaktionsschwelle S.51
Reaktionszeit S.208, S.209, S.212, S.222
Redout S.100
Reduktion der Sicht S.244
Reflex S.92, S.93, S.130, S.141, S.148, S.151, S.174, S.251, S.257, S.258
Regelung der Körperkerntemperatur S.195
Regenbogenhaut (Iris) S.120, S.121
Regler S.38, S.39, S.60, S.61, S.64, S.65, S.67, S.71, S.195
Reintonaudiogramm S.174, S.176, S.177
Rekompressionsbehandlung S.82
Resonanz S.163, S.165-167, S.170, S.176-179, S.181-183, S.187-189, S.229, S.326
Respiration S.37, S.53, S.78
Resynchronisation S.205, S.211, S.214-216
Rettungsausrüstung S.117
Rettungsausschuss S.109, S.325, S.326, S.328-331
Rhodopsin S.122
Risikoerleben S.233
Risikofaktoren S.219, S.220, S.252, S.253
Risikoverhalten S.239
Röhrensehen (tunnel vision) S.98, S.150
Rollfeld (manoeuvring area) S.287, S.288
Rollfreigabe (taxi clearance) S.288, S.293, S.296
Rollhaltepunkt (holding position) S.288
Rollwege (taxiway) S.287, S.290, S.292
Rotationsellipsoid S.23
Rotationschwingungen S.165
„R + S“ S.291
RTO S.331
Rückenmark S.82, S.141, S.195, S.196, S.254, S.258, S.326
Rückfall S.242, S.255, S.263, S.265

S

Sacculus S.140, S.142, S.155
Safety pressure S.61
Salmonellen S.321
Sandmücke (Phlebotomen) S.321
SAR–Safe and Rescue S.151, S.233, S.270-275, S.276, S.284, S.287, S.305-308, S.310
SAR-Leitstellen (Rescue Coordination Center = RCC) S.305, S.307
SARSAT/COSPAS (Search and Rescue Satellite Aided Tracking) S.307
Sauerstoff S.21-24, S.31, S.35-47, S.51-53, S.56, S.59-58, S.71, S.83, S.120, S.161, S.222
Sauerstoff-Atemmaske S.67, S.68, S.71, S.117, S.161, S.291, S.293
Sauerstoffmangelsymptome S.38, S.48, S.51, S.52, S.56-59, S.68, S.71, S.98, S.116, S.124
Sauerstoff-Notversorgung („Emergency Oxygen Handle“) S.60-63, S.64, S.111, S.113
Sauerstoffpartialdruck S.41, S.43, S.44, S.53, S.54, S.61
Sauerstoffreserve S.98
Sauerstoffverbrauch S.191, S.234
Sauerstoffvorrat S.304
Schädelhirntraumen S.254
Schädigungen S.117, S.182-183, S.186-188, S.198, S.227, S.250, S.255, S.325, S.329
Schalldruck S.177-181, S.183, S.185, S.186
Schallpegel S.177, S.178, S.180, S.181, S.185, S.189
Schallschutzmaßnahmen S.173, S.174, S.177, S.185, S.189
Schallwahrnehmung S.181
Schallwirkung auf den Menschen S.181, S.183
Scheindrehung S.145
Scheinhorizont S.126
Scheitelfaktor S.165
Schlaf S.206, S.210, S.211, S.214, S.223, S.251, S.257
Schlafmangel S.211, S.215
Schlagvolumen S.49, S.102
Schlauchboot S.113, S.117, S.118
Schleudersitz S.64, S.92, S.94, S.109-113, S.116, S.233, S.248, S.269, S.291, S.325, S.326, S.328-331, S.333
Schmerzschwelle S.179
Schock S.56, S.57, S.81
Schweiß S.81, S.155, S.195, S.209
Schwellenabwanderung, dauernde (PTS = Permanent treshold shift) S.182, S.183
Schwerpunkt S.206, S.250, S.322, S.334, S.336
Schwingbeschleunigung S.165, S.167, S.168
Schwingstärke S.164, S.167-170, S.335
Schwingung S.130, S.163-172, S.181, S.187, S.225, S.334
Schwingungsmechanik S.163
Screening S.236, S.252, S.263, S.326, S.336, S.337
Sedativa S.202, S.211, S.222
Seekrankheit S.141, S.155
Seenotanzug S.118
Seenotbekleidung S.325
Seenotfälle S.305

Sehleistung S.98, S.101, S.130, S.134
Sehloch (Pupille) S.120, S.121, S.123, S.130, S.182, S.250
Sehnervenfasern S.120
Sehstörungen S.52, S.56, S.95, S.96, S.98, S.99, S.100, S.258
Sehvermögen S.95
Selbstmedikation S.211, S.222
Sensorischer Koflikt (sensory conflict concept) S.157, S.161
„Sequencer“ S.112
Shigellen S.321
Sicherheitsmindesthöhe S.297, S.298
Sichtflug (VFR) S.122, S.150, S.153, S.244, S.289, S.297, S.310
Siebbeinzellen S.75
Sikorsky CH-53G „Stallion“ S.274, S.275
Simulatorkrankheit S.155, S.159, S.160
Sinnesorgan S.119, S.120, S.140, S.144, S.153, S.157, S.159
Sinnestäuschung S.140, S.144, S.148-150, S.153, S.154, S.245, S.261
Sinusitis S.78, S.173
Sinusschwingung S.165, S.176, S.181
Sitzhaltung S.161, S.325, S.331, S.333, S.335
Skoliosen S.327
Solarkonstante S.34
Somato-Sensorisches System S.155
Sondergenehmigung S.137, S.222, S.249, S.256, S.260, S.266, S.328
Sonnenstich S.202, S.203
Sonographie S.79, S.252, S.326, S.327
Soziales Umfeld S.151, S.206, S.223, S.225, S.319
Spannungspneumothorax S.78
Spasmolytika S.222
Spatial Disorientation (SD) S.139
Spinalnerven S.258, S.328
Splitterschutzweste S.325
Spondylarthrosen S.325
Spondylolisthesis S.327
Spondylolyse S.327
Sprachaudiogramm S.176
Sprachverstehen S.174, S.176, S.177, S.182, S.183, S.189
Stäbchen S.51, S.98, S.121, S.123, S.124, S.129
Staffelgefechtsstände (Squadron Operations, abgekürzt Squad Ops) S.289, S.292
Stapes S.181, S.187
Stapesfußplatte S.175, S.187
Startbahn (runway, abgekürzt RWY) S.127, S.185, S.287, S.288, S.293
Starterlaubnis (take-off clearance) S.293
Staurohr (pitot tube) S.301
Steilstart [Hubschrauber] S.299
Stereocilien S.155
Stickstoff S.21, S.31, S.41, S.42, S.53, S.67, S.78-83
Stiff-neck S.331

Stimulans (Hell-Dunkel-Wechsel) S.206, S.211
Störschwelle S.47, S.52, S.61
Strahlflugzeug S.133, S.138, S.184, S.237, S.310, S.325-328
Strain S.225
Stratosphäre S.21, S.24
Stress S.58, S.120-122, S.211, S.212, S.225, S.227-230, S.239, S.244
Stressoren S.130, S.151, S.225-227
Stressresistenz S.227
Stresstoleranz S.227
Subarachnoidalblutung S.255
Subcutane Druckrezeptoren S.144
Suchradar (search radar) S.270, S.289, S.310
Sucht S.222, S.262, S.265
Suchverfahren („Search pattern“) S.307
Suizid S.261
Sustained Operations S.210
Symptome der Ermüdung S.212
Synchronisation S.205, S.211-217
Systole S.49, S.96

T

Tabakkonsum S.220
TACAN (Tactical Air Navigation) S.224, S.289, S.296, S.303
TAS (true air speed) S.301
Taucher S.62, S.73, S.78-80, S.82, S.83, S.196
Taucherflöhe S.81
Täuschungen (Illusions) S.120, S.126-128, S.140, S.144-150, S.153, S.154, S.245, S.261
TCTP (Tactical Combat Training Program) S.289, S.292
Teambefähigung S.237
Technische Anforderungen an das Rettungssystem Schleudersitz S.328
Temperatur S.21, S.23-26, S.29, S.30, S.33-36, S.39, S.41, S.47, S.48, S.57, S.71, S.74, S.94, S.109, S.116, S.117, S.184, S.191-209, S.212, S.215, S.223, S.251, S.280, S.299, S.301, S.303, S.305, S.314, S.320
Therapie S.56, S.82, S.161, S.186, S.231, S.242, S.259, S.314, S.315, S.319-322, S.331
Thermoanzug S.118
Thermoregulation S.196, S.212
Thermosphäre S.24
Tinnitus S.182, S.183, S.186, S.187, S.328
Ton S.177, S.178
Trachealluft S.41
Trägheitskräfte S.87, S.88, S.94, S.153, S.157
Training S.104, S.113, S.161, S.220, S.221, S.223, S.239, S.289
Tranquilizer S.222
Transmeridiane Flüge S.208, S.214-216
Traumatisierung S.230
Trockentemperatur S.194
Trommelfell S.62, S.74, S.173-175, S.187, S.188
Tropenerkrankungen S.320, S.322
Tropenlabordiagnostik S.319
Tropenmedizin S.319, S.321-324
Tropentauglichkeit S.319
Tropische Arboviren S.321
Tropopause S.24, S.34
Troposphäre S.21, S.23
Tuba Eustachii S.74
TUC (Time of Useful Consciousness) S.59, S.60, S.71
Tumbling S.147
Tunnel-Sehen S.96, S.98, S.124, S.150
Turbulenzen S.23, S.92, S.117, S.149, S.151, S.158, S.185, S.314
„turn around“ S.291
Typhus S.321

U

Überdruck S.38, S.44, S.56, S.60-62, S.64, S.65, S.75, S.78, S.83
Überdruckbeatmung S.57, S.102
Überdruckkammer S.83
Übergewicht S.80, S.219, S.220
Überlebensausrüstung (Personal Survival Pack“) S.111, S.113, S.117, S.118
Überlebensweste S.117, S.118, S.291, S.325
Übermotivation S.212
Überraschungseffekt S.151
Ultraschall S.79, S.137, S.177, S.249, S.252, S.270
Ultraschall-Doppler-Sonographie S.79
Unfall S.63, S.99, S.116, S.130, S.186, S.189, S.209, S.210, S.213, S.229, S.233, S.240-242
Ungewissheit (INCERTA) S.306
Unterkühlung S.48, S.117, S.197-200, S.203
Urteilsfähigkeit S.52, S.59, S.211, S.213
Utriculus S.140, S.142, S.155

V

Vagotonie S.221
Vakuummattmatratze S.313, S.331
VALSALVA S.62, S.75, S.152, S.174
Van-Allen-Gürtel S.25
Variometer (vertical velocity indicator) S.145, S.302, S.305
Vasokonstriktion S.49, S.196, S.198, S.200
Venen S.48, S.79, S.102, S.198, S.258
Ventilation S.38-40, S.42, S.67, S.70, S.97, S.102, S.151, S.313
Ventilationsstörungen S.220
Verdunstungswärme S.195
Vergiftungssymptome S.56
Verhaltensreaktion S.194
Verletzungen S.77, S.80, S.110-112, S.116, S.117, S.199, S.228, S.229, S.233, S.241, S.251, S.254, S.255, S.291, S.312, S.314, S.315, S.325-328, S.331
Vestibularsystem S.155, S.158
Vibration S.92, S.94, S.130, S.151, S.153, S.156, S.163, S.166, S.173, S.179, S.190, S.211, S.226, S.244, S.314, S.334
Vibrationsbelastungen S.325, S.334, S.336
Visuelles System S.155, S.158-160
Visuskorrektur S.212
Vitalkapazität S.40, S.62
VMC (Visual Meteorological Conditions) S.297, S.310
Volumen feuchter Gase S.30
Volumen trockener Gase S.30
Vomitus S.259
VOR (Very high frequency omni directional radio range) S.303
Vorfeld (apron) S.287, S.288

W

„Wahrnehmung“ S.52, S.98, S.119, S.120, S.128, S.130, S.136, S.149, S.155-157, S.159, S.177, S.181, S.266, S.297
Wahrnehmungsfehler S.120, S.244, S.245
Wahrnehmungstäuschung S.120
Wärme- (oder Kälte-) Gefühl S.52
Wärmehaushalt S.191
Wärmestrahlung S.191, S.193
Wehrdienstbeschädigung (WDB) S.186, S.229, S.335-337
Wehrfliegerverwendungsfähigkeit (WFV) S.134, S.176, S.219-220, S.239-241, S.249-259, S.325-328, S.331, S.337
Weltraumkrankheit S.155
Wendeanzeiger (turn and slip indicator) S.145, S.302, S.305
Westland Sea Lynx Mk. 88 S.276, S.306
Wetter S.21, S.23, S.32, S.36, S.74, S.116, S.117, S.126, S.147-150, S.153, S.159, S.244, S.259, S.285, S.289-293, S.297, S.298, S.305, S.309, S.310, S.318, S.320
Wetterberatung S.290, S.292, S.293
Winkel der Querlage (Rate of turn/blank) S.302
Winkelbeschleunigung S.90, S.106, S.107, S.156, S.158, S.282
Wirbelkörperfraktur S.325
Wirbelsäule S.90, S.91, S.110, S.166, S.170, S.189, S.250, S.252, S.258, S.326-337
Wirbelsäulenbelastungen S.333, S.336
Workload S.122, S.225, S.234

Y

Yaw / Gieren S.302

Z

Zähne S.76
Zapfen S.121, S.123, S.134, S.135
ZDV 46/6 S.134, S.137, S.176, S.221, S.240, S.248-250, S.256, S.326-328, S.337
Zeitverschiebung S.205, S.214, S.215, S.217
Zeitzone S.205, S.212, S.215-217
Zentrales Nervensystem (ZNS) S.142, S.157
Zentrifuge S.92, S.95-97, S.99, S.102, S.104, S.221, S.331
Zeolithe S.64
Zilien (Macula) S.140, S.142
Zwischenwirbelscheiben S.329, S.333-336

„0/0-Sitz“ S. 109

ISBN 3-00-016306-9