

Universität Bielefeld
Fakultät für Gesundheitswissenschaften
School of Public Health

Belastung des Flugpersonals durch kosmische Strahlung

DISSERTATION

vorgelegt von
Dipl.-Math. Gaël Hammer

Betreuerin und Erstreferentin: Prof. Dr. Maria Blettner
Zweitgutachter: Prof. Dr. Alexander Krämer

Erklärung

Die eingereichte Dissertation wurde von mir selbst verfaßt. Ich habe nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt und wörtlich oder inhaltlich übernommene Stellen als solche gekennzeichnet. Dies ist mein erster Promotions-Versuch.

München, den 25.10.2001

Les lois nées de l'observation des enchaînements causals ne sont point des lois. Il ne suffit point de les retrouver partout dans le passé. Il faut aussi pouvoir les appliquer à l'avenir.

Saint-Exupéry, Carnet I

Danksagung

Ich danke Frau Prof. Dr. Maria Blettner sehr herzlich für ihre Unterstützung bei der Themensuche, ihre engagierte Betreuung dieser Arbeit, für die vielen Ermunterungen zu Sprüngen ins kalte Wasser und dafür, dass ich fast jedes Wochenende in den Süden fahren konnte.

Prof. Dr. Alexander Krämer gilt mein Dank für die Orientierungshilfe auf dem Gebiet der Gesundheitswissenschaften und die Kommentare zu meiner Arbeit.

Dr. Hajo Zeeb danke ich für die fachliche Begleitung und seine freundschaftliche Unterstützung während der gesamten Entstehungszeit der Arbeit.

Ohne die Hilfe von Thomas Schafft und Christoph Schröder bei der Beschaffung und Verwaltung der anfallenden Aktenberge wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Mein besonderer, liebevoller Dank gilt meiner Freundin, die mich motivierend und geduldig unterstützte – auch wenn Sie an dieser Stelle höchstens für ihre Backkunst erwähnt werden möchte.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Wissenschaftlicher Rahmen dieser Dissertation	1
1.2	Spezifische Fragestellung dieser Dissertation	2
2	Hintergrund	5
2.1	Epidemiologische Studien über Cockpit- und Kabinenpersonal	5
2.1.1	<i>Die deutsche Kohortenstudie über fliegendes Personal</i>	5
2.1.2	<i>Die europäische Studie über fliegendes Personal</i>	6
2.1.3	<i>Potentielle Risikofaktoren beim fliegenden Personal</i>	7
2.1.4	<i>Bisherige Studien zu fliegendem Personal</i>	8
2.2	Ionisierende Strahlung	15
2.2.1	<i>Wirkungsmechanismen ionisierender Strahlung</i>	15
2.2.2	<i>Quellen ionisierender Strahlung</i>	17
2.2.3	<i>Kosmische Strahlung</i>	25
2.2.4	<i>Schätzungen der Strahlenexposition des fliegenden Personals</i>	30
2.2.5	<i>Gesundheitseffekte ionisierender Strahlung</i>	32
2.2.6	<i>Europäische Richtlinien zur Strahlenbelastung</i>	39
2.3	Zusammenfassung	39
3	Planung und Durchführung der Expositionserfassung	41
3.1	Warum keine individuellen Messungen?	42
3.2	Datenmaterial	42
3.2.1	<i>Datenquellen innerhalb der Deutschen Lufthansa AG</i>	43
3.2.2	<i>Weitere Datenquellen</i>	52
3.3	Das Programm CARI	53
3.4	Schätzung individueller Dosen	55
3.4.1	<i>Expositionsschätzung in der Lufthansa-Studie</i>	55
3.4.2	<i>Imputation fehlender Werte</i>	58
3.4.3	<i>Konstruktion der Job-Expositions-Matrix</i>	59
3.4.4	<i>Validität und Genauigkeit der vorgestellten Methode</i>	61
3.5	Statistische Methoden	62
3.5.1	<i>Statistische Methoden in der Epidemiologie</i>	62
3.5.2	<i>Methodisch bedingte Fehler und ihre Auswirkung auf die Ergebnisse epidemiologischer Studien</i>	67
3.6	Zusammenfassung	72
4	Ergebnisse	74
4.1	Beschäftigungsdauer	74

4.2 Individuelle Flugstunden.....	75
4.2.1 Personen mit vollständig fehlenden Flugstunden	76
4.2.2 Fehlende oder agregierte Werte	77
4.3 Job-Expositions-Matrix.....	81
4.4 Ergebnisse der Expositionserfassung.....	83
4.5 Validierungsdaten	87
4.5.1 Deskriptive Auswertungen	87
4.5.2 Der Zusammenhang von Flugstunden und Flugzeugtyp mit der jährlichen Strahlendosis.....	93
4.6 Vergleiche	94
4.6.1 Beschäftigungsdauer als Surrogatsmaß für die Strahlenexposition.....	95
4.6.2 Validität der JEM-Methode	96
4.6.3 Zusammenfassung	98
4.7 Fehler bei der Dosisermittlung.....	99
4.7.1 Einfluß der Approximationen von CARI.....	99
4.7.2 Einfluß des tatsächlichen Flughöhenprofils und der Flugdauer auf die Dosisrate.....	102
4.7.3 Einfluß des Flugplans auf die Dosisrate.....	104
4.7.4 Streuung auf individueller Ebene.....	106
4.7.5 Zusammenfassung	107
4.8 Einfluß der Fehler bei der Expositionsschätzung auf die Risikoschätzer in der Lufthansa-Studie	108
4.8.1 Ergebnisse einer Simulationsstudie zu Fehlern in Job-Expositions-Matrizen	108
4.8.2 Ergebnisse einer Simulationsstudie zur Lufthansa-Studie.....	110
4.9 Zusammenfassung.....	111
5 Diskussion	113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Indirekt ionisierende Strahlung (Quelle: [190])	16
Abbildung 2.2: Vergleich der durchschnittlichen weltweiten Strahlenbelastung der Bevölkerung aus natürlichen und künstlichen Quellen (Quelle: [248])	25
Abbildung 2.3: Strahlenkaskade in der Erdatmosphäre (Quelle: Informationsbroschüre der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig)	26
Abbildung 2.4: Einfluß der Erdatmosphäre auf die Strahlenintensität	27
Abbildung 2.5: Einfluß des terrestrischen Magnetfeldes auf die Strahlenintensität (Quelle: Spurny et al., Vortrag auf der Tagung der IRPA-10, Hiroshima, 2000)	28
Abbildung 2.6: Einfluß des heliozentrischen Potentials auf die Penetrationskraft der kosmischen Strahlung	29
Abbildung 2.7: Prozentualer Anteil der Neutronenstrahlung an der Gesamtstrahlendosisrate (Äquivalentdosis) auf einer Höhe von 40.000 Fuß (ca. 12 km) (1965, bei einem Minimum des heliozentrischen Potentials) (Quelle: [112])	29
Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der Meßgeräte, die von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt im ACREM-Projekt eingesetzt werden	30
Abbildung 2.9: Flußdiagramm der Programmbibliothek LUIN99	31
Abbildung 2.10: dicht und locker ionisierende Strahlung (Quelle: [112], S. 366)	34
Abbildung 3.1: Beispiel einer Karteikarte mit Angaben zu Flugstunden	46
Abbildung 3.2: Datenbank mit Logbuchdaten von 4027 PilotInnen Juli 1997 bis Juni 1998	47
Abbildung 3.3: Struktur der Flugplan-Datenbank	50
Abbildung 3.4: Arbeitsweise von CARI	54
Abbildung 3.5: Interpolation von Dosisraten verschiedener Flugpläne, ohne bzw. unter Berücksichtigung der Variation des heliozentrischen Potentials	60
Abbildung 3.6: Schema einer JEM	65
Abbildung 3.7: Schema der JEM der Lufthansa-Studie	66
Abbildung 3.8: Publikationen, in denen eine JEM verwendet oder untersucht wurde (Suche in MedLine im Oktober 2000)	67
Abbildung 4.1: Histogramm der Beschäftigungsdauer	74

Abbildung 4.2: Histogramm des Austrittsdatums der aus dem Flugdienst ausgeschiedenen PilotInnen und Flugingenieure.....	77
Abbildung 4.3: Kumulative Häufigkeit fehlender Werte.....	79
Abbildung 4.4: Kumulative Häufigkeit des Anteils fehlender Werte an den individuellen Beschäftigungsjahren.....	79
Abbildung 4.5: Anzahl untersuchter Personen, aufgeschlüsselt nach Fehlen oder Vorhandensein von Blockstunden	80
Abbildung 4.6: Verteilung der ausgewerteten Blockstunden	81
Abbildung 4.7: Job-Expositions-Matrix	83
Abbildung 4.8: Entwicklung der Flugstunden in der untersuchten Zeitspanne	84
Abbildung 4.9: Durchschnittliche jährliche Strahlendosen	85
Abbildung 4.10: Histogramm individueller kumulativer Blockstunden.....	86
Abbildung 4.11: Histogramm individueller kumulativer Strahlendosen.....	87
Abbildung 4.12: Vergleich der Flugstunden von Langstrecken-PilotInnen mit jenen der anderen PilotInnen	91
Abbildung 4.13: Vergleich der jährlichen Strahlendosis von Langstrecken- PilotInnen (A340, B747, B767) mit derjenigen der anderen PilotInnen.....	93
Abbildung 4.14: Korrelation zwischen Beschäftigungsdauer, Gesamtflugstunden und mit der JEM-Methode berechneter Gesamtstrahlendosis	96
Abbildung 4.15: Korrelation zwischen jährlichen Flugstunden und mit der JEM- Methode bzw. anhand der Logbuch-Daten berechneten jährlichen Strahlendosis.....	97
Abbildung 4.16: Abweichung der Flugbahn des Fluges Frankfurt -> New York vom geographischen Großkreis (Quelle: [70])	100
Abbildung 4.17: Schwankung des heliozentrischen Potentials im Januar 1999 (Quelle: [70])	101
Abbildung 4.18: Schwankungsbreite des heliozentrischen Potentials in den Jahren 1965 bis 2000 (Quelle: [70])	101
Abbildung 4.19: Verteilung des Flughöhenprofils von 534 MOZAIC-Flügen auf der Route Frankfurt → New York.....	102
Abbildung 4.20: Streuung der Strahlendosis auf der Route Frankfurt → New York mit dem heliozentrischen Potential (Quelle: [70])	103
Abbildung 4.21: Verteilung der Differenzen von Strahlendosisraten, die aus zwei aufeinander folgenden Flugplänen berechnet wurden	105
Abbildung 4.22: Streuung individueller Strahlendosisraten.....	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Geschätzte Anzahl Personen in der gesamteuropäischen Kohortenstudie	6
Tabelle 2.2: Mögliche Risikofaktoren für das fliegende Personal.....	8
Tabelle 2.3: Ergebnisse von PMR-Studien über Piloten	9
Tabelle 2.4: Ergebnisse von SMR-Studien über Piloten	10
Tabelle 2.5: Ergebnisse von SIR-Studien über Piloten und Kabinenpersonal	12
Tabelle 2.6: Ergebnisse einer Fall-Kontroll-Studie	14
Tabelle 2.7: Durchschnittliche effektive Jahresdosis eines Erwachsenen in den Vereinigten Staaten bzw. der Bundesrepublik Deutschland (Quellen: [41], [190])	18
Tabelle 2.8: Berufliche Strahlenbelastung (Quelle: [248]).....	22
Tabelle 2.9: Obere Grenzen der geschätzten kumulativen Dosis von Beschäftigten in der Nuklearindustrie aus der Exposition gegenüber Neutronen in Großbritannien, 1946-88 (Quelle: [37])	22
Tabelle 2.10: Die wichtigsten Bevölkerungsgruppen, die hohen Dosen von Röntgen- und γ -Strahlen exponiert waren (Quelle: [112]).....	24
Tabelle 2.11: Schätzungen der Strahlenexposition des fliegenden Personals	32
Tabelle 2.12: Effekte hoher Strahlendosen (Quelle: [248]).....	35
Tabelle 2.13: Wichtigste Berufskohortenstudien	37
Tabelle 3.1: Vorwiegender Einsatz der wichtigsten Flugzeugtypen.....	52
Tabelle 4.1: Beschäftigungsdauer (Jahre).....	74
Tabelle 4.2: Expositionsdaten des 1962 eingestellten Piloten mit Studien-Nr. 113110.....	75
Tabelle 4.3: PilotInnen mit und ohne Angaben zu Flugstunden.....	76
Tabelle 4.4: Vergleich der Ausscheider mit und ohne Angaben zu Flugstunden.....	77
Tabelle 4.5: PilotInnen mit aggregierten Flugstunden.....	78
Tabelle 4.6: PilotInnen mit einer kritischen Anzahl fehlender Werte	78
Tabelle 4.7: Anzahl ausgewerteter Datenwerte	81
Tabelle 4.8: Anzahl in der Flugplan-Datenbank enthaltener Flüge	82
Tabelle 4.9: Verteilung der ausgewerteten Flugstunden auf Kategorien von Flugzeugen	83
Tabelle 4.10: Entwicklung der Flugstunden in der untersuchten Zeitspanne	84
Tabelle 4.11: Entwicklung der Strahlendosis in der untersuchten Zeitspanne	85

Tabelle 4.12: Individuelle kumulative Blockstunden (h).....	86
Tabelle 4.13: Individuelle kumulative Strahlendosen (mSv).....	87
Tabelle 4.14: In den Validierungsdaten verwendete Flugzeugtypen	88
Tabelle 4.15: Anzahl PilotInnen im Lufthansa-Konzern Juli 1997 bis Juni 1998.....	89
Tabelle 4.16: Verteilung der jährlichen Blockstunden und Anzahl Flüge von 3972 PilotInnen im Zeitraum Juli 1997 bis Juni 1998.....	90
Tabelle 4.17: Verteilung der geschätzten jährlichen Strahlendosis (mSv) und Strahlendosisrate ($\mu\text{Sv/h}$) aus den Logbuchdaten von 3972 PilotInnen im Zeitraum Juli 1997 bis Juni 1998.....	92
Tabelle 4.18: Ergebnisse einer Varianzanalyse zum Einfluß von „Flugstunden“ und „Flugzeugtyp“ (hier kodiert als Langstrecke bzw. Kurz- oder Mittelstrecke) auf die jährliche Strahlendosis	94
Tabelle 4.19: Verfügbarkeit unterschiedlicher Studiendaten.....	95
Tabelle 4.20: Verteilung der Expositionsmaße der Karrieren	95
Tabelle 4.21: Korrelation zwischen Strahlendosen, die mit der JEM-Methode bzw. anhand der Logbuch-Daten berechnet wurden	98
Tabelle 4.22: Vergleich der mit dem tatsächlichen und dem Standard- Flughöhenprofil berechneten Strahlendosisrate ($\mu\text{Sv/h}$) für 534 MOZAIC-Flüge auf der Route Frankfurt \rightarrow New York.....	103
Tabelle 4.23: Verteilung der Differenzen von Strahlendosisraten, die aus zwei aufeinander folgenden Flugplänen berechnet wurden	104
Tabelle 4.24: Vergleich von Strahlendosisraten ($\mu\text{Sv/h}$) in dieser (DE) und in einer norwegischen Studie (NO) (Quelle der norwegischen Daten: [246]).....	105
Tabelle 4.25: Streuung der individuellen Strahlendosisrate	107
Tabelle 4.26: Ergebnis der Simulationsstudie: Beobachtetes Odds Ratio als Funktion von echtem Odds Ratio und dem Variationskoeffizienten der Dosisrate	110
Tabelle 4.27: Ergebnisse der Simulation für die Lufthansa-Studie (für $\beta^* = \text{Log}(4,67) = 1,54$).....	111

1 Einleitung

1.1 Wissenschaftlicher Rahmen dieser Dissertation

Der bisherige Erkenntnisstand über die Gesundheitseffekte ionisierender Strahlung auf den Menschen basiert hauptsächlich auf den Untersuchungen der Atombombenopfer von Hiroshima und Nagasaki [41;248] und strahlentherapeutisch behandelter Patienten, also im Hochdosisbereich.

Die daraus gewonnenen Erkenntnisse über die Wirksamkeit verschiedener Strahlenarten und Strahlenintensitäten [113] erlauben eine vorsichtige Extrapolation in den Niedrigdosisbereich, also vom Bereich kurzer, starker Strahlenexpositionen in den Bereich lang andauernder, schwacher Strahlenexposition. Genau dieser Bereich ist für die öffentliche Gesundheit relevant, denn er betrifft Personen, die in Radonbelasteten Häusern wohnen und beruflich exponierte Personen, wie z.B. Kernkraftwerksarbeiter oder das Flugpersonal. Mittlerweile liegen erste Arbeiten für diese Berufsgruppen vor [35;230], sowie für Arbeiter im Uranbergbau [149], für Personen, die in Radonbelasteten Häusern leben [147] und für medizinisch exponierte Personen [7;229].

Wie das Flugpersonal sind auch große Teile der Bevölkerung für das Thema „Strahlung“ sensibilisiert. Forschung über potentielle gesundheitliche Risiken verschiedener Strahlenarten ist daher sowohl von wissenschaftlichem als auch von öffentlichem Interesse.

Bisher ist allerdings wenig über mögliche gesundheitliche Auswirkungen ionisierender Strahlung kosmischer Herkunft („*kosmische Strahlung*“) bei Angestellten im Flugdienst, Vielfliegern oder dem ungeborenen Leben bekannt. Da sowohl die Zusammensetzung (α -, β -, γ - oder Neutronenstrahlung) als auch die Intensität der Strahlung, der das Flugpersonal ausgesetzt ist, von derjenigen anderer untersuchter Personengruppen differieren, lassen sich diese Ergebnisse nur bedingt auf das fliegende Personal übertragen. Das Besondere an der hier untersuchten Berufsgruppe ist der hohe Anteil der Strahlendosis, der auf schnelle Neutronen zurückzuführen ist.

Eine der Hauptschwierigkeiten strahlenepidemiologischer Studien ist die Schätzung der individuellen Strahlendosis. Diese Problematik betrifft Studien über nicht homogene Gruppen wie z.B. die Atombombenopfer [41;181] wesentlich stärker als Studien über Berufsgruppen wie Kernkraftwerksarbeiter oder fliegendes Personal.

Wegen der besonderen Zusammensetzung der kosmischen Strahlung läßt sich die individuelle Strahlendosis beim fliegendem Personal – im Gegensatz zu Radiologen oder Kernkraftwerksarbeitern – nicht mit gängigen persönlichen Dosimetern messen [230]. Verfügbare Meßinstrumente sind zu kostspielig für den Einsatz in epidemiologischen Studien, so daß (bis vor kurzem) in Studien über fliegendes Personal keine Expositionserfassung durchgeführt worden ist. Die Erkenntnisse der physikalischen Forschung über die

Art und Intensität der in typischen Flughöhen bestehenden Strahlung haben sich in den letzten Jahren verbessert: Zahlreiche Messungen [145;214] bestätigen die allgemein akzeptierten Modelle [18], und frei verfügbare Programme [76] erlauben bereits die Berechnung der Strahlenbelastung eines Flugzeuginsassen. Erst diese Programme ermöglichen die Schätzung einer individuellen Strahlenbelastung in epidemiologischen Studien.

Ionisierende Strahlung kosmischer Herkunft ist in der Zivilluftfahrt in den Blickpunkt gerückt, seit die Flughöhen durch den Einsatz von Düsenmaschinen gestiegen sind. In den letzten Jahren erkannte die „International Commission for Radiological Protection“ [113], daß Fluglinien-PilotInnen und andere Personen, die in Düsenflugzeugen arbeiten, einer nicht zu vernachlässigenden, berufsbedingten Strahlenexposition ausgesetzt sind. Seit 1996 existieren entsprechende europäische Richtlinien [67], die in Kürze auch in die Deutsche Strahlenschutzverordnung eingearbeitet werden.

Bisherige epidemiologische Studien über fliegendes Personal wurden in einem Übersichtsartikel dargestellt [25]. Diese Studien haben insgesamt zu uneinheitlichen Ergebnissen geführt. Sie haben keine oder eine nur unzureichende Expositionsbestimmung. Nur in einer Fall-Kontroll-Studie zum Hirntumorrisiko unter Angehörigen der US Air Force wurde eine detaillierte Job-Expositionsmatrix entwickelt und angewendet [85]. Für alle anderen Studien galt allein die entsprechende Beschäftigung im Flugdienst als Expositionsmerkmal. Insbesondere für die Untersuchung einer Dosis-Wirkungsbeziehung ist die Bestimmung der individuellen Strahlendosis aber zwingend notwendig.

1.2 Spezifische Fragestellung dieser Dissertation

Diese Arbeit befaßt sich mit der Schätzung der Belastung von PilotInnen und Kabinenpersonal durch kosmische Strahlung im Rahmen einer berufsepidemiologischen Kohortenstudie über das fliegende Personal der Deutschen Lufthansa AG (im Folgenden „Lufthansa-Studie“). Die Kohorte umfaßt alle Angestellten im Flugbetrieb, die zwischen 1960 und 1997 mindestens ein halbes Jahr bei der LH beschäftigt waren, ca. 20.000 Beschäftigte beim Kabinenpersonal und ca. 6000 bei der Cockpitbesatzung (PilotInnen und Flugingenieure). Für die erste Teilkohorte existieren (außer der Beschäftigungsdauer) keine Unterlagen, die zur Expositionsschätzung verwendet werden können, während die Datenlage für die zweite Teilkohorte deutlich besser ist.

Die Schätzung der individuellen Strahlendosis bei einer großen Kohorte wird erst durch den Einsatz einer Job-Expositionsmatrix (JEM) praktikabel. In einer JEM (siehe Abschnitt 3.5.1.3 „Methoden der Expositionserfassung: Job-Expositions-Matrizen,“) werden verschiedene Tätigkeitsbereiche definiert, für die dann für die verschiedenen Kalenderjahre summarisch die unterschiedlichen beruflichen Belastungsfaktoren ermittelt werden. Die Berufsbiographie der untersuchten Personen wird aus Personalakten erfaßt und mit Hilfe der JEM wird anhand der Daten eine Schätzung der individuellen Exposition

vorgenommen. Damit kann eine individuelle quantitative Expositionsmessung in großen Studien vergleichsweise schnell und kostengünstig durchgeführt werden.

Neben den Ergebnissen der Schätzung ist man auch an der Qualität dieser Schätzung interessiert. Es gilt also, die Genauigkeit der Schätzung durch den Vergleich mit Referenzdaten zu quantifizieren.

Obwohl der Einsatz von JEM in den letzten Jahren in der Epidemiologie gestiegen ist, wurden bisher wenig methodische Arbeiten durchgeführt, in denen untersucht wurde, wie dieser Einsatz optimiert werden kann. Nicht untersucht wurde z.B. bisher, welchen Einfluß die – methodisch bedingten – Meßfehler in der JEM auf die Ergebnisse der Kohortenstudie haben, um mögliche Fehlschlüsse aufgrund des Schätzverfahrens auszuschließen. In der Lufthansa-Studie ermöglicht ein zweistufiges Studiendesign die Erfassung der Meßfehler und die Validierung der JEM.

Dementsprechend gliedert sich diese Arbeit in vier Teilaufgaben:

- 1) Die Erstellung einer JEM zur retrospektiven Expositionsschätzung für das Cockpitpersonal.
- 2) Die Untersuchung der Genauigkeit dieser JEM, also der möglicherweise entstehenden Schätzfehler gegenüber genaueren Methoden.
- 3) Die Analyse der Auswirkungen dieser Fehler auf die Risikoschätzer der epidemiologischen Studie anhand einer Simulationsstudie.
- 4) Der Vergleich der Ergebnisse der Expositionsschätzung anhand der JEM mit der Gesamtbeschäftigungsdauer, dem einzigen verfügbaren Surrogatmaß für die Strahlenbelastung des Kabinenpersonals.

Die in dieser Arbeit vorgestellte JEM für das fliegende Personal basiert auf realen Flugplänen, realistischen Flughöhen und tatsächlichen Flugstunden und ist damit wesentlich detaillierter und realitätsnäher als bisherige Schätzungen, die auf pessimistischen Annahmen beruhen.

Obwohl das Konzept der Job-Expositionsmatrix sehr einfach ist und es ausreichend Literatur über Meß- (oder Schätz-)fehler gibt, wurde die hier vorgestellte Anwendung nie direkt untersucht, so daß die Simulationsstudie interessante, neue Erkenntnisse bringt.

Der Vergleich des einfachsten aller Ersatzmaße für die Strahlenexposition, der Gesamtbeschäftigungsdauer, mit den genaueren Schätzungen aus der Anwendung der JEM ist praxisnahe und daher wichtig, da es für einige Kohorten das einzig vorhandene Maß war bzw. ist.

In Kapitel 2 „Hintergrund,“ wird die deutsche Kohortenstudie über das fliegende Personal vorgestellt und das bisherige Wissen über die Gesundheitsrisiken und Strahlenbelastung dieser Berufsgruppe zusammengefaßt, bevor auf die biologischen Wirkungsme-

chanismen ionisierender Strahlung und ihre Gesundheitseffekte beim Menschen eingegangen wird.

In Kapitel 3 „Planung und Durchführung der Expositionserfassung“, wird das Datenmaterial beschrieben, die behandelten Probleme werden geschildert und es wird auf die angewandten Methoden eingegangen. Ein eigener Abschnitt ist den statistischen Verfahren zur Untersuchung des Einflusses der – zum Teil methodisch bedingten – Fehler der Anwendung von JEM auf die Ergebnisse der Gesamtstudie gewidmet.

Kapitel 4 präsentiert die Ergebnisse der oben aufgeführten Teilaufgaben dieser Arbeit und ergänzt sie, sofern angebracht, um technische oder weitere Details.

Es folgen eine Diskussion dieser Arbeit und ein Ausblick in Kapitel 5.

2 Hintergrund

Im ersten Teil dieses Kapitels wird die laufende deutsche Kohortenstudie über Cockpit- und Kabinenpersonal vorgestellt und ein Überblick über die europäischen Schwesterstudien gegeben, die gemeinsam ausgewertet werden sollen. Anschließend werden die Ergebnisse früherer Studien zusammengefaßt und bisherige Schätzungen der Strahlenbelastung des fliegenden Personals vorgestellt. Im zweiten Teil des Kapitels werden Wirkungsmechanismen und Quellen ionisierender Strahlung vorgestellt, die Grundbegriffe erläutert und das aktuelle Wissen über ihre Gesundheitseffekte beim Menschen präsentiert. Schließlich werden die aktuellen europäischen Richtlinien kurz zusammengefaßt.

2.1 *Epidemiologische Studien über Cockpit- und Kabinenpersonal*

2.1.1 Die deutsche Kohortenstudie über fliegendes Personal

Die in Deutschland durchgeführte Kohortenstudie über fliegendes Personal umfaßt alle Personen, die im Zeitraum 1.1.1960 bis 31.12.1997 mindestens 6 Monate bei der Deutschen Lufthansa AG oder der LTU angestellt waren. Die Kohorte setzt sich aus ca. 7000 PilotInnen und Flugingenieuren sowie 22000 Mitgliedern des Kabinenpersonals zusammen.

Ziel der Studie ist die Untersuchung der Mortalität dieser Berufsgruppen. Von besonderem Interesse ist der Zusammenhang zwischen der Belastung mit ionisierender Strahlung kosmischen Ursprungs und der Krebsmortalität.

In einem ersten Schritt wird die Mortalität dieser Kohorte mit derjenigen der Allgemeinbevölkerung verglichen (ein „externer“ Vergleich). Die Beschränkung dieser Untersuchung besteht darin, daß noch keine Aussage über den Zusammenhang zwischen Strahlendosis und Mortalität gemacht werden kann. Darüber hinaus leidet der externe Vergleich an dem – unter dem Namen „*Healthy Worker Effect*“ bekannten – Problem, daß eine Gruppe berufstätiger Menschen „gesünder“ ist als die entsprechende „Allgemeinbevölkerung“. Gerade PilotInnen werden nicht zuletzt wegen ihrer guten körperlichen Verfassung eingestellt.

Erst durch eine Quantifizierung der individuellen Strahlenexposition wird es möglich, einen Zusammenhang zwischen Strahlendosis und Mortalität (eine sogenannte Dosis-Wirkungs-Beziehung) zu untersuchen. In einem zweiten Schritt werden dem entsprechend Gruppen mit niedriger, mittlerer und hoher Exposition miteinander verglichen (ein „interner“ Vergleich). Durch den internen Vergleich werden Unterschiede zur externen Vergleichsgruppe vermieden. Daher ist diese Methode besser geeignet, Unterschiede innerhalb der untersuchten Gruppe aufzudecken.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Gruppe der ca. 6000 PilotInnen und Flugingenieure der Lufthansa, da die Datenlage für diese Personen wesentlich besser ist (siehe Abschnitt 3.2 „Daten,,). Das Ziel ist eine möglichst genaue Schätzung der individuellen Strahlendosis und eine Beschreibung der Qualität dieser Schätzung.

2.1.2 Die europäische Studie über fliegendes Personal

Studien über die Cockpit- und Kabinenbesatzung werden zur Zeit in 9 weiteren europäischen Ländern durchgeführt (Tabelle 2.1). Dank der frühen Zusammenarbeit verwenden diese Studien weitestgehend das gleiche Protokoll, so daß ihre gemeinsame Auswertung als ESCAPE-Studie („European Study on Cancer Among flying PErsonnel“) stark vereinfacht wird. Diese Auswertung wird eine bedeutend größere statistische Macht haben als die Einzelstudien. Neben der Krebsmortalität untersuchen die nordischen Studien (Dänemark, Finnland, Island, Norwegen und Schweden = No-ESCAPE) Krebs-Neuerkrankungen.

Zu Beginn der Kooperation war nicht davon auszugehen, daß alle Studiengruppen die gleiche Qualität von Expositionsdaten liefern können. Die ersten Ergebnisse der deutschen Untersuchung zur Verwendung möglichst genauer Daten und die norwegischen und deutschen Beispiele zur Berechnung einer JEM konnten jedoch die anderen Partner überzeugen, so daß die Schätzung der individuellen Strahlendosis (für die Cockpitbesatzung) in der Gesamtstudie anhand von JEM gemacht wird.

Tabelle 2.1: Geschätzte Anzahl Personen in der gesamteuropäischen Kohortenstudie

Land	Unternehmen ¹	Beginn der Studienperiode	Cockpit	Kabine	Inzidenz	Mortalität
Dänemark	SAS	1946 (Cockpit) 1950 (Kabine)	3877	6000	x	x
Deutschland	Lufthansa	1960	5200	19794		x
Finnland	Finnair	1967	803	1764	x	x
Griechenland	Olympic	1965	998	2434		x
Großbritannien	British Airways	1950	6001	0		x
Island	Icelandair	1950	467	1000	x	x
Italien	Alitalia	1965	2212	6944		x
Niederlande ²	KLM	1960	1500	0		x
Norwegen	SAS	1946 (Cockpit) 1950 (Kabine)	3673	3560	x	x
Schweden	SAS	1960	1505	3039	x	x
Summe			26236	44535		

¹ wichtigstes Luftfahrtunternehmen der Studie

² Daten werden nicht in die erste Auswertung eingeschlossen

2.1.3 Potentielle Risikofaktoren beim fliegenden Personal

Neben ionisierender Strahlung tragen weitere Risikofaktoren möglicherweise zum Krebsrisiko des fliegenden Personals bei. Sie lassen sich in zwei Kategorien einordnen.

Zur ersten Gruppe zählen berufliche Expositionen wie Passivrauchen [43;97], elektromagnetische Felder [8], verschiedene chemische Karzinogene aus den Triebwerkabgasen [160], Ozon- [168] und Lärmbelastung sowie Störungen des zirkadianen Rhythmus durch Jet Lag [58;59;84;98;235], denen gegenüber das Personal gleichzeitig mit der Strahlenbelastung exponiert ist, und deren Einzelwirkung in epidemiologischen Studien nur schwer von derjenigen der ionisierenden Strahlung zu trennen ist.

Zur zweiten Gruppe werden durch den Lebensstil bedingte Faktoren gerechnet, die im Rahmen der Lufthansa-Studie nicht untersucht werden können. So ist z.B. bekannt, daß Menschen mit hohem sozialen Status, wie es PilotInnen sind, erhöhte Krebssterblichkeitsraten für gewisse Krebsarten haben. Mit der Berufswahl verbunden ist auch der Umstand, daß Stewardessen in einem späteren Lebensabschnitt als andere Frauen Kinder zur Welt bringen. Über andere Risikofaktoren läßt sich ohne fundierte Information nur mutmaßen.

Als gesichert darf hingegen gelten, daß Krebs an gewissen Lokalisationen durch die regelmäßigen medizinischen Untersuchungen früher entdeckt wird.

In der nachfolgenden Tabelle 2.2 sind mögliche Krebsrisikofaktoren und A-priori-Hypothesen für erhöhte Krebsinzidenz oder -mortalität aufgeführt:

Tabelle 2.2: Mögliche Risikofaktoren für das fliegende Personal

Risikofaktor	Erhöhtes Krebsrisiko erwartet für...
Ionisierende Strahlung	Leukämie (ohne chronische lymphatische), Brust, Schilddrüse, Haut (außer Melanome)
Berufliche Expositionen	
Passivrauchen	Lunge, Blase, andere rauch-assoziierte
Elektromagnetische Felder	Hirn, Leukämie
Jet lag	Hormon-assoziierte
Turbinenabgase	Lunge
Lebensstil und Sozialstatus	
Ernährung	
Sonnenbaden	Melanome, Haut
Hoher Sozialstatus	Brust, Dickdarm, Melanome, Nieren, Hoden, Prostata
Niedrige Parität	Brust, Corpus uteri, Eierstöcke
Tabak	Lunge, Blase
Alkohol	Luft- und Speisewege, Kehlkopf
Häufigere medizinische Untersuchungen	Schilddrüse, Prostata, Haut

2.1.4 Bisherige Studien zu fliegendem Personal

Eine aktuelle Übersicht der bisher durchgeführten Studien zum Cockpit- und Kabinenpersonal in der zivilen Luftfahrt wird in [28] gegeben. Es werden insgesamt zehn Studien rezensiert: zwei PMR-Studien (proportionale Mortalitätsraten) über Piloten [119;210], 3 SMR-Studien (standardisierte Mortalitätsraten) über Piloten [13;14;126] (Tabelle 2.4), 3 SIR-Studien (standardisierte Inzidenzraten) über Piloten [13;14;86] und 1 über Kabinenpersonal [191] (Tabelle 2.5) und schließlich eine Fall-Kontroll-Studie über Militär-Piloten [85] (Tabelle 2.6). Die drei jüngsten, in [28] noch nicht enthaltenen SIR-Studien [89;91;192] wurden in Tabelle 2.5 aufgenommen, sowie eine neue PMR-Studie [174] in Tabelle 2.3.

Tabelle 2.3: Ergebnisse von PMR-Studien über Piloten

ErstautorIn	Salisbury [210]			Irvine [119]			Nicholas [174]		
Jahr der Veröffentlichung	1991			1992			1998		
Studienpopulation	Männliche Piloten in British Columbia, Kanada			Männliche Piloten von British Airways			Piloten aus 24 US-Bundesstaaten		
Periode	1950 – 1985			1966 - 12/1989			1984-1991		
Anzahl Personen	nicht veröffentlicht			nicht veröffentlicht			nicht veröffentlicht		
Personenjahre	nicht veröffentlicht			nicht veröffentlicht			nicht veröffentlicht		
Todesfälle / Krebs	341 / 51			441 / 138			1538 / 407		
Ergebnisse	n	PMR	95% KI	n	PMR	95% KI	n	PMR	95% KI
Alle Ursachen		-			-			-	
Flugzeugunfälle	233	31,94	28,09-36,32	36	114,67	80,19-158,82		-	
Alle Krebsfälle	51	0,89	0,67-1,1	138	1,31	1,1-1,55	407	1,05	0,95-1,16
Enddarm-Krebs	1	0,45	0,1-2,49	3	0,66	0,14-1,92		-	
Hirntumore	4	1,00	0,27-2,55	9	2,68	1,23-5,08	19	1,49	0,90-2,33
Lungenkrebs	16	1,16	0,66-1,9	44	1,10	0,8-1,47	133	0,89	0,75-1,06
Leukämie		-		4 ^a	2,34	0,64-5,98	16	1,08	0,62-1,76
Prostata-Karzinom		-		10	2,12	1,02-3,89	38	1,38	0,98-1,89
Melanome	3	2,08	0,42-6,08	6	6,68	2,45-14,55	11	1,28	0,64-2,29

n = Anzahl Fälle; PMR = Proportionale Mortalitätsrate; KI = Konfidenzintervall

^a myeloische Leukämie

Tabelle 2.4: Ergebnisse von SMR-Studien über Piloten

ErstautorIn	Band [13]			Kaji [126]			Band [14]		
Jahr der Veröffentlichung	1990			1993			1996		
Studientyp	Kohorten-Studie			Kohorten-Studie			Kohorten-Studie		
Studienpopulation	Männliche Piloten, CP Air (Kanada)			männliche Piloten, Japan Airlines			Männliche Piloten, Air Canada		
Periode	01/1950 - 10/1988			08/1952 - 12/1988			1950 - 1992		
Anzahl Personen	913			2327			2740		
Personenjahre	18.000			32.116			nicht veröffentlicht		
Todesfälle / davon Krebs	71 / 16			59 / 20			219 / 56		
Ergebnisse	n	SMR	95% KI	n	SMR	95% KI	n	SMR	95% KI
Alle Ursachen	71	0,80	0,63 - 1,01	59	0,66	0,50 - 0,85	219	0,63	0,55 - 0,72
Flugzeugunfälle	23	21,3	13,63 - 32,0	26	-		31	26,6	18,2 - 37,8
Alle Krebsfälle	16	-		20	0,87	0,54 - 1,34	56	0,61	0,46 - 0,79
Enddarm-Krebs	3	4,35	1,12 - 12,71	2	-			-	
Hirntumore	4	4,17	1,31 - 10,68		-		5	1,42	0,51 - 3,31
Lungenkrebs	3	0,52	0,13 - 1,52		-		8	0,25	0,11 - 0,49
Alle Leukämien	1	-			-		3	0,86	0,22 - 2,51
Prostata-Karzinom	1	-			-		7	1,52	0,65 - 3,31
Melanome	0	-			-		2	1,49	0,27 - 5,38

n = Anzahl Fälle; SMR = Standardisierte Mortalitätsrate; KI = Konfidenzintervall

Tabelle 2.4 (Fortsetzung)

ErstautorIn	Irvine et al. [120]			Irvine et al. [120]		
Studientyp	Kohorten-Studie			Kohorten-Studie		
Studienpopulation	Männliche Piloten, British Airways			Männliche Flugingenieure, British Airways		
Periode	1950 - 1992			1950 - 1992		
Personen	6209			1153		
Personenjahre	143.506			29.094		
Todesfälle / davon Krebs	592 / 180			127 / 47		
Ergebnisse	n	SMR	95% KI	n	SMR	95% KI
Alle Ursachen	592	0,61	0,56 - 0,66	127	0,56	0,47 - 0,66
Flugzeugunfälle	59	146,9	111,8-189,5	4	50,7	13,8 - 129,8
Alle Krebsfälle	180	0,64	0,55 - 0,74	47	0,71	0,53 - 0,95
Enddarm-Krebs	8	0,66	0,28 - 1,29	3	1,04	0,22 - 3,05
Hirntumore	12	1,28	0,66 - 2,23	3	1,42	0,29 - 4,16
Lungenkrebs	43	0,42	0,30 - 0,59	20	0,82	0,50 - 1,26
Alle Leukämien				2	1,14	0,14 - 4,12
Prostata-Karzinom	15	1,11	0,62 - 1,84	3	0,92	0,19 - 2,69
Melanome	9	3,33	1,52 - 6,32		-	
Hautkrebs außer Melanome		-			-	
Hodenkrebs		-			-	
Blasenkrebs	2	0,22	0,03 - 0,78		-	
Hodgkin-Krankheit	4	1,39	0,38 - 3,57		-	
Knochen und Lymphatische Organe	18	0,84	0,50 - 1,32		-	

Tabelle 2.5: Ergebnisse von SIR-Studien über Piloten und Kabinenpersonal

ErstautorIn	Band et al. [14]			Band et al. [13]			Grayson et al. [86]			Pukkala et al. [191]		
Studientyp	Kohorten-Studie			Kohorten-Studie			Kohorten-Studie			Record Linkage Studie		
Studienpopulation	männliche Piloten, CP Air (Kanada)			männliche Piloten, Air Canada			männliches Personal der U.S. Air Force			FlugbegleiterInnen, Finnair		
Periode	01/1950 - 10/1988			1950 - 1992			1975 - 1989			1967-1992		
Personen	913			2740			59.940 ^a - 167.263 ^b			1577 Frauen; 187 Männer		
Personenjahre	18.000			62.000			1,6 Mill			22000 Frauen; 2500 Männer		
Krebsfälle	57			125			342 ^a / 827 ^b			35 Frauen, 2 Männer		
Ergebnisse	n	SIR	95% KI	n	SIR	95% KI	n	SIR	95% KI	n	SIR	95% KI
Alle Krebsfälle	57	-		125	0,71	0,59 - 0,85	342	1,19	1,07 - 1,32	35	1,23	0,86 - 1,71
Enddarm-Krebs	4	1,94	0,61 - 4,97	4	0,42	0,13 - 1,08	20 ^c	1,34	0,83 - 2,07	2	1,32	0,16 - 4,75
Hirntumore	4	3,45	1,09 - 8,83	7	1,53	0,65 - 3,15	13	0,71	0,39 - 2,07		-	
Lungenkrebs	3	0,41	0,11 - 1,20	11	0,28	0,14 - 0,50	16	0,81	0,47 - 1,32	1	1,61	0,04 - 8,95
Alle Leukämien	2	-		9	1,65	0,79 - 3,13	13	0,89	0,49 - 1,52	2	3,57	0,43 - 12,9
Prostata-Karzinom	3	3,9	1,01 - 11,40	34	1,87	1,30 - 2,61		-				
Melanome	3	1,5	0,39 - 4,47	8	1,52	0,69 - 3,0	49	1,50	1,11 - 1,98	3	2,11	0,43 - 6,15
Hautkrebs außer Melanome	26	1,5	1,05 - 2,33		-		36	1,45	1,02 - 2,01		-	
Hodenkrebs	2	1,7	0,32 - 6,32	2	0,63	0,12 - 2,28	59	1,04	0,79 - 1,34		-	
Blasenkrebs		-		4	0,36	0,11 - 0,92	19	2,09	1,28 - 3,26		-	
Hodgkin-Krankheit	3	4,54	1,17 - 13,27		-		14	0,51	0,29 - 0,86		-	
Knochenkrebs		-			-					2	15,1	1,82 - 54,4
Brustkrebs		-			-					20	1,87	1,15 - 2,23

n = Anzahl Fälle; SIR = Standardisierte Inzidenzrate; KI = Konfidenzintervall

^a fliegendes Personal; ^b andere Offiziere; ^c beinhaltet Colon-Karzinome

Tabelle 2.5 (Fortsetzung)

ErstautorIn	Gundestrup [89]			Rafnsson [192]			Haldorsen [91]		
Jahr	1999			2000			2000		
Studientyp	Kohorten-Studie			Kohorten-Studie			Kohorten-Studie		
Studienpopulation	PilotInnen, Dänemark			männliche Piloten, Island (diese Tabelle: Iceland Air)			männliche Piloten, Norwegen		
Periode	1946-1999			1955-1997			1946-1994		
Personen	87 Frauen / 3790 Männer			265			3701		
Personenjahre	661 / 61095			nicht veröffentlicht			70560		
Krebsfälle	0 / 169			19			200		
Ergebnisse	n	SIR	95% KI	n	SIR	95% KI	n	SIR	95% KI
Alle Krebsfälle	169	1,1	0,94 - 1,28	19	1,16	0,70 - 1,81	200	1,06	0,92 - 1,22
Enddarm-Krebs	3	0,5	0,09 - 1,32	0	0,0		9	0,9	0,4 - 1,7
Hirntumore	5	0,7	0,23 - 1,63		-		9	1,1	0,5 - 2,1
Lungenkrebs		-		2	0,89	0,10 - 3,22	25	1,0	0,6 - 1,5
Alle Leukämien	7	1,6	0,65 - 3,36	1	2,50	0,03 - 13,91	2	0,5	0,1 - 1,7
Prostata-Karzinom	6	0,8	0,29 - 1,73	4	1,41	0,38 - 3,61		-	
Melanome	14	2,4	1,30 - 3,98	5	15,63	5,04 - 36,46	22	1,8	1,1 - 2,7
Hautkrebs außer Melanome	53	2,3	1,69 - 2,96		-		14	2,4	1,3 - 4,0
Hodenkrebs		-			-			-	
Blasenkrebs		-			-		11	0,8	0,4 - 1,5
Hodgkin-Krankheit	2	0,9	0,10 - 3,21		-		3	1,4	0,3 - 4,1
Knochenkrebs		-			-		0	0,0	
Brustkrebs		-			-			-	

n = Anzahl Fälle; SIR = Standardisierte Inzidenzrate; KI = Konfidenzintervall

Tabelle 2.6: Ergebnisse einer Fall-Kontroll-Studie

Erstautor	Grayson [85]	
Studientyp	Eingebettete Fall-Kontroll-Studie	
Untersuchte Krankheit	Hirntumore	
Studienpopulation	Männliches Personal der US Air Force	
Periode	1970-1989	
Fälle	230	
Kontrollen	920	
Matching	4 Kontrollen pro Fall, nach Alter und Rasse	
Expositionserfassung	Job-Expositions-Matrix, Dosimetrie	
Ergebnisse	Odds Ratio	95% KI
	(exponiert / nicht-exponiert)	
ELF elektromagnetische Felder	1,28	0,95 - 1,74
RF/MW elektromagnetische Felder	1,39	1,01 - 1,90
Ionisierende Strahlung	0,58	0,22 - 1,52
Sozioökonomischer Status	3,30	1,99 - 5,45
	(höhere Offiziere gegenüber allen anderen)	

KI = Konfidenzintervall; ELF = extrem niedrigfrequente Frequenzen; RF = Radio-Frequenzen; MW = Mikrowellen

2.2 Ionisierende Strahlung

2.2.1 Wirkungsmechanismen ionisierender Strahlung

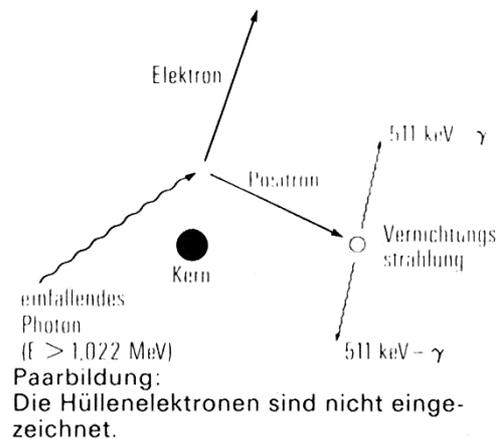
Unter *ionisierender Strahlung* versteht man Korpuskularstrahlung und elektromagnetische Wellenstrahlung, die so energiereich ist, daß sie beim Durchgang durch Materie einzelnen Atomen Elektronen entreißen oder hinzufügen kann, und somit eine Ionisierung der Moleküle stattfindet. In den betroffenen Zellen des menschlichen Körpers kann es zu chemischen Reaktionen kommen. Auf diese Weise verursacht ionisierende Strahlung Mutationen in der Zell-DNS, die eine Deregulierung des normalen Lebenszyklus der Zelle zur Folge haben können, wenn zellwachstumsregulierende Gene nicht ausreichend oder zu stark exprimiert werden. Eine hohe Dosis ionisierender Strahlung kann zum Zelltod führen.

Die bekanntesten Formen ionisierender Strahlung sind Photonen (Gamma- und Röntgenstrahlen) und geladene oder neutrale Partikel (Elektronen, Protonen, Neutronen). *Alpha-Strahlung* besteht aus Kernen von Helium-Atomen, *Beta-Strahlung* aus Elektronen. Bei der photonischen Strahlung unterscheidet man aus historischen Gründen zwischen *Gamma-Strahlung*, die vom angeregten Zellkern abgestrahlt wird, und *Röntgenstrahlung*, die abgestrahlt wird, wenn ein angeregtes Elektron in seine normale Position zurückkehrt.

Die Intensität ionisierender Strahlung drückt sich durch die Anzahl Desintegrationen pro Zeiteinheit aus. Sie wird in *Becquerel* gemessen (1Bq = 1 Desintegration pro Sekunde). Wenn ionisierende Strahlung auf Materie trifft, gibt sie Energie an diese ab. Die absorbierte Strahlendosis wird in Gray gemessen (1Gy = 1 Joule pro Kilogramm).

Direkt ionisierende Strahlung besteht aus geladenen Partikeln (α , β , etc.), die aufgrund ihrer Ladung beim Durchgang durch die Materie mit den Atomen entlang ihrer Bahn in direkte Wechselwirkung treten und dabei Energie abgeben. *Indirekt ionisierende Strahlung* dagegen besteht aus Photonen bzw. ungeladenen Partikeln (γ -Strahlung, Röntgenstrahlung, Neutronen), die nicht direkt mit den Atomen in Wechselwirkung treten, sondern indirekt über die Bildung von Sekundärteilchen (siehe folgende Abbildung 2.1).

Abbildung 2.1: Indirekt ionisierende Strahlung (Quelle: [190])



Locker ionisierende Strahlung (β -Strahlung, γ -Strahlung, Röntgenstrahlung) unterscheidet sich von *dicht ionisierender Strahlung* (α -Strahlung, Neutronen), durch den größeren räumlichen Abstand der Ionisierungsvorgänge. Diese unterschiedliche Ionisationsdichte ist an eine unterschiedliche biologische Wirksamkeit verknüpft. Sie hängt mit dem *linearen Energieübertragungsvermögen* (engl. „linear energy transfer“, LET) der Strahlenart zusammen, das in $\text{MeV}/\mu\text{m}$ gemessen wird. Typische Werte sind z.B. $0,25 \text{ keV}/\mu\text{m}$ für Elektronen, die mit γ -Strahlung aus einer Kobalt-60-Quelle (typischerweise $1,25 \text{ MeV}$) angeregt wurden gegenüber dem tausendfach höheren Wert von $250 \text{ keV}/\mu\text{m}$ für α -Partikel mit 2 MeV [41]. Locker ionisierende Strahlung wirkt zu $2/3$ auf dem indirekten Weg. Mit zunehmendem linearen Energieübertragungsvermögen verschiebt sich dieses Verhältnis zugunsten des direkten Weges.

Die durch eindringende Strahlung entstehenden Schäden werden vom Organismus unterschiedlich gut repariert. So geht man davon aus, daß die Schäden locker ionisierender Strahlung (engl. Low-LET) leichter behoben werden, als es bei dicht ionisierender Strahlung (engl. High-LET) der Fall ist.

Die biologische Wirksamkeit ionisierender Strahlung hängt zusätzlich von der Art des bestrahlten Gewebes und modifizierenden Faktoren, wie der zeitlichen Verteilung einer Bestrahlung ab. Folgende Begriffe für die Strahlendosis müssen also unterschieden werden (siehe [67]):

Die *Energiedosis* D ist die pro Masseneinheit absorbierte Energie und wird in Gray ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule}/\text{kg}$) gemessen.

Die *Äquivalentdosis* H_T ist die Energiedosis im Gewebe oder Organ T , gewichtet nach Art und Qualität der Strahlung R , wobei dicht ionisierende Strahlung stärker gewichtet wird. Sie ist die Summe aller (entsprechend gewichteten) Arten und Energien des Strahlungsfeldes. Die entsprechende Maßeinheit ist Sievert ($1 \text{ Sv} = 1 \text{ J}/\text{kg}$).

Die *effektive Dosis E* (auch *effektive Äquivalentdosis*) ist die Summe der gewichteten Äquivalentdosen in allen Organen und Geweben des Körpers aus interner Strahlenexposition. Die verwendeten Gewichte sind gewebe- bzw. organspezifisch. Die effektive Dosis wird wie die Äquivalentdosis in Sievert angegeben.

Da die effektive Dosis nicht direkt meßbar ist, wird im Rahmen der Strahlenschutzkontrolle bei äußerer Strahlenexposition die *Personendosis* (z.B. mit einem Dosimeter) gemessen. Statt dessen kann auch die *Ortsdosis* gemessen werden, wenn die Strahlenfelder homogen sind bzw. die zu überwachende Person ihren Aufenthaltsraum nur wenig ändert, wie es in einem Flugzeug der Fall ist.

Von *deterministischen Effekten* ionisierender Strahlung spricht man bei hohen Dosen, die den unmittelbaren Zelltod nach sich ziehen. Im Gegensatz dazu spricht man von *nichtdeterministischen Effekten*, wenn die Zelle zwar überlebt, aber Schäden in der Zell-DNA verursacht werden, die nicht repariert werden können, was zur Weitergabe fehlerhafter Erbinformation bei späteren Zellteilungen führt. Krebs entsteht durch die verstärkte Exprimierung eines das Zellwachstum fördernden Gens oder die verminderte Exprimierung eines Tumorsuppressorgens.

Die Wirkung ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper wird in Abschnitt 2.2.5 „Gesundheitseffekte ionisierender Strahlung“, beschrieben, in Anlehnung an die hier genannten Unterscheidungskriterien: zunächst deterministische Effekte (hohe Dosen), dann nichtdeterministische Effekte, unterteilt nach hohem und niedrigem linearen Energieübertragungsvermögen.

2.2.2 Quellen ionisierender Strahlung

Ionisierende Strahlung entstammt natürlichen und künstlichen Quellen. Ihre Wirkung hängt nicht von ihrer Herkunft ab, sondern vielmehr von ihrer Zusammensetzung, denn sie kommt in einer Vielzahl verschiedener Formen, Energien und Intensitäten vor.

Zu den natürlichen Quellen werden kosmische Strahlen, Gammastrahlen von Radionukliden in der Erdkruste und Alphastrahlung von Radongas, einem Zerfallsprodukt von Radium, gezählt.

Umweltbelastungen aus künstlichen Quellen kommen von Atombombenabwürfen, Bombentests über und unter Tage, der Atombombenherstellung, der nuklearen Energieproduktion und nuklearen Unfällen.

Zu den künstlichen Quellen gehören neben Expositionen aus medizinischen Anwendungen verschiedene berufliche Expositionen, auf die im Abschnitt 2.2.2.4 „Berufliche Expositionen“, näher eingegangen wird.

Die Exposition der Allgemeinbevölkerung gegenüber ionisierender Strahlung natürlicher Herkunft und aus zivilisatorischen Quellen wird mit 3,5 mSv pro Jahr geschätzt,

wovon ca. 2,2 mSv auf natürliche Strahlung [248] und in Deutschland ca. 1,6 mSv auf zivilisatorische Quellen (hauptsächlich Röntgenbestrahlung) [41] [247] entfallen.

Für die zulässige Belastung der zivilen Bevölkerung mit ionisierender Strahlung, die weder auf natürliche Hintergrundstrahlung noch auf medizinische Untersuchungen oder Behandlungen zurückzuführen ist, gilt der durch EU-Richtlinien festgelegte Grenzwert von max. 1mSv/Jahr im 5-Jahres-Mittel [67]. Der Grenzwert für berufliche Exposition ist um ein Vielfaches höher: 20mSv/Jahr im 5-Jahres-Mittel.

2.2.2.1 Strahlenbelastung aus natürlichen Quellen

Insgesamt summiert sich die durchschnittliche jährliche Strahlenbelastung eines Menschen auf 2,2 mSv, davon ca. 0,9 mSv durch externe kosmische Strahlung (0,4 mSv) und terrestrische Gammastrahlung (0,5 mSv), ca. 1 mSv durch das Einatmen von Radon und weitere 0,3 mSv durch weitere interne Strahlung.

Tabelle 2.7: Durchschnittliche effektive Jahresdosis eines Erwachsenen in den Vereinigten Staaten bzw. der Bundesrepublik Deutschland (Quellen: [41], [190])

Quelle der Strahlenexposition	Effektive Jahresdosis			
	USA		BRD	
	MSv	%	mSv	%
Natürliche Strahlung				
Externe Strahlung				
kosmische Strahlung	0,27	8,0	0,3	8,4
terrestrische Strahlung	0,28	8,0	0,45	12,6
Interne Strahlung				
Radon und Zerfallsprod.	2,0	55	1,0	28,1
interne Strahlung	0,39	11	0,25	7,0
Teilsumme	3,0	82	2,0	56,2

Quelle der Strahlenexposition	Effektive Jahresdosis			
	USA		BRD	
	MSv	%	mSv	%
Künstliche Strahlung				
Medizin			1,5	42,1
Röntgenstrahlung	0,39	11		
Nuklearmedizin	0,14	4,0		
Waren für Endverbraucher	0,10	3,0		
Andere				
Berufliche	<0,01	<0,3	<0,01	<0,3
Kerntechnik	<0,01	<0,03	<0,01	<0,3
Kernwaffen-Fallout	<0,01	<0,03	0,02	0,6
Verschiedene	<0,01	<0,03	<0,02	<0,6
Teilsumme	0,63	18	1,56	43,8
Gesamtsumme	3,6	100	3,56	100

Kosmische Strahlung

Kosmische Strahlung stammt aus dem Weltall und von der Sonne. Sie besteht hauptsächlich aus Protonen, die durch Interaktion mit den Atomen der Erdatmosphäre eine Ionenkaskade auslösen. Ein großer Teil der kosmischen Strahlung wird durch die Erdatmosphäre abgeschirmt, so daß die mittlere jährliche Belastung eines Menschen auf Meereshöhe auf 0,4 mSv geschätzt wird. In höher gelegenen Regionen kann die jährliche Belastung 1 mSv betragen. Es wird geschätzt, daß kosmische Strahlung ca. 17% der Belastung aus natürlichen Quellen ausmacht.

Terrestrische Strahlung

Die Radionuklide Kalium-40, Uran-238 und Thorium-232 sind seit jeher in der Erdkruste vorhanden, so daß sie, zusammen mit ihren Zerfallsprodukten, in der Erde und in Baumaterialien anzutreffen sind. Sie tragen also zu Strahlenbelastung sowohl innerhalb als auch außerhalb von Gebäuden bei, wobei die Strahlung innerhalb von Gebäuden meistens 40-50% höher liegt als außerhalb.

Die Zerfallsprodukte von Uran-238, Radium-226, Blei-210 und Polonium-210 finden sich neben Kalium-40 in der Nahrung wieder. Die entstehende Strahlenbelastung für den menschlichen Körper wird auf 0,3 mSv jährlich, mit einer geographischen Schwankungsbreite von 0,2 bis 0,8 mSv geschätzt.

Radon-222 ist ein Edelgas aus der Zerfallsreihe von Radium-226. Es dringt aus dem Erdboden und den Baumaterialien in die Umgebungsluft. Seine Zerfallsprodukte werden eingeatmet und tragen so zu einer geschätzten Strahlenbelastung von jährlich 1mSv bei.

2.2.2.2 Umweltbelastungen aus künstlichen Quellen

Atombombentest über Tage

Die größte Menge radioaktiven Materials, die jemals vom Menschen in die Umwelt entlassen wurde, stammt aus 543 überirdischen Atombombenversuchen in der Periode 1952-1980, wobei die meisten Versuche im Zeitraum 1952-1962 stattfanden. Anhand der aktuellen Information über den Transport von Radioaktivität in der Atmosphäre wird geschätzt, daß die damalige mittlere jährliche Strahlendosis weltweit 0,15 mSv betrug, während sie jetzt bei 5 µSv liegt.

Gruppen von Individuen, die in der Nähe der Testgebiete (Nevada [82], Bikini-Atoll [199], Semipalatinsk [90;104] und Mururoa [53]) lebten, wurden eingehend untersucht.

Atombombentest unter Tage

Seit einem Abkommen aus dem Jahre 1963 über die Einstellung überirdischer Atombombenversuche sind weltweit 1876 unterirdische Versuche gemacht worden. Radioaktivität gelangt dabei nur sehr selten und in sehr kleinen Mengen in die Umwelt.

Herstellung von Nuklearwaffen

Beim Aufbau der ersten Anlagen zum Bau von Nuklearwaffen kam es zu unkontrollierten Abgaben von Radioaktivität in die Umwelt, z.B. von Iod-131 in die Atmosphäre nahe Hanford in den USA [81] und von verschiedenen Radionucliden in den Fluß Techa bei Chelyabinsk in der ehemaligen UDSSR [141].

Nukleare Energieproduktion

Als nuklearer Brennstoff wird in Kernkraftwerken meist Uran-235 verwendet. Umweltbelastungen entstehen hauptsächlich im Uranbergbau und in der Uranaufbereitung durch die Freisetzung von Radon aus Radium-226 und Thorium-230 während dieser Prozesse oder während der Lagerung auf Abraumhalden. Die Belastung der Allgemeinbevölkerung aus diesen Aktivitäten ist gering.

Nukleare Unfälle

Zwei schwere Unfälle ereigneten sich im Jahre 1957 in Anlagen zur Herstellung von Nuklearwaffen: Eine Explosion in einem Tank für radioaktives Material in Chelyabinsk und ein Feuer in Windscale bei Sellafield.

Bei dem Reaktorunfall von Three Mile Island, USA, im Jahre 1979 blieb das radioaktive Material weitgehend im Gebäude. Bei dem Reaktorunfall von Tschernobyl im Jahre 1986 wurden hingegen größere Mengen radioaktiven Materials freigesetzt.

2.2.2.3 Belastung durch medizinische Anwendungen

Der Einsatz ionisierender Strahlung in der medizinischen Diagnostik ist weit verbreitet. Röntgenstrahlen machen 90% der Strahlendosis aus, die Deutsche durchschnittlich pro Jahr bei medizinischen Untersuchungen erhalten. Diese Dosis wird auf 1 mSv pro Jahr geschätzt [248].

Zu therapeutischen Zwecken werden weit höhere Strahlendosen verabreicht, lokalisiert auf das behandelte Organ. Im Populationsdurchschnitt sind diese Dosen wesentlich geringer als diejenigen aus diagnostischen Anwendungen.

2.2.2.4 Berufliche Expositionen

In diesem Abschnitt soll ein Überblick darüber gegeben werden, welchen Strahlenarten und -dosen diese Personen exponiert sind. Die hier genannten Dosen beziehen sich auf viele verschiedene Studien, so daß sie wegen Ihrer großen Schwankungsbreite nur als erste, grobe Orientierung dienen. Den Gesundheitseffekten dieser Strahlung ist ein gesonderter Abschnitt gewidmet.

Beruflich exponierte Personen sind unterschiedlich gut überwacht worden. Ihre Anzahl und durchschnittliche jährliche Strahlendosis werden in Tabelle 2.8 zusammengefaßt. Die Gruppen der Beschäftigten in der Nuklearindustrie und die des Flugpersonals werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Tabelle 2.8: Berufliche Strahlenbelastung (Quelle: [248])

Quelle	Anzahl überwachter Personen	mittlere jährliche Dosis (mSv)
Verstärkte natürliche Quellen (Summe)	5.200.000	1,1
Bergbau (ohne Kohle)	700.000	6
Luftfahrt	250.000	3
Kohlebergbau	3.900.000	0,9
Andere	ca. 300.000	<1
Künstliche Quellen (Summe)	4.100.000	1,7
Nuklearindustrie	900.000	2,9
Industrielle Strahlennutzung	600.000	0,9
Militärische Aktivitäten	400.000	0,7
Medizinische Anwendung von Strahlung	2.200.000	0,5
Gesamtsumme	9.300.000	1,1

Beschäftigte in Kernkraftwerken und Wiederaufbereitungsanlagen

Diese gut überwachte Berufsgruppe ist hauptsächlich niedrigen Dosen von γ - und Neutronenstrahlung ausgesetzt, die über das Maß der natürlichen Hintergrundstrahlung hinaus geht, wobei der Anteil der Neutronenstrahlung schätzungsweise 3% der Gesamtexposition ausmacht. Diese Exposition zieht sich über lange Zeiträume hinweg.

Tabelle 2.9: Obere Grenzen der geschätzten kumulativen Dosis von Beschäftigten in der Nuklearindustrie aus der Exposition gegenüber Neutronen in Großbritannien, 1946-88 (Quelle: [37])

Arbeitgeber	Anzahl exponierter Individuen	Kumulative Gesamtkörper- Äquivalentdosis (mSv)	Kollektive Dosis (Personen-Sv)
Atomic energy authority	21.344	1,2	26
Atomic weapons establishment	9.389	0,3	3,1
British nuclear fuels, Sellafield	10.028	4,0	40
Summe	30.761	1,7	69,1

Eine Untersuchung von 96.000 Arbeitern aus Großbritannien, Kanada und den USA [111] stellt einen signifikanten Trend beim Leukämierisiko (außer chronischer lymphatischer Leukämie) fest und schätzt das ERR (Excess Relative Risk) dafür auf $2,2 \text{ Sv}^{-1}$. Für Krebs außer Leukämie wurde ein negativer Trend festgestellt, allerdings sind die Konfidenzintervalle breit und schließen die Werte ein, die durch Extrapolation der Schätzungen aus den Daten der Atombombenopfer erhalten wurden.

Mitglieder des fliegenden Personals ziviler Fluggesellschaften und militärischer Kräfte

Die Exposition des fliegenden Personals ist noch nicht besonders intensiv untersucht worden. Erst vor wenigen Jahren wurde die Aufmerksamkeit der Strahlenschützer auf diese Berufsgruppe gelenkt.

Obwohl die amerikanische Federal Aviation Administration bereits 1989 erste Bemühungen unternahm, die Strahlenbelastung von Passagieren und Angestellten im Luftverkehr abzuschätzen [77], werden die Ergebnisse erster Meßprogramme erst 1994 publiziert [259]. Spätere folgen 1999 [145;214]. Die Deutsche Strahlenschutzkommission faßt ihren Erkenntnisstand 1997 in einem Bericht zusammen und schätzt darin die maximale Strahlendosis eines Piloten ab [230].

Aus diesen Publikationen ergibt sich eine Strahlenbelastung eines Piloten von theoretisch maximal $9,3 \text{ mSv}$ pro Jahr, wobei realistischerweise eher von ca. $2,5 \text{ mSv}$ pro Jahr auszugehen ist. Es wird geschätzt, daß höchstens 4% der Mitglieder des in Tokio stationierten und fast ausschließlich auf der Polarroute London-Tokio eingesetzten Personals der British Airways eine Jahresdosis von 6 mSv (entsprechend $7 \mu\text{Sv/h}$) erreichen können [12]. Wilson und Kollegen [259] schätzen die Exposition von fliegendem Personal auf Inlandsflügen 1982-83 auf $1 - 1,8 \text{ mSv}$ pro Jahr, während sie für auf internationalen Flügen eingesetzte Personen $3,8 \text{ mSv}$ pro Jahr beträgt. Preston [189] ermittelt eine mittlere Äquivalentdosis von $9,2 \mu\text{Sv/h}$ für Personal auf britischen Concorde-Flügen. Die mittlere Exposition des Kabinenpersonals lag bei $2,2 \text{ mSv}$ pro Jahr, die des Cockpitpersonals bei $2,8 \text{ mSv}$ pro Jahr. Ähnliche Unterschiede wurden auch von Wilson berichtet. Weiterhin wurden auch Unterschiede von bis zu 20% zwischen verschiedenen Flugzeugtypen beobachtet.

2.2.2.5 Strahlenbelastung besonderer Bevölkerungsgruppen

Zu den wichtigen strahlenexponierten Gruppen gehören nicht nur beruflich exponierte Individuen, sondern auch eine Reihe von Populationen. Die prominenteste und am besten untersuchte Population ist die der Atombombenopfer von Hiroshima und Nagasaki [41]. Einige Personengruppen sind Opfer von Atombombentests, wie z.B. in der Altai-Region in der Nähe von Semipalatinsk im Kasachstan [104], oder in Nevada oder dem Bikini-Atoll. Andere Menschen sind einer hohen Hintergrundstrahlung ausgesetzt, wie z.B. im indischen

Staat Kerala [169]. Tabelle 2.10 faßt einige Eckdaten dieser Bevölkerungsgruppen zusammen.

Tabelle 2.10: Die wichtigsten Bevölkerungsgruppen, die hohen Dosen von Röntgen- und γ -Strahlen exponiert waren (Quelle: [112])

Bevölkerung	Exposition	Anzahl Individuen	Strahlendosis (mSv)	
			Durchschnitt	Maximal
Atombombenopfer von Hiroshima & Nagasaki	γ -Strahlen, Neutronen	86.000	280	4000
Tschernobyl	externe Strahlung (Cäsium 137)	7.000.000	6-17	> 100
Bevölkerung entlang des Flusses Tschaja	Externe und interne Strahlung (Strontium 90)	80.000	200	3000
Bevölkerung in der Gegend von Semipalatsinsk	Externe und interne Strahlung (Iod 131, Cäsium 137, Rubidium 103)	100.000	300	3000

2.2.2.6 Vergleich dieser unterschiedlichen Expositionen

Abbildung 2.2 faßt die Strahlenexposition der Bevölkerung im weltweiten Durchschnitt zusammen. Sie verdeutlicht, daß die Exposition der Bevölkerung durch natürliche Strahlung weit über der Exposition durch medizinische Anwendungen, Nuklearindustrie oder atomare Unfälle liegt. Die Belastung einzelner Bevölkerungsgruppen oder Individuen schwankt mit einer großen Bandbreite.

Abbildung 2.2: Vergleich der durchschnittlichen weltweiten Strahlenbelastung der Bevölkerung aus natürlichen und künstlichen Quellen (Quelle: [248])

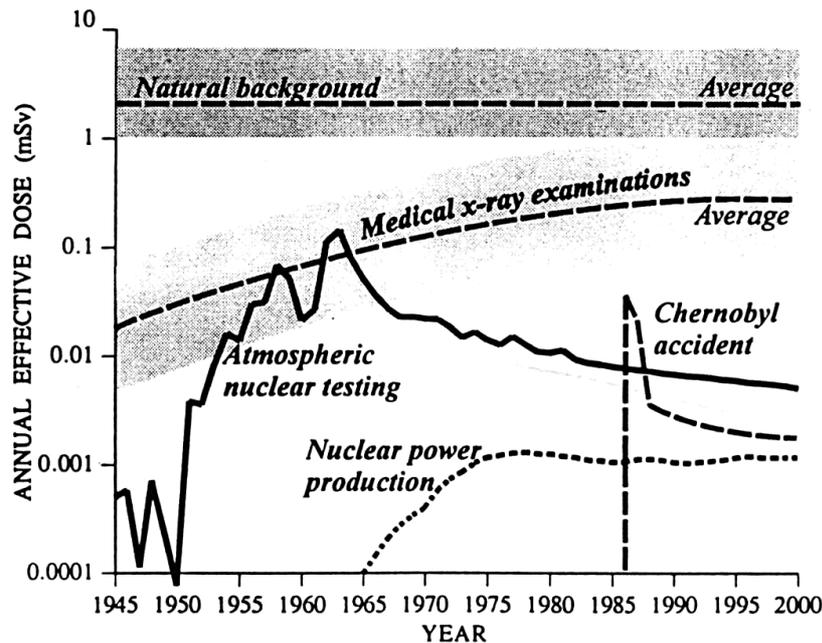


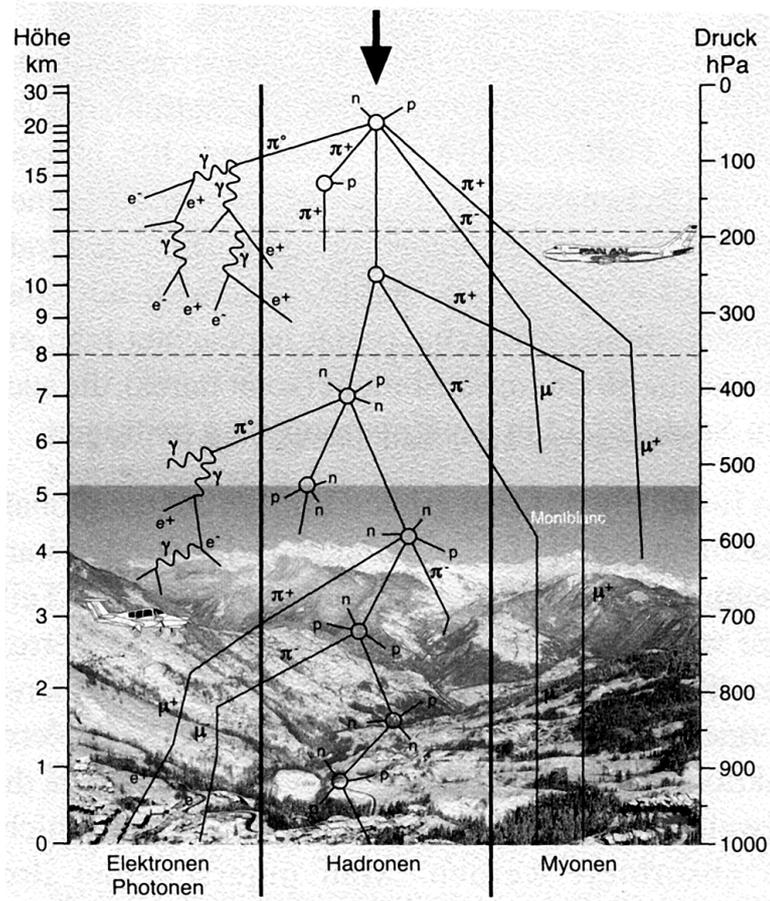
Figure I. Worldwide average annual radiation doses from natural and man-made sources.

The shaded areas indicate the approximate ranges of typical natural background exposures and of average medical exposures in countries with the highest and lowest levels of health care. Although not indicated, considerable variations occur also for the other sources of exposure.

2.2.3 Kosmische Strahlung

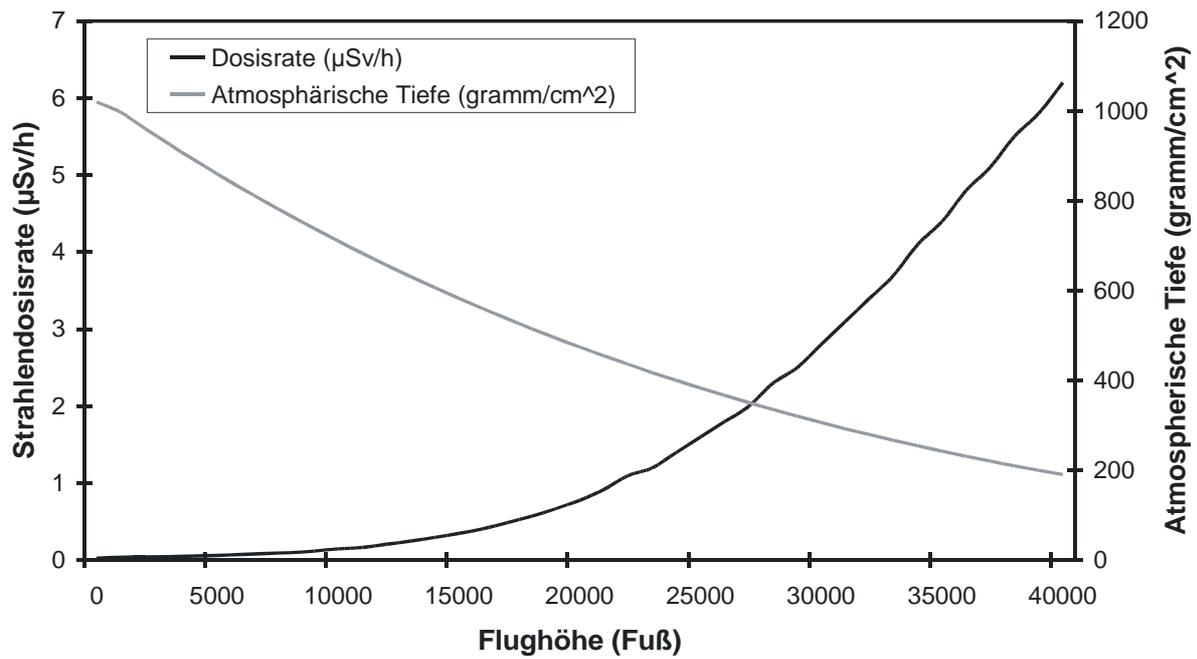
Die kosmische Strahlung entsteht aus zwei Quellen: zum einen aus Partikeln, hauptsächlich Protonen, deren Herkunft außerhalb unseres Sonnensystems liegt, zum anderen aus Partikeln, die von der Sonne stammen. Diese Partikel (zu 86% Protonen, 11% α -Partikel, 2% Elektronen, schwere Atomkerne) besitzen ein breites Energiespektrum von 100 MeV bis über 10^{20} eV. Sie interagieren mit der Erdatmosphäre, so daß die kosmische Strahlung auf typischen Flughöhen zum größten Teil aus Neutronen, Elektronen und Myonen besteht. In Bodennähe wiegen die Myonen vor. Nur die energiereichsten, schweren Partikel dringen durch die Erdatmosphäre bis auf Bodennähe. Wegen ihrer hohen biologischen Wirksamkeit ist der Beitrag der Korpuskularstrahlung zur effektiven Dosis von Flugzeuginsassen sehr hoch.

Abbildung 2.3: Strahlenkaskade in der Erdatmosphäre (Quelle: Informationsbrochure der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig)



Die folgende Abbildung verdeutlicht, wie kosmische Strahlung von der Erdatmosphäre absorbiert wird. Die atmosphärische Tiefe wird in g/cm^2 gemessen und entspricht der Luftmasse, die von der kosmischen Strahlung durchdrungen werden muß, um auf eine gewisse Höhe zu gelangen.

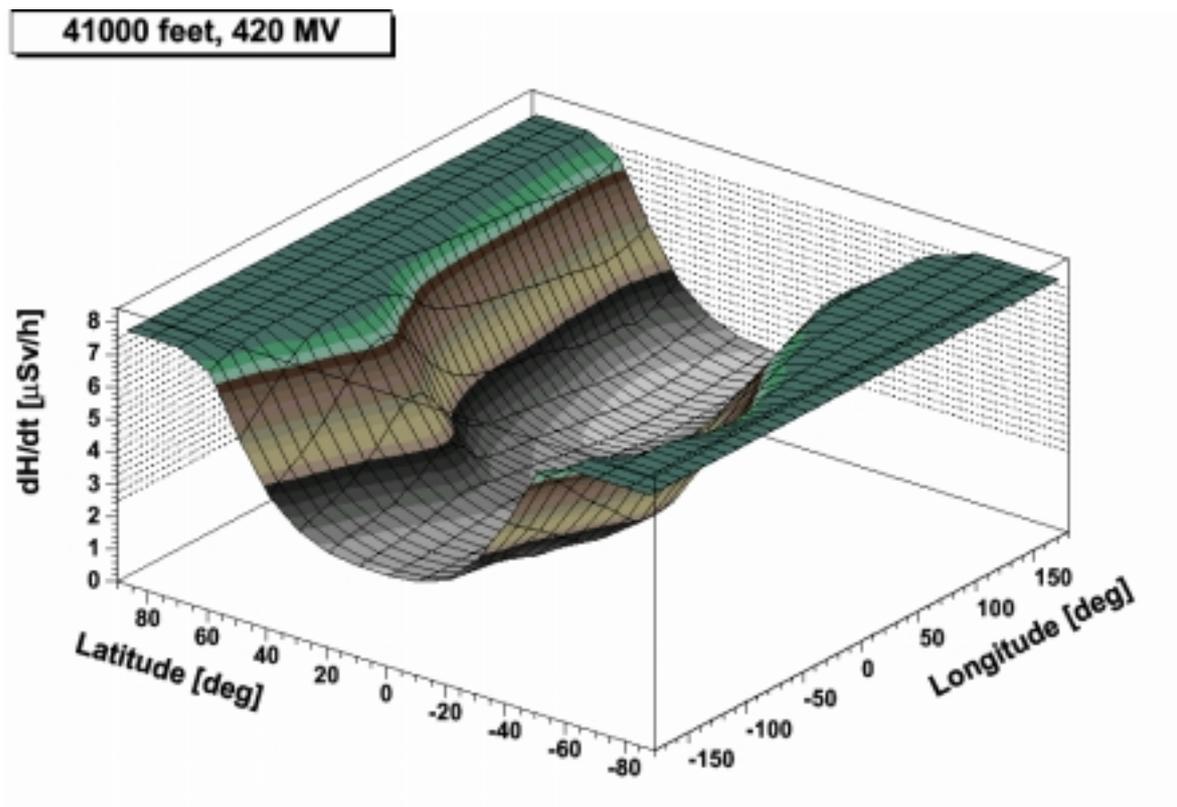
Abbildung 2.4: Einfluß der Erdatmosphäre auf die Strahlenintensität



Magnetfeld der Erde

Das Magnetfeld der Erde hat die Fähigkeit, geladene Teilchen von ihrer Flugbahn abzulenken, so daß niedrigenergetische Partikel in der Gegend des Äquators nicht in die Erdatmosphäre eindringen. In der Nähe der Pole (ab ca. 50° nördlicher Breite) wird kosmische Strahlung nicht so effektiv abgeschirmt.

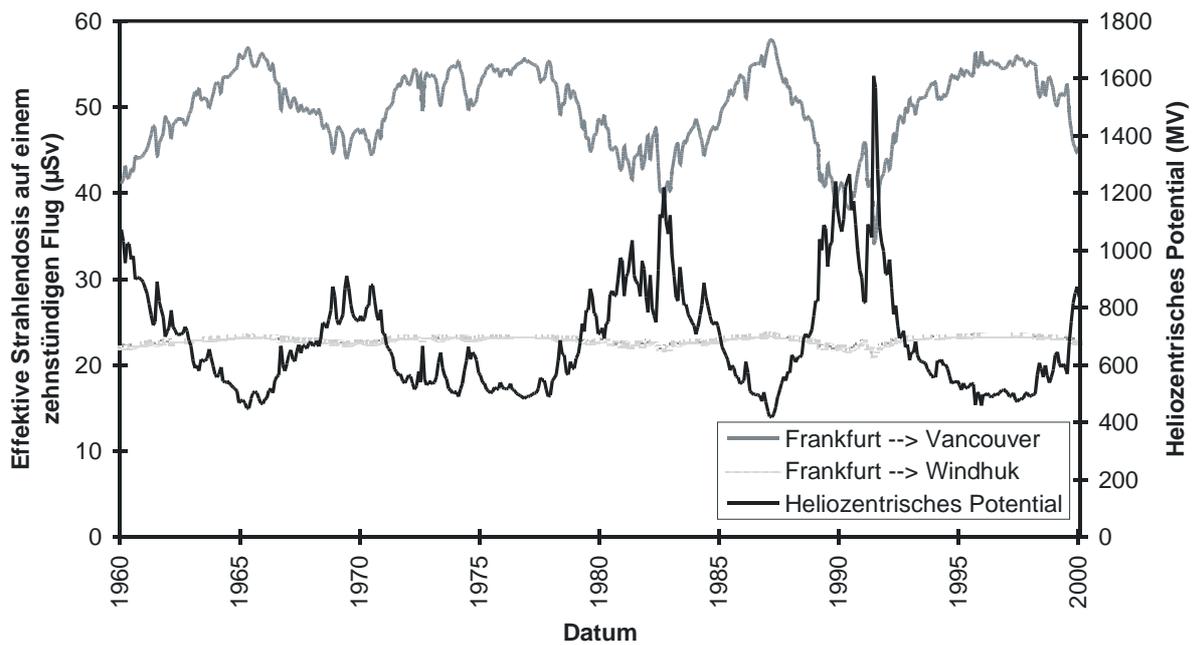
Abbildung 2.5: Einfluß des terrestrischen Magnetfeldes auf die Strahlenintensität
(Quelle: Spurny et al., Vortrag auf der Tagung der IRPA-10, Hiroshima, 2000)



Solare Teilchenereignisse

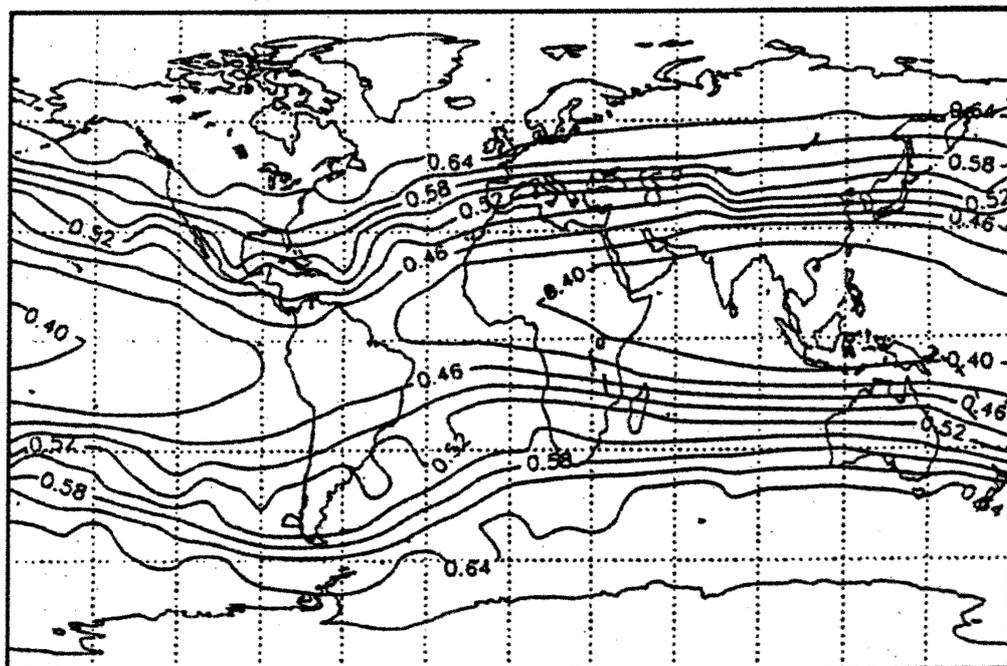
Sporadisch auftretende magnetische Störungen auf der Sonne verursachen solare Teilchenereignisse. Ihre Häufigkeit korreliert mit dem ca. elfjährigen Zyklus der solaren Aktivität und variiert zwischen einem bis zehn Ereignissen pro Jahr. Bei einem solchen Teilchenereignis werden hohe Energiebeträge freigesetzt. Die geladenen Teilchen interagieren in gleicher Art und Weise wie die anderen Bestandteile kosmischer Strahlung - mit der Erdatmosphäre und können Reiseflughöhen oder sogar den Boden erreichen. Solare Teilchenereignisse können das Magnetfeld der Erde beeinflussen und haben dadurch einen Effekt auf die Penetrationskraft der kosmischen Strahlung.

Abbildung 2.6: Einfluß des heliozentrischen Potentials auf die Penetrationskraft der kosmischen Strahlung



Die Bedeutung des Beitrags der Neutronenstrahlung zur Gesamtstrahlendosisrate, insbesondere in nördlichen Breitengraden (Nordeuropa, Kanada), stellt folgende Abbildung 2.7 dar:

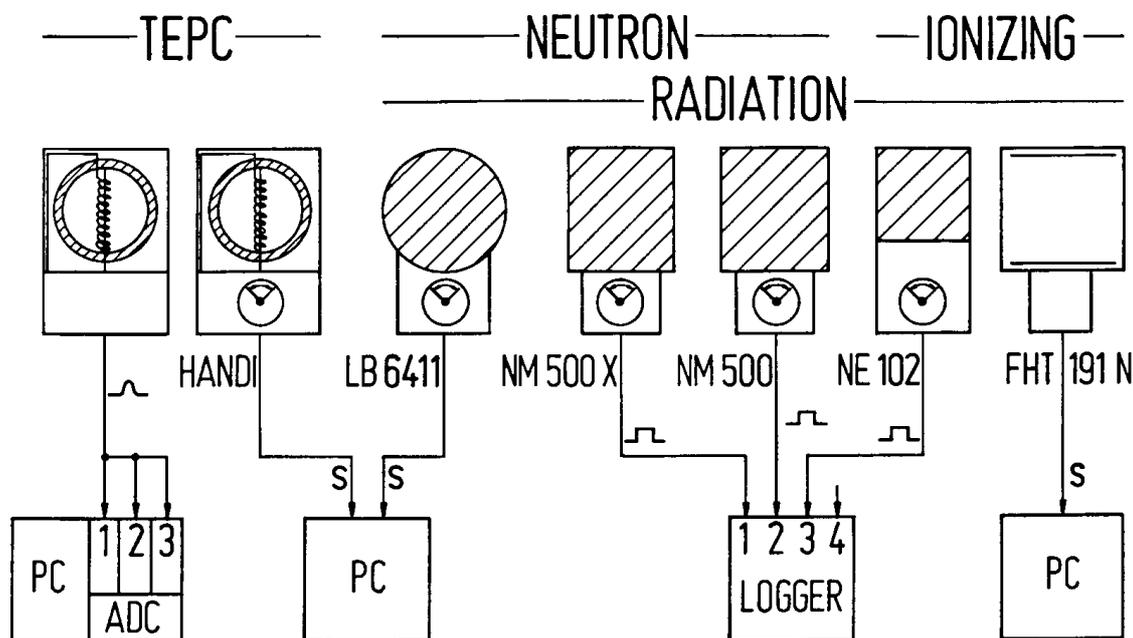
Abbildung 2.7: Prozentualer Anteil der Neutronenstrahlung an der Gesamtstrahlendosisrate (Äquivalentdosis) auf einer Höhe von 40.000 Fuß (ca. 12 km) (1965, bei einem Minimum des heliozentrischen Potentials) (Quelle: [112])



2.2.4 Schätzungen der Strahlenexposition des fliegenden Personals

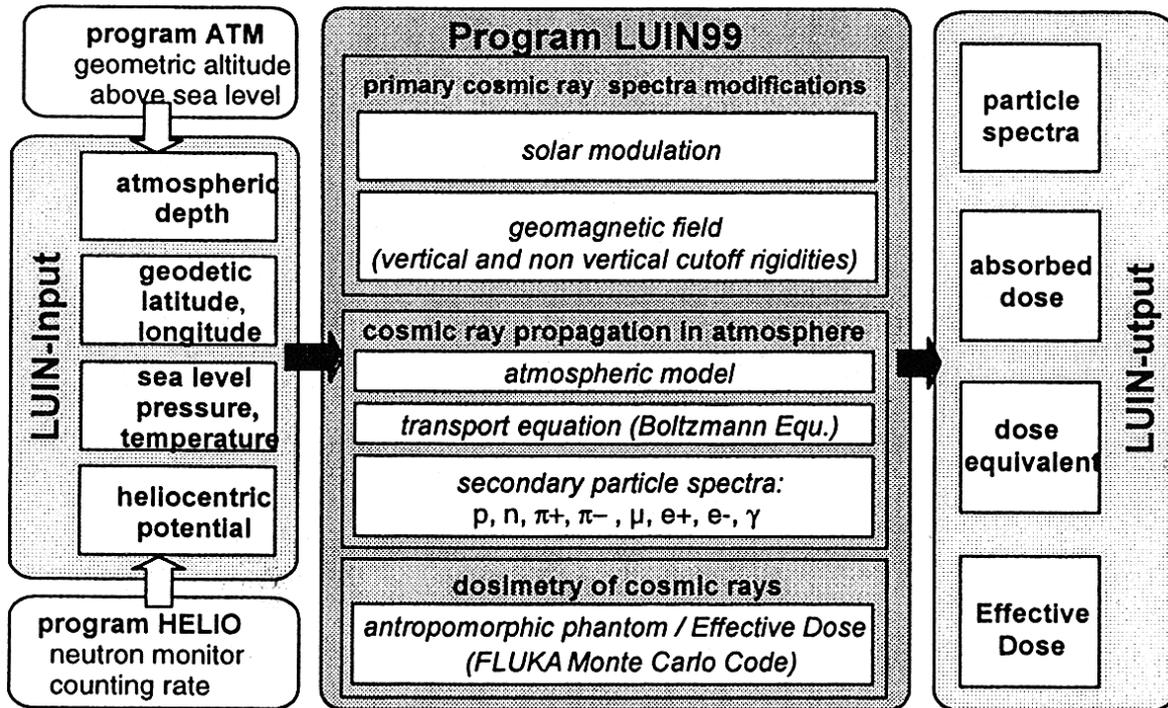
Verschiedene Meßprogramme in Australien [259], Kanada [145] und Europa [12;18;214;215] beschäftigen sich mit der Bestimmung der Zusammensetzung und Energieverteilung der kosmischen Strahlung in der Erdatmosphäre und der Optimierung des Einsatzes geeigneter Meßgeräte. Die meistverwendeten Geräte sind Neutronen-Spektrometer und gewebeäquivalente Ionenkammern (engl. Tissue Equivalent Proportional Counter, TEPC). Kosmische Strahlung wird auch von Raumfahrtbehörden erforscht [258], allerdings nicht in Flughöhen von Verkehrsflugzeugen.

Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der Meßgeräte, die von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt im ACREM-Projekt eingesetzt werden



Da diese Geräte meist nur einen Teil des Strahlenspektrums messen können, werden ihre Meßwerte um die Ergebnisse von Monte-Carlo-Simulationen zur Zusammensetzung der Strahlung ergänzt. So wird das gesamte Strahlenspektrum ermittelt. Einige Computerprogramme [69;76] (oder Programm-Bibliotheken [71;176;213]) schätzen das Strahlenspektrum und daraus resultierende effektive Strahlendosisraten direkt anhand von physikalischen Gleichungen, wie es auf folgender Abbildung dargestellt wird (siehe auch Abschnitt 3.3 „Das Programm CARI,,).

Abbildung 2.9: Flußdiagramm der Programmbibliothek LUIN99



Die meisten Autoren der in Tabelle 2.11 aufgeführten Arbeiten gehen davon aus, daß die jährliche Strahlenbelastung einer im Flugdienst beschäftigten Person derzeit unter der Grenze von 6 mSv pro Jahr liegt. Demnach ist es auch unkompliziert, durch geeignete Einsatzpläne eine Beschränkung der Strahlenbelastung des fliegenden Personals zu gewährleisten. Stellvertretend für andere Berichte [41;68;230] faßt der jüngste Bericht der UNO [248] zusammen, daß Strahlendosisraten auf typischen Reiseflughöhen in der Nähe des Äquators bei 2-4 $\mu\text{Sv/h}$ und in nördlichen Breiten bei 5-8 $\mu\text{Sv/h}$ liegt, was zu jährlichen Strahlenbelastungen im Bereich 1-5 mSv führen kann.

Tabelle 2.11: Schätzungen der Strahlenexposition des fliegenden Personals

Erstautor	Jahr	Art der Arbeit	Strahlendosisrate ($\mu\text{Sv/h}$)
Friedberg [78]	1992	Berechnungen, US-amerikanische interkontinentale Routen	und 0,23 - 8,0
Regulla [195]	1993	22 Meßflüge, B747-400	≤ 6
Wilson [259]	1994	Messungen auf australischen und interkonti- nentalen Routen	$\leq 3,8$
Bagshaw [12]	1996	Meßflüge auf der Route London-Tokyo	6
O'Brien [176]	1996	Berechnungen, 32 US-amerikanische interkontinentale Routen	und 0,2 - 5,8
Oksanen [177]	1998	Schätzungen anhand von Flugeinsatzplänen von Finnair-Beschäftigten	2,3 - 7,8
Lewis [145]	1999	Messungen auf kanadischen Routen	1,6 - 5,8
Tveten	2000	Schätzungen anhand der Routenverteilung von Scandinavian Airline System (SAS)	0,1 - 4,3

2.2.5 Gesundheitseffekte ionisierender Strahlung

Während das Wissen über die Gesundheitseffekte hoher und mittlerer Dosen ionisierender Strahlung verhältnismäßig gut ist, sind diese Effekte bei niedrigen Dosen nur schwer meßbar, da sie sich kaum vom Hintergrundrauschen unterscheiden. Risikoschätzer für den niedrigen Dosisbereich basieren daher derzeit auf Extrapolationen aus den Bereichen hoher und mittlerer Dosen. Diese Extrapolationen fußen auf einer hypothetischen Beziehung zwischen Dosis und Wirkung, wobei meist ein linearer Zusammenhang angenommen wird, da bisherige Studien einen solchen Zusammenhang nahe legen oder zumindest nicht ausschließen [133]. Wegen dieser Unsicherheit ist man an der Untersuchung der gesundheitlichen Effekte niedriger Strahlendosen interessiert.

Die Berufsgruppe des fliegenden Personals ist darüber hinaus interessant, weil sie – im Unterschied zu vielen andere Berufsgruppen – dicht ionisierender Strahlung exponiert ist und sich Erkenntnisse aus dem Bereich locker ionisierender Strahlung nicht ohne weiteres auf diesen Bereich übertragen lassen.

Die Modellierung der Dosis-Wirkungs-Beziehung durch ein lineares Modell wird zurecht gerne kritisiert, denn es läßt sich nicht einfach biologisch erklären. Einerseits kann von einer stochastischen Wirkung ionisierender Strahlung ausgegangen werden, andererseits aber müßten die körperligen Reparaturmechanismen und andere Abläufe auf

zellulärer Ebene berücksichtigt werden. Diese Mechanismen könnten sich so auswirken, daß Zellschäden erst ab einem bestimmten Schweregrad („Schwelle“) nicht mehr effektiv repariert werden können. In der Strahlenepidemiologie werden daher neben dem linearen Modell auch Schwellenwertmodelle und linear-quadratische Modelle diskutiert.

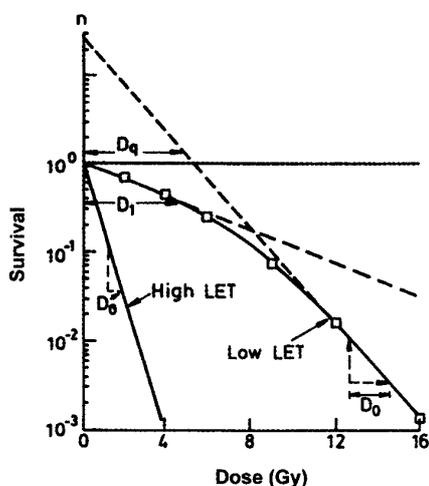
Die relative biologische Wirksamkeit (RBE, relative biological effectiveness) verschiedener Strahlenarten zueinander in verschiedenen Dosisbereichen ist ein weiterer Bereich, der noch kontrovers diskutiert wird und nicht allein mit Tierversuchen zu klären ist. Bei unterschiedlicher relativer Gewichtung von Neutronen- und Gammastrahlung, verändern sich z.B. die Risikoschätzer für die jeweilige Strahlenart. Es läßt sich eine Reihe möglicher Kombinationen finden, die mit den Daten über die Atombombenopfer von Hiroshima und Nagasaki kompatibel sind. Von diesen Gewichtungsfaktoren hängen aber die Ergebnisse vieler Studien ab. Die meisten Studien verwenden die in den Empfehlungen der ICRP Nr. 60 [113] angegebenen Gewichtungsfaktoren für einzelne Strahlenarten, um eine Äquivalentdosis zu berechnen.

Auf diese verschiedenen Aspekte gehen Veröffentlichungen von strahlenepidemiologischen Studien unterschiedlich ein, was hauptsächlich von Qualität und Umfang der vorliegenden Daten abhängt. Dieses Vorgehen führt dazu, daß solche Studien oft nicht einen einzigen, sondern gleich mehrere Risikoschätzer (für die jeweiligen Modelle) angeben. Dessen muß sich ein Leser strahlenepidemiologischer Literatur bewußt sein. In [41] wird detailliert auf verschiedene Modelle eingegangen.

Bei den ersten klinischen Anwendungen von Neutronen in der Krebstherapie wurde deutlich, daß der Unterschied zwischen dicht und locker ionisierender Strahlung klinisch relevant ist. Folgende Abbildung 2.10 vermittelt einen groben Eindruck: Sie zeigt die unterschiedliche biologische Wirksamkeit zwischen dicht und locker ionisierender (hoch- bzw. niedrig-LET-) Strahlung.

Abbildung 2.10: dicht und locker ionisierende Strahlung (Quelle: [112], S. 366)

Figure 2. Cell survival after exposure to radiation with low and high linear energy transfer (LET) as a function of dose



D_1 , indicated here for low-LET radiation only, is the dose required to reduce the survival to 37%; n is the extrapolation number; and D_q is the 'quasi-threshold' dose, which, like n , is a measure of the shoulder on the low-LET survival curve. D_0 is the reciprocal of the slope of the linear portion of the curves. Note that the curve for high-LET radiation is steeper than that for low-LET radiation (D_0 is smaller) and that there is a shoulder on the low-LET curve.

Im folgenden werden die bisherigen Erkenntnisse aus Studien zu Gesundheitseffekten ionisierender Strahlung, aufgeteilt nach Art des Effekts (deterministisch / nichtdeterministisch), nach Art der Strahlung (locker / dicht ionisierend) und nach Art der Einwirkung auf den Körper (extern / intern) vorgestellt. Diese Art der Darstellung ist im Rahmen dieser Arbeit zweckdienlicher als die nach Einzelorganen orientierte Darstellung aus [248].

Einen Überblick verschaffen neben [133] und [200] auch [41], [247], [170], [248].

2.2.5.1 Sehr hohe Strahlendosen

Deterministische Effekte (hoher Dosen) ionisierender Strahlung machen sich in den ersten Tagen, Wochen und Monaten nach der Exposition bemerkbar. Ist eine ausreichende Menge Zellen eines Organs betroffen, so führt dies zum Ausfall des Organs mit entsprechenden Folgen für den gesamten Körper. Empfindlich sind primär die blutbildenden Organe, Sexualorgane, die Haut und der Verdauungsapparat, und in geringerem Maße die Blutgefäße, die Augenlinse und das Nervensystem. Muskeln und Bindegewebe sind dagegen kaum empfindlich [248].

Schwellenwerte für deterministische Effekte sind in Tabelle 2.12 zusammengefaßt: Eine akute Exposition gegenüber relativ hohen Dosen (über 0,5Gy) bewirkt Erytheme, Haarausfall, Fertilitätsverlust, eine verminderte Aktivität blutbildender Organe und die

akute Strahlenkrankheit, die mit dem Tod enden kann. Diese Effekte treten bei kurzer Exposition gegenüber hohen Dosisraten auf. Die gleiche, über einen längeren Zeitraum kumulierte Dosis (also mit niedriger Dosisrate), hat nicht den gleichen Effekt. Ein wichtiger Teil dieses Wissens wurde nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl gewonnen.

Tabelle 2.12: Effekte hoher Strahlendosen (Quelle: [248])

Dosis (Gy)	Gewebe	Effekt
0,5	Knochenmark	verminderte Produktion roter Blutkörperchen
0,15 - 3,5	Hoden	temporäre bis permanente Sterilität
2,5 - 6	Eierstöcke	Sterilität
0,5 - 2	Augenlinse	Erkennbare undurchsichtige Stellen
5	Augenlinse	Katarakt (undurchsichtige Linse)
3 - 6	Haut	Erythem
1,5 - 2	ganzer Körper	akute Strahlenkrankheit
3 - 5	ganzer Körper	Tod nach 1-2 Monaten durch Schäden an den blutbildenden Organen
5 - 15	ganzer Körper	Tod nach 10-20 Tagen durch Schäden an Verdauungsorganen
>15	ganzer Körper	Tod nach 1-5 Tagen durch Schäden am Nervensystem

2.2.5.2 Hohe Strahlendosisraten

Die vier größten Gruppen von Personen, die Strahlen hoher Intensität ausgesetzt waren, sind Atombombenopfer und Patienten, die wegen bösartiger oder gutartiger Erkrankungen mit Strahlung behandelt oder zu Diagnosezwecken exponiert wurden. All diese Gruppen waren externer Strahlung ausgesetzt, hauptsächlich Gamma- und Neutronenstrahlen bei den Atombombenopfern, Röntgenstrahlen bei den Patienten.

Unter den Atombombenopfern wurden erhöhte Raten von Leukämien, Myelomen, non-Hodgkin-Lymphomen, Schilddrüsen-, Lungen-, Brust-, Eierstock-, Speiseröhren-, Magen-, Leber-, Dickdarm- und Blasenkrebs festgestellt [57;185;188;239;261]. Die Ergebnisse dieser und weiterer Studien bilden die Basis für die derzeit geschätzten Gewichtungsfaktoren verschiedener Strahlungsarten[41]. Aus der Beobachtung dieser Bevölkerungsgruppe schließen Shimizu und Kollegen [216] auf einen ERR von 0,38 pro Gy für Krebs außer Leukämie im Bereich unterhalb 0,5 Gy. Dieser Wert stimmt mit dem von Pierce und Vaeth [183] für den gesamten Dosisbereich ermittelten Wert von 0,41 pro Gy überein und suggeriert eine lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung. Diese Autoren beobachten, daß ein linear-quadratisches Modell für Leukämie mit einem RR von 2,4 pro Gy im Dosisbereich unterhalb von 0,5 Gy adäquater scheint.

Bei den wegen bösartiger Erkrankungen behandelten Patienten fand man signifikant erhöhte Raten von Leukämien (außer chronisch lymphatischen), Lungen-, Brust-, Speiseröhren- und Knochenkrebs sowie Krebs der Fortpflanzungsorgane und Sarkome der Weichteile [20;26;29;30;44;45;51;52;55;100;101;118;127;130;229;241-245;251;260]. Andere Patienten wurden wegen verschiedener Leiden strahlentherapeutisch behandelt, unter anderem wegen Hämangiomen der Haut, Läsionen im motorischen System, Gelenksteife, Pilzbefall der Kopfhaut (Tinea Capitis), Entzündungen der Brust bei Frauen, Mandel- und Schilddrüsenbeschwerden sowie Akne. Hier beobachtet man signifikant erhöhte Krebsraten, hauptsächlich in den bestrahlten Organen, also Leukämien, Schilddrüsen-, Brust- und Hautkrebs [46;48;56;88;102;103;116;117;124;128;129;146;152-156;158;159;185;202-205;211;212;217-219;252;253]. Die zu Diagnosezwecken bestrahlten Patienten weisen erhöhte Raten von Brustkrebs auf [27;31;50;61;109;110;114;186;187;217].

2.2.5.3 Niedrige Strahlendosisraten

Externe ionisierende Strahlung

Die am besten untersuchten Personen, die niedrigen Strahlendosen oder -dosisraten externer ionisierender Strahlung exponiert sind, sind die Arbeiter in der Nuklearindustrie [10;19;21;34;37;65;75;79-81;137-140;161;166;196;197;256;257;264] und die Liquidatoren des Reaktorunfalls von Tschernobyl [115;121-123;193;237]. Aber auch Radiologen [4;7] und Kinder, die im Mutterleib Röntgenstrahlen exponiert waren, sind untersucht worden [22;163;167;228]. Eine spezielle Gruppe bilden die Bevölkerungen einiger Regionen der Erde mit hoher Hintergrundstrahlung [3;73;234;236;263].

Studien über Kernkraftwerksarbeiter sind eine gute Quelle epidemiologischen Wissens über die Gesundheitseffekte chronischer niedriger Strahlendosen. Ca. 4,5 Millionen Menschen weltweit werden derzeit aus Strahlenschutzgründen überwacht und ihre Strahlenbelastung mit persönlichen Dosimetern erfaßt. Die mittlere gemessene Jahresdosis beträgt 1.1 mSv. Es bleiben jedoch Unsicherheiten über die Genauigkeit der Messung, der Latenzzeiten und der Interaktionen mit Lebensstilfaktoren.

Die wichtigsten Kohortenstudien sind in Tabelle 2.13 aufgeführt. In einigen dieser Studien (wie in den meisten Berufskohortenstudien), wird eine verringerte Sterblichkeit insgesamt und an Krebs beobachtet. Die nächstliegende Erklärung dafür ist der als „Healthy-Worker-Effekt“ bekannte Selektionsbias. In der Studie über die Plutoniumaufbereitungsanlage in Hanford wurde ein 10-20fach erhöhtes Krebsrisiko festgestellt, in anderen Studien war dieses Risiko wesentlich niedriger. Einige dieser Studien sind, besonders hinsichtlich der statistischen Verfahren, heftig kritisiert worden.

Die jüngste Publikation umfaßt über 96.000 strahlenexponierte Arbeiter aus der Nuklearindustrie der USA, Großbritanniens und Kanadas [111]. Das ERR für die Todesursache

Leukämie ist 2,2 pro Sv (90%-KI 0,1-5,7) und -0,07 pro Sv (90%-KI -0,4 - 0,3) für Krebs insgesamt außer Leukämie, was mit dem entsprechenden ERR von 0,18 pro Sv für Atombombenopfer verträglich ist. Sowohl die Studien über Überlebende der Atombombenabwürfe als auch diese Studien über berufliche Strahlenbelastung gelten als noch nicht abgeschlossen. In letztgenannter Studie sind noch 85% der Kohortenmitglieder am Leben, und die Anzahl überzähliger Krebsfälle wird vermutlich steigen. Das bedeutet, die Ergebnisse von Studien über niedrige Strahlendosen sind mit den Extrapolationen aus Studien mittlerer und hoher Strahlendosen kompatibel.

Tabelle 2.13: Wichtigste Berufskohortenstudien

Studie	Jahr	Studien- population	Personen- jahre	Follow-Up (Jahre)
National Register for Radiation Workers (UK) [166]	1999	124.746	2.063.300	≤ 47
National Dose Registry of Canada [10]	1998	206.620	2.861.093	≤ 47
Hanford (US) [80;81]	1993	32.643	633.511	≤ 43
UK Atomic Energy Authority [37;75]	1994 1993	21.344	534.000	≤ 42
Nuklearindustrie (Japan) [65]	1997	114.900	533.168	≤ 5
Sellafield (UK) [37] [64]	1994	10.028	260.000	≤ 40
UK Atomic Weapons Establishment [19;37]	1994 1988	9.389	216.000	≤ 37
Atomic Energy of Canada [34;87]	1995 1993	11.355	198.210	≤ 30
Rocky Flats (US) [80;257]	1993 1987	5.952	81.237	≤ 32
Oak Ridge (US) [79]	1997	28.347	-	≤ 40

Einige Bevölkerungsgruppen, wie z.B. im Staat Kerala in Indien oder in der Provinz Guangdong in China sind einer gegenüber der restlichen Bevölkerung zwei- bis dreifach erhöhten Intensität natürlicher Strahlung ausgesetzt. Entsprechende Studien [169] konnten jedoch keine eindeutig erhöhten Krebssterblichkeitsraten nachweisen. Andere Studien konnten auch kein erhöhtes Risiko nachweisen. Dies mag an der kleinen Größe der Studienbevölkerung, an der ungenauen Registrierung, an dem kleinen zu erwartenden Risiko oder der Nichtberücksichtigung von Confoundern, wie z.B. Sozialstatus, liegen.

Interne ionisierende Strahlung

Die wohl häufigste Belastung durch interne ionisierende Strahlung ist diejenige durch das radioaktive Gas Radon, das aus gewissen Gesteinsschichten aus dem Erdboden entweicht, sich in Bergwerken oder Häusern sammelt und mit der Luft eingeatmet wird. Die davon ausgehende Strahlung ist dicht ionisierend und wirkt lokal auf Haut und Lunge.

In einer gepoolten Analyse von 11 Studien über insgesamt ca. 65.000 Bergleute [149] wird für Lungenkrebs ein relatives Risiko von 1,14 bei 150 Bq/m³ beobachtet (95%-KI 1,0-1,3). Nicht nur die Höhe der kumulativen Strahlendosis erhöht das Krebsrisiko, sondern auch die Dauer der Strahlenbelastung, selbst bei gleicher kumulativer Strahlendosis [148]. Man spricht von einem inversen Dosisraten-Effekt, denn insgesamt steigt das Krebsrisiko, selbst bei niedrigerer Dosisrate. Dieser Effekt wird selbst bei verfeinerten Untersuchungen unter Berücksichtigung von Meßfehlern beobachtet [231]. Es wird auch ein synergetischer Effekt von Rauchen mit der Radonbelastung beobachtet [151]. Eine Erhöhung der Mortalität bei anderen Krebsarten wird mit der Belastung durch Radon nicht in Verbindung gebracht [49].

Das Krebsrisiko von Personen, die in ihrem Haus Radon exponiert sind, wurde verschiedentlich untersucht {Cohen & Colditz 1994 ID: 357}[47;144;173;232] und, wie bei den Bergleuten, ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko festgestellt, mit vergleichbaren Risikoschätzern: ERR von 0,14 pro 100 Bq/m³ (95%-KI 0,01 - 0,29) [47].

Eine weitere Ursache interner Belastung durch dicht ionisierende Strahlung ist die Ingestion oder Injektion von Radium oder Thorotrast. Bei US-amerikanischen und britischen Radium-Leuchtfarben-MalerInnen, die z.T. Radium ingeriert hatten, wurden signifikant erhöhte Mortalitätsraten an Osteosarkomen und Brustkrebs festgestellt [16;17;36;223-225]. Radium-224 wurde auch zur Behandlung von Spondylarthritis ankylopoetica injiziert [171;172;222;249;254;255]. Bei den so behandelten Patienten wurden erhöhte Raten an Knochen-, Brust-, Schilddrüsenkrebs festgestellt. Anderen Patienten wurde der langlebige Alpha-Strahler Thorotrast als Kontrastmittel injiziert, der sich in Leber, Milz und Lymphknoten ansammelt. Entsprechend werden erhöhte Raten an Leukämie und Leber-, Knochen-, Schilddrüsen-, Brust-, Nieren-, Blasen- und Bindegewebskrebs festgestellt [5;6;62;63;136;157;162;164;165;250;254] (mit ERR von ca. 12,7 für Leukämie [6] und ERR = 7 für Knochenkrebs [62]).

Hyperthyroidie-Patienten wurde Iod-131 zu diagnostischen Zwecken oder zur Behandlung verabreicht [54;60;74;92-95;107;108;201;209]. Es wurden erhöhte Inzidenzraten von Schilddrüsenkrebs festgestellt (SIR = 1,69 bei 1,5 Gy, 95%-KI: 0,35 - 0,54 [95] bzw. SIR = 1,29, 95%-KI: 0,76-2,03 [107]).

Schließlich wurden bei einigen Bevölkerungsgruppen, die infolge von atomaren Tests oder Unfällen radioaktive Isotope ingeriert hatten, erhöhte Raten an Leukämie (z.B. entlang des Flusses Tschaja im südlichen Ural [141;142], ERR = 1,84 bei 1 Sv, 95%-KI: 0,9 - 3,1)

und Schilddrüsenkrebs, z.B. in Weißrußland nach Tschernobyl [11] und andernorts festgestellt [96;135;198;227].

2.2.6 Europäische Richtlinien zur Strahlenbelastung

In der EU-Richtlinie 96/29/EURATOM [67] werden *strahlenexponierte Arbeitskräfte* definiert als „Selbständige oder Arbeitnehmer, die einer Strahlenexposition aus den in dieser Richtlinie erfaßten Tätigkeiten ausgesetzt sind, die Dosen bewirken können, die einen der Dosisgrenzwerte, die den für Einzelpersonen der Bevölkerung festgelegten Dosisgrenzwerten entsprechen, übersteigen.“

Diese Richtlinien legen den Grenzwert der zulässigen Äquivalentdosis für diese Personen auf max. 20 mSv/Jahr im 5-Jahres-Mittel fest. Darüber hinaus gelten besondere Grenzwerte für die Belastung der Augenlinse (150 mSv/j), der Haut (500 mSv/j), der Hände, Füße und Knöchel (500 mSv/j). Der Grenzwert für die zivile Bevölkerung liegt dagegen bei 1 mSv/Jahr im 5-Jahres-Mittel.

Zu den wichtigsten Gruppen strahlenexponierter Arbeitskräfte gehören Beschäftigte in Kernkraftwerken und Wiederaufbereitungsanlagen, (Uran-)Bergbauarbeiter, medizinisches Personal, sowie Mitglieder des fliegenden Personals ziviler Gesellschaften und militärischer Kräfte.

Arbeitgeber, darunter Fluggesellschaften, sind verpflichtet, die Einhaltung der Grenzwerte für die Strahlendosis zu gewährleisten und zu überwachen, sowie ihr Personal über die Gefahren kosmischer Strahlung angemessen aufzuklären.

Die Unterteilung der strahlenexponierten Arbeitskräfte in zwei Kategorien (A und B) kann auch für die kommerzielle Luftfahrt relevant sein und ist nicht zuletzt auch ein psychologischer Faktor: Zu Kategorie A gehören „strahlenexponierte Arbeitskräfte bei denen davon auszugehen ist, daß sie eine höhere effektive Dosis als 6 mSv pro Jahr oder eine höhere Äquivalentdosis als drei Zehntel der Dosisgrenzwerte für die Augenlinse, die Haut und die Extremitäten ... erhalten können.“ [67]. Andere strahlenexponierte Arbeitskräfte fallen unter Kategorie B. Während bei der Überwachung von Arbeitskräften der Kategorie B nachzuweisen ist, daß diese Arbeitskräfte ordnungsgemäß in dieser Kategorie eingestuft sind, ist eine individuelle Überwachung bei strahlenexponierten Arbeitskräften der Kategorie A systematisch durch individuelle Messungen durchzuführen.

2.3 Zusammenfassung

Über die Effekte ionisierender Strahlung auf die menschliche Gesundheit ist vieles bekannt. Am deutlichsten sind die Folgen hoher Strahlendosen festzustellen, die rasch zu akuten, oft tödlich endenden Erkrankungen führen. Erkenntnisse darüber wurden aus den Untersuchungen der Opfer atomarer Katastrophen gewonnen.

Im Niedrigdosisbereich lassen sich hingegen keine akuten Effekte beobachten. Der Nachweis einer Beziehung zwischen Strahlendosis und Häufigkeit des Auftretens von Erkrankungen (eine Dosis-Wirkungs-Beziehung) gelingt nur bei Personengruppen, deren Strahlenexposition gut quantifizierbar ist, wie z.B. bei beruflich Strahlenexponierten.

Unterschiedliche Expositionssituationen, wie z.B. externe Gammastrahlung, interne Strahlung durch Inhalation von Radon bzw. durch Ingestion oder Injektion radioaktiver Stoffe, führen zu ungleichen Belastungen einzelner Organe oder Gewebe. Dabei werden einige Organe gegenüber ionisierender Strahlung als empfindlicher eingestuft als andere. Ähnliches gilt für die biologische Wirksamkeit einzelner Strahlenarten und -energien. Deshalb werden Wichtungsfaktoren eingesetzt, um eine physikalische Strahlendosis (in Gray) in eine Ganzkörper- oder Organdosis (beide in Sievert) umzurechnen. Diese Wichtungsfaktoren sind Gegenstand weiterer Forschung.

Aufgrund publizierter Schätzungen der Strahlenbelastung des fliegenden Personals und des ungeborenen Lebens kann ein erhöhtes Krebsrisiko für einige „strahlensensitive“ Organe oder Gewebe erwartet werden. Die Expositionssituation dieser Personen unterscheidet sich jedoch stark von derjenigen anderer untersuchter Personengruppen (bis zu 64% der effektiven Strahlendosis sind auf Neutronen zurückzuführen), so daß aus dem bisher Bekannten nur bedingt auf die Gesundheitseffekte kosmischer Strahlung geschlossen werden kann.

3 Planung und Durchführung der Expositionserfassung

Für die Untersuchung einer möglichen Beziehung zwischen der Strahlendosis und dem Sterberisiko in einer epidemiologischen Studie sind Messungen oder Schätzungen der erhaltenen Dosen notwendig. Eine möglichst genaue Schätzung ist insbesondere dann wichtig, wenn – wie in der Lufthansa-Studie – Dosis-Wirkungs-Modelle untersucht werden sollen.

Bisher wurden für das fliegende Personal keine Daten spezifisch zum Zwecke des Strahlenschutzes gesammelt (weder individuelle, noch andere). In der Lufthansa-Studie mußten daher verschiedene Datenquellen auf ihre Verwendbarkeit untersucht werden. Zur Untersuchung des Strahlenrisikos ist eine genaue Dosiserfassung notwendig. Die wichtigsten Kriterien für die Verwendbarkeit der Datenquellen waren daher neben den Kosten der Erfassung ihre Vollständigkeit und Qualität. Diese wurden in einem ersten Schritt evaluiert. Die Wahl fiel schließlich auf Aufzeichnungen der „Berufsbiographie“ von PilotInnen in Form von Karteikarten mit Angaben über die Anzahl der Flugstunden und der geflogenen Flugzeugtypen in jedem Jahr. Solche Aufzeichnungen liegen nur für das Cockpitpersonal vor.

Anhand der Ergebnisse aus diesem ersten Schritt wurde in einem zweiten Schritt die hier vorgestellte Methode zur Schätzung der Strahlenbelastung entwickelt. Die Berufsbiographien werden durch eine „*Job-Expositions-Matrix*“ (JEM, engl. Job Exposure Matrix) ergänzt, anhand der individuelle Strahlendosen rekonstruiert werden können. Zur Konstruktion der JEM wurden historische Flugpläne ab 1960 ausgewertet.

JEM wurden erstmals 1983 vorgestellt [105] und in der Epidemiologie erst in den letzten Jahren vermehrt verwendet. Ein eigener Abschnitt dieser Arbeit (3.5.1.3 „Methoden der Expositionserfassung: Job-Expositions-Matrizen,“) beschreibt die Anwendung von JEM im allgemeinen und die Erstellung und Anwendung der hier eingesetzten JEM. Dort wird auch auf die Einschränkungen der Methode näher eingegangen.

Die Qualität dieser Methode wurde in einer Validierungsstudie untersucht, die in Abschnitt 3.4.2 „Validität und Genauigkeit der vorgestellten Methode „,“ erläutert wird. Dazu wurden präzise Daten gesammelt und aufwendig ausgewertet. Der Vergleich mit der JEM zeigt, daß die Ergebnisse beider Methoden hervorragend übereinstimmen und keine systematischen Verzerrungen zu erwarten sind.

Anhand dieser Daten können die Auswirkungen von Ungenauigkeiten oder Fehlern bei Schätzungen oder Messungen auf die Ergebnisse der weiteren Auswertungen der Lufthansa-Studie untersucht werden. Entsprechende Methoden werden in Abschnitt 3.5.1.3 „Methoden der Expositionserfassung: Job-Expositions-Matrizen,“ präsentiert.

Nach einer kurzen Begründung des hier verfolgten Ansatzes in Abschnitt 3.1 werden in den Abschnitten 3.2 und 3.3 die verwendeten Daten und Software vorgestellt. Die

Methode der Expositionsschätzung und die Validierungsstudie werden in Abschnitt 3.4 dargestellt. Abschnitt 3.4.4, in dem epidemiologische und statistische Methoden behandelt werden, beendet das Kapitel.

3.1 Warum keine individuellen Messungen?

Wegen der besonderen Zusammensetzung der Strahlung ist es im Gegensatz zu anderen Berufsgruppen nicht möglich, bei dem fliegenden Personal die individuelle Strahlenexposition über technisch einfache, persönliche Dosimeter zu überwachen.

Es ist dagegen möglich und strahlenschutztechnisch legitim, die individuelle Dosis durch eine personenunabhängige *Ortsdosis* am Arbeitsplatz zu messen. Solche Messungen benötigen anspruchsvolle technische Geräte. Die Physikalisch-technische Bundesanstalt (Braunschweig) hat sich, zusammen mit dem Österreichischen Forschungszentrum Seibersdorf, dieser Problematik angenommen [180]. Das „ACREM-Projekt“ (Air Crew Radiation Exposure Monitoring) beschäftigt sich mit der Auswahl von geeigneten Meßgeräten und Möglichkeiten der Ergänzung nicht gemessener Strahlungskomponenten durch computergestützte Berechnungen.

Ein Ergebnis des „ACREM-Projekts“ ist eine Kombination von zwei aktiven Meßgeräten, die an Bord eines Flugzeugs angebracht werden können. Die Meßwerte dieser Geräte müssen in einen Computer gespeist werden, der die Strahlenbelastung durch die nicht gemessenen Strahlenkomponenten ergänzt [214;215].

Diese Systeme werden derzeit noch nicht routinemäßig eingesetzt. Es ist lediglich eine kleine Anzahl dieser Geräte verfügbar. Aus diesem Grund ist man auf Schätzungen der Strahlendosis an Bord angewiesen. Weil solche Schätzungen per Computer berechnet werden können, lassen sie sich auch für die Vergangenheit mit guter Genauigkeit durchführen.

3.2 Datenmaterial

Fluggesellschaften haben bisher keine routinemäßigen Expositionsdaten über ihr Personal gesammelt. Deshalb mußten für die Kohortenstudie andere verfügbare Datenquellen auf ihre Verwendbarkeit untersucht werden.

Als Kriterien für die Daten wurden ihre Qualität, ihre Vollständigkeit, ihr Preis und ihre Erfassbarkeit festgelegt. Er stellte sich heraus, daß einzig für das Cockpitpersonal umfassendere Daten als nur Personaldaten (Ein- und Austrittsdatum aus dem Konzern) vorhanden sind. Aus diesen Gründen konnte eine Expositionsschätzung nur für PilotInnen und Flugingenieure vorgenommen werden. In der in Abschnitt 3.4.2 beschriebenen Validierungsstudie wird nachgewiesen, daß die Verwendung verhältnismäßig einfacher Daten für diese Gruppe den besten Kompromiß zwischen Datenverfügbarkeit, Erfassungsaufwand und Präzision der Schätzung darstellt.

In diesem Abschnitt werden alle prinzipiell zur Verfügung stehenden Datenquellen vorgestellt. Die Vorgehensweise bei der Schätzung individueller Strahlendosen wird in Abschnitt 3.4 näher beschrieben.

3.2.1 Datenquellen innerhalb der Deutschen Lufthansa AG

3.2.1.1 Ausscheiderbücher

Die Personaldaten der Lufthansa-Angestellten werden in der Personalabteilung am Standort Hamburg gehalten. Sie enthalten neben Namen und Geburtsdatum der Angestellten auch das Einstellungsdatum und das Datum des Austretens aus dem „fliegerischen Dienst“, also die Beschäftigungsdauer an Bord von Flugzeugen. Diese Daten, die in Form von jährlichen, gebundenen Computerausdrucken (daher der Name „Ausscheiderbücher“) vorliegen, sind die Basis für die Zusammenstellung der Kohorte und sind vollständig erfaßt worden.

Die Beschäftigungsdauer im fliegerischen Dienst ist das größte Maß, das als Surrogat für die Strahlenbelastung der Beschäftigten herangezogen werden kann. Da diese Daten ohnehin erfaßt wurden, erfordert ihre Verwendung keinen Mehraufwand. Sie sind außerdem für jedes Mitglied der Kohorte vorhanden.

3.2.1.2 Daten über das Kabinenpersonal

Die Mitglieder des Kabinenpersonals werden bei ihrer Einstellung im Schulungszentrum der Lufthansa in Frankfurt für den Einsatz auf bis zu fünf verschiedenen Flugzeugtypen geschult. Obwohl jedes Mitglied des Kabinenpersonals in der Regel nur auf einem Kurz- und einem Langstreckenflugzeugtyp eingesetzt wird, läßt sich aus diesen Aufzeichnungen keine für die Expositionsschätzung verwertbare Information rekonstruieren. Aufzeichnungen über weitere Schulungen, aus denen eventuell die Karriere erkenntlich würde, lassen sich nicht finden.

Die Schätzung der individuellen Strahlenbelastung der Mitglieder des Kabinenpersonals ist nicht einfach: Seit 1996 setzt die Lufthansa zunehmend „Area-Flieger“ ein: Ein Crewmitglied fliegt immer das gleiche Gebiet an. So werden z.B. Asiaten vornehmlich auf Flügen nach Asien eingesetzt.

3.2.1.3 Medizinische Daten

Der medizinische Dienst der Lufthansa am Standort Frankfurt führt Aufzeichnungen über die jährlichen Gesundheitskontrollen der Piloten. Im Rahmen dieser Untersuchungen werden die Angaben der Piloten über ihre Gesamtflugstunden (seit Beginn der fliegerischen Tätigkeit) festgehalten. Allerdings werden diese Angaben nicht überprüft und sind sehr ungenau. Mitunter kommt es vor, daß die Summe der Flugstunden über mehrere Jahre

sinkt statt zu steigen oder nur um die Mindestzahl von 50 Stunden pro Jahr steigt, die für den Erhalt der Flugzeugführer-Lizenz notwendig ist.

Die Tatsache, daß diese Akten nur in Papierform vorliegen, von schlechter Qualität sind und die entsprechenden Formulare aus individuellen Mappen vor Ort herausgesucht werden müßten, schließt eine Nutzung der enthaltenen Information wegen des mit der Recherche verbundenen Zeitaufwands aus.

3.2.1.4 Senioritätslisten

Jeder Pilot bei der Deutschen Lufthansa hat eine gewisse „Seniorität“, die in etwa seine Beschäftigungsdauer widerspiegelt. Am Beginn seiner Karriere wird ein Pilot als Co-Pilot auf Kurzstreckenflügen eingesetzt. Später wechselt er zu Mittel- und schließlich zu Langstreckenflügen, bevor er diesen Zyklus als Flugkapitän (das *Karriereprofil*) wiederholt. Das Einkommen des Piloten ist mit dem Fortschreiten auf der Karriereleiter und seiner Seniorität verbunden. Die Zeitspannen dieser einzelnen Etappen werden weitgehend durch den Personalbedarf bestimmt, der sich wiederum in den Senioritätslisten widerspiegelt. Eine Aufstiegsmöglichkeit wird zuerst dem Piloten mit dem höchsten Rang auf der Senioritätsliste angeboten.

Jährlich bekommt jeder Pilot eine aktuelle Senioritätsliste, aus der er seine Position in der Liste entnehmen kann. Neben den Namen der aktiven Piloten, ihrem Geburts- und Einstellungsdatum, enthalten Senioritätslisten auch den Flottentyp, also den Flugzeugtyp, für die sie eine *Musterberechtigung* (eine Lizenz) haben. Die Listen sind nach absteigender Seniorität geordnet.

Aus dieser Quelle ließe sich prinzipiell die Karriere (genauer: die Folge der Musterberechtigungen) der Piloten rekonstruieren. Angaben über die Anzahl der Flugstunden enthalten sie aber nicht. Darüber hinaus liegen Senioritätslisten bei der Lufthansa erst ab 1978 und in Papierform vor. Diese Quelle ließe sich als Ergänzung zu anderen Informationen verwenden, allerdings wird dies durch die Sortierung nach Seniorität statt nach Namen erschwert.

Wir haben davon abgesehen, darauf zurückzugreifen, weil sich eine noch detailliertere Informationsquelle fand, deren Erfassung mit verhältnismäßig geringem Aufwand verbunden ist.

3.2.1.5 Flugstunden

Sogenannte *Blockstunden* dienen der Erfassung der Flugzeit von fliegenderm Personal. Die Dauer eines Flugs in Blockstunden beträgt die reine Flugzeit zuzüglich der Rollzeiten auf dem Flughafen (historisch: zwischen dem Entfernen und Anbringen der Klötze, „Blocks“ an den Rädern, die ein Wegrollen verhindern). Blockstunden sind die Grundlage für die Bezahlung von Piloten; daher werden diese Daten sehr genau erfaßt.

In Deutschland besitzen Piloten eine Fluglizenz und eine Berechtigung für ein einziges *Flugzeugmuster* (d.h. für einen einzigen Flugzeugtyp oder eng verwandte Flugzeuge wie Airbus A319, A320 und A321). Diese Lizenz und die *Musterberechtigung* müssen jährlich durch das Bestehen einer mehrstündigen Prüfung im Flugsimulator erneuert werden. In Ausnahmefällen (derzeit ca. 35 von 4000 aktiven Piloten) kann ein Pilot zwei Musterberechtigungen für sehr ähnliche Flugzeugmuster besitzen (z.B. A320 & A340, B757 & B767, nicht aber B747-200 und B747-400). Die Lizenzen, auch „Airline Transport Pilot License“ (ATPL) genannt, werden vom Luftfahrtbundesamt (LBA) in Braunschweig vergeben.

An der für die Lizenzverwaltung und -verlängerung zuständigen Stelle der Lufthansa in Frankfurt wird für jeden Piloten und Flugingenieur eine Liste mit der Angabe der Lizenz und der geleisteten Blockstunden für jede Jahresperiode festgehalten. In Kombination mit den im Abschnitt 3.4 vorgestellten Daten über Strahlendosisraten läßt sich daraus – im Gegensatz zu den oben vorgestellten Daten – eine individuelle Strahlendosis schätzen.

Für die Jahrgänge bis einschließlich 1978 sind Blockstunden nur kumulativ pro Flugzeugtyp angegeben und erst danach jährlich aufgeschlüsselt. Der Karriereverlauf läßt sich jedoch zusätzlich anhand des Einstellungsdatums, des typischen Karriereprofils (siehe oben) und der durchschnittlichen jährlichen Blockstunden nachvollziehen.

Diese Daten liegen für aktive sowie ausgeschiedene Piloten bisher nur in Form von Karteikarten vor (Abbildung 3.1). Die verwaltende Abteilung gibt sie nach und nach in eine Datenbank ein, so daß sie elektronisch verfügbar sind. Die bisher nicht eingegebenen Karteikarten, darunter die von ausgeschiedenen Piloten und Flugingenieuren, wurden hingegen von einer Dateneingabefirma erfaßt. Das einzige technische Problem bei der Zusammenführung dieser Daten in einer Datenbank lag in der Harmonisierung der Liste der Flugzeugtypen aus eingegebenen Karteikarten, EDV-Daten und Flugplänen. Diese Angaben wurden auf den kleinsten gemeinsamen Nenner gebracht: Lizenzen für Flugzeugmuster (die mehrere Flugzeugtypen mit gleichem Cockpit umfassen).

Die Qualität dieser Daten darf als gesichert gelten, denn dieselbe Quelle wird für die Gehaltszahlungen verwendet. Die Kosten für ihre Eingabe sind verhältnismäßig gering, denn ein Teil kann günstig aus einer Datenbank exportiert werden, und die Kosten für die Erfassung des noch nicht eingegebenen Teils belaufen sich auf ca. 3 DM pro Karteikarte.

Abbildung 3.1: Beispiel einer Karteikarte mit Angaben zu Flugstunden

PK <u>50 319 F</u> Name <u>[REDACTED]</u>		Flugstunden			
Muster	F/; LOCKHEED 1049/1649	F/; B707	F/; DC10	FE B747	
Vorjahre	910	3.647	2.004		
1978			290		
1979			377		
1980			446		
1981			510		
1982			445		
1983			440		
1984			456		
1985			319		
1986			212		
1987			377		
1988				354	
1989				312	
1990				269	
1991				333	
Total	910	3647	5876	1268	

Form 4458 B-78 (FRA NV 1) Printed in Germany

3.2.1.6 Bordbücher der Flugzeuge

Für jedes Flugzeug wird ein Bordbuch geführt, das sich ständig an Bord der Maschine befindet. Darin wird jeder Flug festgehalten (Route und Dauer), sowie aufgetretene Probleme und durchgeführte Wartungsarbeiten. In jüngerer Zeit existiert auch eine elektronische Kopie dieser sehr zuverlässigen Informationsquelle. Da die Lufthansa ihre älteren Flugzeuge verkauft und damit auch das Bordbuch, sind für frühe Jahre und ältere Flugzeuge auf diesem Wege keine Daten zu erhalten, die für eine historische Kohortenstudie verwertbar wären.

3.2.1.7 Persönliche Logbücher

In der Vergangenheit waren Piloten gehalten, ein persönliches Logbuch zu führen, in dem alle wesentlichen Angaben eines Fluges festgehalten wurden (darunter Start, Ziel und Gesamtdauer). Logbücher mußten zehn Jahre aufbewahrt werden. Heute verzichten viele Piloten darauf; sie begnügen sich damit, ihre monatliche Gehaltsabrechnung zu überprüfen, auf der alle Flüge aufgeführt sind. Diese Daten von Piloten zu erfragen wäre mit erheblichem Aufwand verbunden. Die Informationen wären außerdem sehr lückenhaft.

Fluggesellschaften sind hingegen gesetzlich dazu verpflichtet, den Logbüchern äquivalente Daten für die Dauer von sieben Jahren aufzubewahren. Diese Quelle, eine

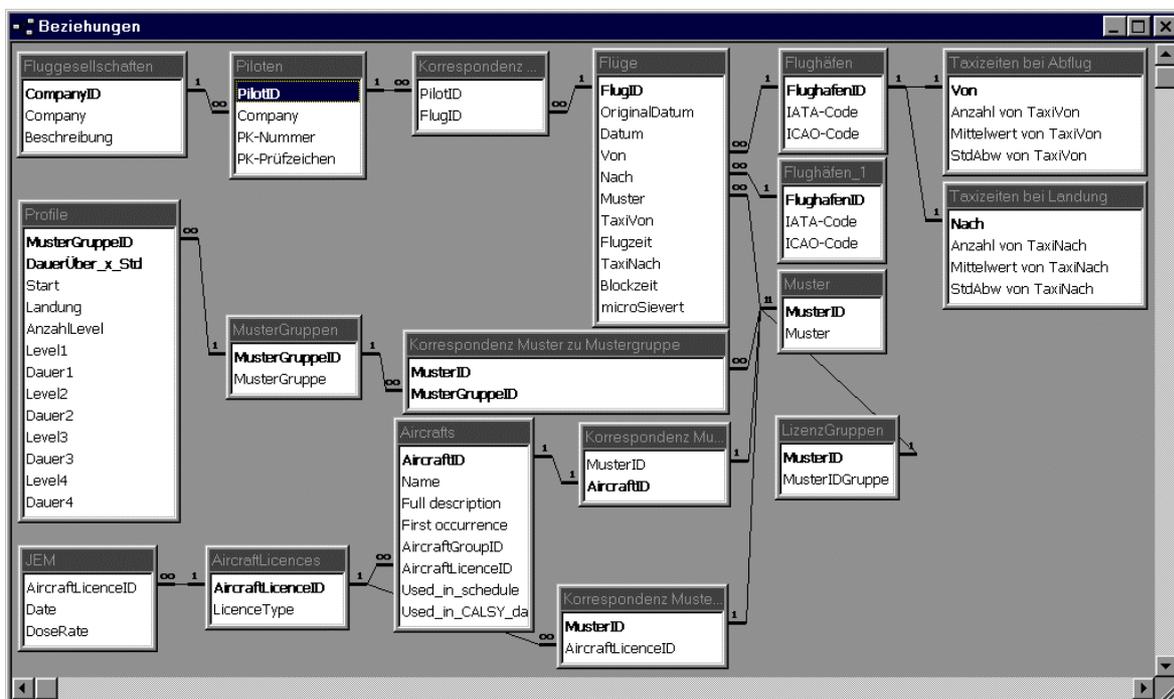
Datenbank, läßt sich für die Zwecke der Lufthansa-Studie verwenden. Sie enthält je einen Datensatz für jeden Flug jedes Piloten mit Angaben zu Start- und Zielflughafen, Datum, Flugdauer und Flugzeugtyp. Daraus lassen sich, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, individuelle Strahlendosen schätzen.

Die so geschätzte Strahlendosis gilt als die genaueste Schätzung in der Lufthansa-Studie und dient als Referenz zur Validierung des für die gesamte Gruppe der Piloten verwendeten Schätzverfahrens. Am einfachsten ist der Zugriff auf die Daten der letzten zwei Jahre, die noch nicht auf Magnetbändern ausgelagert sind. Daher fiel die Wahl auf den jüngsten verfügbaren Zeitraum (Juli 1996 bis einschließlich Juni 1997). Es wurden Daten aller Flüge von 4027 Piloten in diesem Zeitraum ausgewertet.

Diese Grunddaten liegen in Form einer Datenbank vor, die in drei Tabellen organisiert ist (Abbildung 3.2):

- ➔ Tabelle „Piloten“ mit Datenbank-ID der Person, Fluggesellschaft und PK-Nummer
- ➔ Tabelle „Flüge“ mit Datenbank-ID und den Daten aller Flüge (Datum, Start, Ziel, Gesamtdauer, Flugdauer, Taxizeiten)
- ➔ Tabelle „Korrespondenz Piloten zu Flügen“ mit Paaren von Piloten-ID und Flug-ID
- ➔ Tabelle „Fluggesellschaft“ mit Datenbank-ID und Beschreibung
- ➔ Tabelle „Muster“ mit den verwendeten Flugzeugmustern

Abbildung 3.2: Datenbank mit Logbuchdaten von 4027 PilotInnen Juli 1997 bis Juni 1998



3.2.1.8 Flugpläne

Die Taschenflugpläne oder Preisbücher der Lufthansa sind kleine Bücher, die an Kunden verteilt werden. Sie geben Auskunft über die angeflogenen Ziele, die Wochentage, Abflugs- und Ankunftszeiten sowie die Flugzeugtypen. Bis auf eine Lücke in den Jahren 1983-1989 liegen alle Flugpläne der Deutschen Lufthansa in Papierform vor, einige Jahrgänge sind auch elektronisch verfügbar.

Aus diesen Informationen kann, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, für jeden Flugzeugtyp und jedes Jahr die mittlere Strahlendosisrate eines Piloten berechnet werden. Dazu muß die Annahme getroffen werden, daß ein Pilot eine zufällige Auswahl der Flüge durchführt, die der Flugplan für seinen Flugzeugtyp angibt. Die Gültigkeit dieser Annahme wurde uns von verschiedenen Seiten bestätigt.

Die errechneten Dosisraten können als Tabelle zusammengefaßt werden, deren Aufbau jenem der Flugstunden-Karteikarten gleicht. Die Summe individueller Flugstunden multipliziert mit diesen Strahlendosisraten ergibt eine Schätzung der individuellen Strahlendosis.

Zur Vereinfachung der Eingabe wurden Flugpläne in 5-Jahres-Schritten für die Jahre von 1960 bis 1995 in eine Datenbank eingegeben: 1960, 1965, 1970, 1975, 1980, 1982, 1990 und 1995. (Für die Jahre zwischen zwei Stichjahren wurden die Strahlendosisraten interpoliert.) Da die Urlaubszeiten im Sommerhalbjahr eine höhere Anzahl Abweichungen vom regulären Flugplan als diejenigen im Winterhalbjahr mit sich bringen, wurde jeweils der Winterflugplan erfaßt.

Die Flugplan-Datenbank wurde so angelegt, daß eine unproblematische Erweiterung möglich ist und die Auswertung der Flüge im Hinblick auf Strahlendosisraten möglichst einfach ist. Ihr Kern besteht aus fünf Tabellen (vgl. Abbildung 3.3).

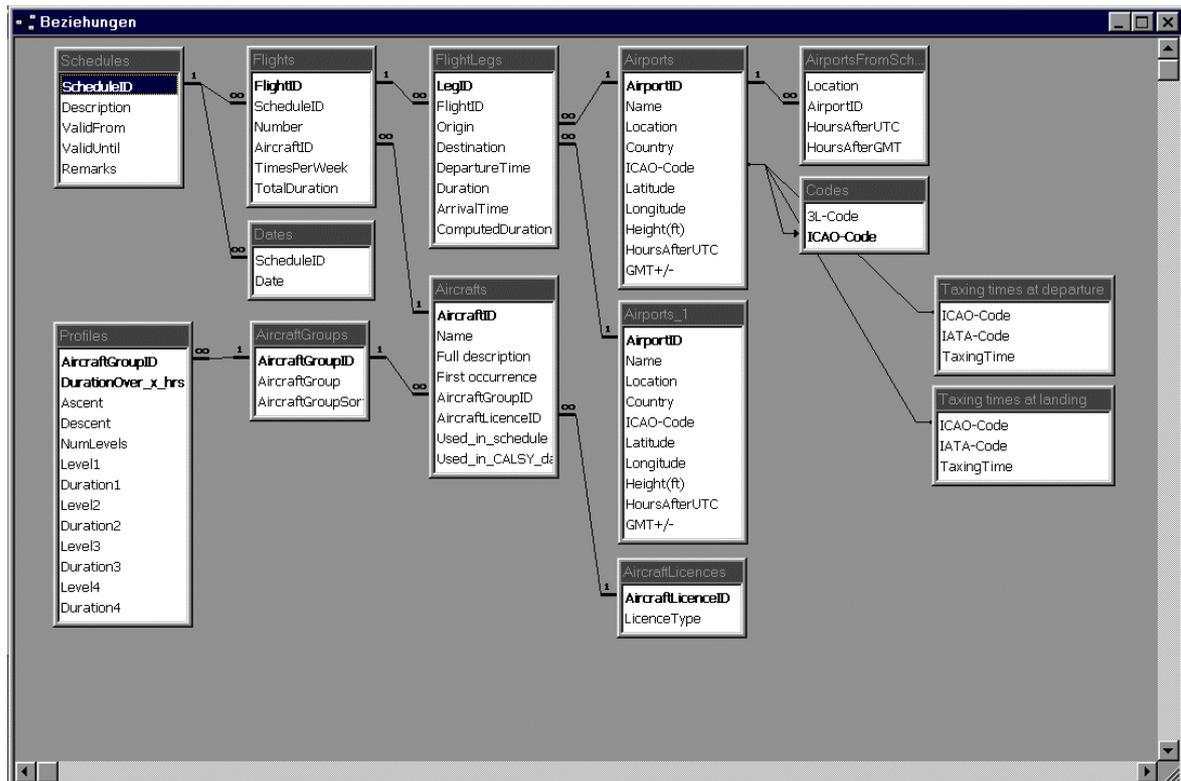
- Tabelle „Flugpläne“ besteht aus einer Beschreibung, einem Kommentarfeld und der Angabe über den Zeitraum, für den dieser Flugplan in der Studie Gültigkeit besitzt. Ein Flugplan besteht aus Flügen.
- Tabelle „Flüge“ führt die Flugnummer, den verwendeten Flugzeugtyp und die Anzahl Flüge pro Woche auf. Ein Flug besteht aus einer oder mehreren Teilstrecken. Von Lufthansa-Partnern durchgeführte Flüge wurden nicht eingegeben, bzw. ihre Frequenz pro Woche wurde auf Null gesetzt, falls sie erst später als solche identifiziert wurden.
- Tabelle „Teilstrecken“ enthält jeweils Start- und Zielflughafen, Uhrzeit bei Start und Landung, sowie die Flugdauer.
- Tabelle „Flugzeuge“ dient der einheitlichen Bezeichnung von Flugzeugen
- Tabelle „Flughäfen aus Flugplänen“ enthält die Bezeichnung der Flughäfen

Einige Tabellen der Datenbank wurden aus externen Quellen ergänzt, um die obigen Daten mit Angaben, die zur Berechnung von Strahlendosen mit CARI dienen, zu vervollständigen:

- Tabelle „Flughäfen“, aus CARI importiert und ergänzt, enthält Information zu 4876 Flughäfen, darunter das Land, die Uhrzeit nach GMT und den von CARI benötigten ICAO-Code. Anhand der Uhrzeit nach GMT konnten fehlende Flugdauern ergänzt werden.
- Tabellen „Taxizeiten“ (bei Start und bei Landung) enthalten die aus den „Logbuchdaten“ (siehe Abschnitt 3.2.1.7) abstrahierte und ergänzte jeweilige Dauer des Rollens auf dem Flugfeld, die von der Gesamtflugdauer abgezogen wird.
- Tabelle „Flughöhenprofil-Gruppierung“ führt Flugzeugtypen mit vergleichbarer „Performance“ zusammen, da sie das gleiche Flughöhenprofil verwenden.
- Tabelle „Flughöhenprofile“ enthält die vom Experten-Komitee genannten Flughöhenprofile (vgl. Abschnitt 3.2.1.9).

Eine weitere Tabelle „Flugzeuglizenz“ schließlich dient der Zuordnung der Flugzeugtypen, wie sie in den Flugplänen angegeben sind, zu Flugzeugführer-Lizenzen, die in den Expositionsdaten enthalten sind. Beispielsweise kann ein A320-Pilot sowohl eine A320, als auch die verkürzten bzw. verlängerten Versionen A318, A319 und A321 fliegen, da das Cockpit dieser Maschinen gleich ist. Ebenso unerheblich sind (für diese Studie) Unterschiede der – für den Passagier ggf. interessanten – Sitzausstattung der Flugzeuge.

Abbildung 3.3: Struktur der Flugplan-Datenbank



3.2.1.9 Flughöhenprofile

Um aus den Daten eines Fluges, wie sie in persönlichen Logbüchern oder einem Taschenflugplan zu finden sind, die Strahlendosis einer Person an Bord zu schätzen, werden zusätzlich Angaben über die Verweildauern auf verschiedenen Flughöhen benötigt (siehe Abschnitt 3.3 „Das Programm CARI,,).

Fluggesellschaften sind bestrebt, ihre Flugzeuge so hoch wie möglich fliegen zu lassen, um Treibstoff zu sparen. Die erreichbare Flughöhe wird durch das Gewicht des Flugzeuges bestimmt, das im Laufe des Fluges abnimmt, weil Treibstoff verbraucht wird. Gegen Ende des Fluges werden also größere Flughöhen erreicht.

Zur Planung eines Fluges und zur Bestimmung des benötigten Treibstoffs werden das Gewicht des Flugzeuges und seiner Ladung, die zurückzulegende Strecke, die Richtung des Fluges und der herrschenden Winde sowie andere Faktoren (mögliche Notlandung, eventuelle Streiks, militärische Konflikte, Warteschleifen am Zielort, etc.) berücksichtigt. Dementsprechend unterschiedlich fallen Flugroute, Flugdauer, Treibstoffverbrauch und Höhenprofil des Fluges aus. Ein weiterer, nicht durch die Technik bedingter Einflußfaktor ist die Zuweisung von Flughöhen durch Flugsicherungseinrichtungen. Gerade in Westeuropa werden aufgrund des regen Luftverkehrs selten technisch optimale Flughöhen erreicht.

Wir entschlossen uns daher, ein aus erfahrenen Piloten bestehendes Expertenkomitee nach typischen Flughöhenprofilen zu fragen. Es stellte sich als die einfachste Lösung heraus, die Experten nach hypothetischen Flügen auf einem bestimmten Muster mit unterschiedlicher Dauer zu befragen. So konnten die Piloten leichter auf ihre Erinnerung zurückgreifen. Diese Art der Darstellung ist auch für die Zuordnung von Flughöhenprofilen zu einzelnen Flügen aus der Flugplan-Datenbank hilfreich. Das Ergebnis dieser Befragung ist eine nach Flugzeugtyp und Flugdauer aufgeschlüsselte Tabelle, die im Anhang C – „Flughöhenprofile des Expertenkomitees,, vorgestellt wird.

Der Zusammenstellung der Flughöhenprofile ging eine Gruppierung der Flugzeugmuster voraus, so daß in der betreffenden Tabelle nicht zwischen Mustern mit ähnlichen Flugeigenschaften unterschieden wird (z.B. B720 und B707). Diese Tabelle ist in Anhang B – „Gruppierung der Flugzeugmuster mit ähnlichen Flugeigenschaften,, aufgeführt. Propellerflugzeuge sind in einer Kategorie zusammengefaßt, weil sie sich bezüglich der Strahlendosisraten kaum unterscheiden. Die generische Mustergruppe „JET“ wird für Flüge auf dem Muster „Unbekannt / Dummy“ angenommen.

3.2.1.10 Flugzeugtypen

Einige Eckdaten über die wichtigsten, in der Job-Expositions-Matrix aufgeführten Flugzeugtypen sind in Tabelle 3.1 zusammengefaßt. Die hier verwendeten Bezeichnungen „Kurzstrecke“, „Mittelstrecke“ und „Langstrecke“ sind nicht klar definiert. Ein Lufthansa-Pilot versteht darunter meistens Entfernungen von 1-2, 2-5 bzw. mehr als 5 Flugstunden. Diese Bezeichnungen geben hier lediglich eine grobe Orientierung zum Einsatz der Flugzeuge auf solchen Strecken.

Tabelle 3.1: Vorwiegender Einsatz der wichtigsten Flugzeugtypen

Einsatz ab	Flugzeugtyp	Entfernung
1954	Convair 340	Kurzstrecke
1954	Convair 440	Mittelstrecke
1955	Lockheed 1049	Langstrecke
1958	Viscount 814	Mittelstrecke
1960	B707	Langstrecke
1964	B727	Kurzstrecke
1968	B737	Mittelstrecke
1970	B747-200	Langstrecke
1974	DC10	Langstrecke
1976	A300	Mittelstrecke
1983	A310	Mittelstrecke
1984	DC8	Mittelstrecke
1989	B747-400	Langstrecke
1990	A320	Kurzstrecke
1990	A340	Langstrecke
1993	B757	Mittelstrecke
1995	F.27	Kurzstrecke

3.2.2 Weitere Datenquellen

3.2.2.1 Luftfahrtbundesamt

Das Luftfahrtbundesamt (LBA) vergibt in Deutschland die „Airline Transport Pilot Licence“ (ATPL) bzw. „Commercial Pilot Licence“ (CPL) an Piloten. Neben dem Namen und dem Geburtsdatum der Person wird auch die Fluggesellschaft verzeichnet, die für ihren Piloten eine Lizenz oder deren Verlängerung beantragt. Diese Informationen decken sich in großen Teilen mit den Personaldaten und eignen sich im Prinzip zu ihrer Validierung, allerdings mit der Einschränkung, daß sie nur für die letzten zehn Jahre vorliegen.

3.2.2.2 Vereinigung Cockpit und Vereinigung des Kabinenpersonals UFO

Auf die Mitgliederlisten der Pilotenvereinigung „Cockpit“ und der Vereinigung des Kabinenpersonals „UFO“ haben wir nicht zurückgegriffen.

3.2.2.3 Rentenversicherungsträger

Personaldaten für eine epidemiologische Studie könnten prinzipiell von Rentenversicherungsträgern bezogen werden. Wegen datenschutzrechtlicher Bedenken ist diese Vorgehensweise in Deutschland nicht üblich.

3.2.2.4 MOZAIC-Meßflüge

Das Forschungsprogramm „Measurement of OZone by Airbus In-service airCraft“ (MOZAIC) wird vom Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) in Toulouse, Frankreich, koordiniert. Mehrere Linienflugzeuge des Typs Airbus 340 verschiedener europäischer Fluggesellschaften wurden dazu mit fest montierten Meßgeräten ausgestattet. Sie zeichnen die Uhrzeit, geographische Position des Flugzeuges (Höhe über Null, Breiten- und Längengrade) und die Ozonkonzentration auf. Im Zeitraum August 1994 bis Dezember 1998 wurden 7644 Flüge aufgezeichnet.

Daraus können typische Flughöhenprofile für den A340 für gewisse Strecken und ihre Schwankungsbreite errechnet werden. Dieses Vorgehen gibt uns einen Anhaltspunkt für die Qualität der vom Expertenkomitee angegebenen Flughöhenprofile (vgl. Abschnitt 3.2.1.9).

3.2.2.5 Das Programm CARI

Die Strahlendosis einer Person auf einem bestimmten Flug kann mit dem Computerprogramm CARI geschätzt werden [76]. Aus epidemiologischer Sicht liegen die Vorteile der Verwendung eines solchen Programms darin, daß keine aufwendigen Messungen durchgeführt werden müssen und daß sich Strahlendosen retrospektiv mit guter Genauigkeit schätzen lassen.

3.3 Das Programm CARI

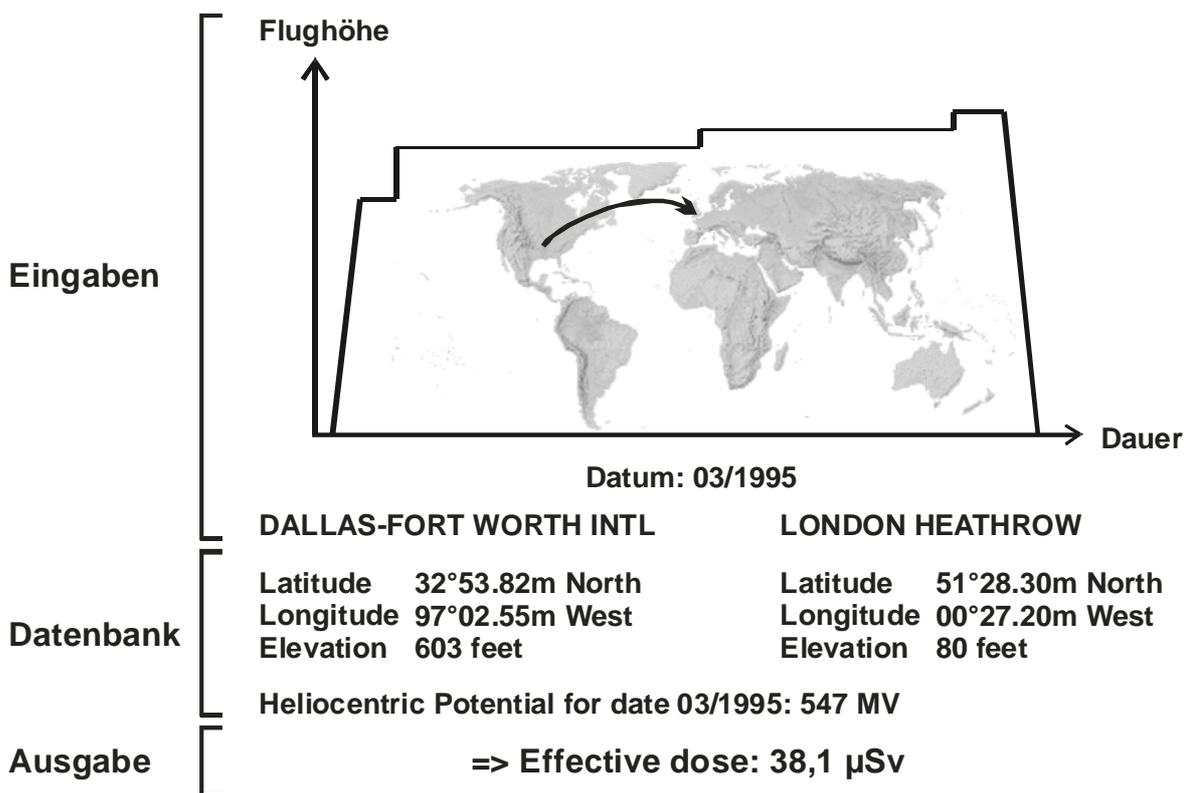
Das Programm CARI, das von der amerikanischen Federal Aviation Administration gepflegt wird, errechnet (ab Programmversion 5E) die Effektivdosis in μSv , die der menschliche Körper während eines einzelnen Fluges erhält. Es basiert einerseits auf theoretischen physikalischen Modellen der Strahlenfluenzen und Interaktionen ionisierender Strahlung mit Teilchen in der Erdatmosphäre, andererseits auf Strahlenmessungen an Bord von Flügen und Kenntnissen über die biologische Wirksamkeit verschiedener Strahlenarten (vgl. Abschnitt 2.2 „Ionisierende Strahlung,“). Die so berechnete Schätzung einer Strahlendosis korreliert sehr gut mit verschiedenen Meßergebnissen: Die Abweichungen der von CARI gelieferten Ergebnisse zu realen Meßwerten liegen im Bereich $\pm 15\%$, während die Genauigkeit von Meßergebnissen oft mit $\pm 25\%$ angegeben wird [214].

Die Bedienung von CARI ist im Vergleich zu physikalischen Programmbibliotheken (LUIN [175], FLUKA [71], EPCARD [213]) vergleichsweise einfach, da es so konzipiert wurde, daß es auch von einem interessierten Laien bedient werden kann. Als Eingaben

benötigt CARI den Start- und Zielflughafen, das Datum des Fluges, die Flugdauer und Angaben über die Verweildauern auf verschiedenen Flughöhen (Flughöhenprofil).

Abbildung 3.4 verdeutlicht die Arbeitsweise von CARI. Aus einer internen Datenbank werden die geographischen Koordinaten der Flughäfen ergänzt, sowie vorberechnete Werte der Strahlenintensität auf einem gleichmäßigen dreidimensionalen Gitter über der Erdoberfläche zur Berechnung herangezogen. Die Ausgabe ist eine Effektivdosis für den menschlichen Körper in μSv .

Abbildung 3.4: Arbeitsweise von CARI



Die Abstriche bei der Rechengenauigkeit, die für einen hohen Bedienungskomfort in Kauf genommen werden, liegen gegenüber den anderen Programmen bei ca. 4% und sind für epidemiologische Zwecke akzeptabel: CARI nimmt an, der Flug verlaufe entlang eines Kreisbogens über der Erdoberfläche („great circle path“), also auf der kürzesten geographischen Strecke. Die Strahlenintensitäten werden nicht für genau diese Strecke neu berechnet, sondern anhand von vorberechneten Werten interpoliert.

Für die Zwecke der Lufthansa-Studie ist weiterhin sehr nützlich, daß CARI Listen von Flügen aus externen Dateien einlesen kann und die Ergebnisse ebenso in einer Datei speichern kann. Eine aktuelle Version dieses Programms ist allgemein verfügbar unter:

<http://www.cami.jccbi.gov/AAM-600/610/600Radio.html>.

3.4 Schätzung individueller Dosen

Die Bestimmung individueller Strahlendosen ist eine notwendige Voraussetzung zum Nachweis einer Dosis-Wirkungs-Beziehung durch den internen Vergleich unterschiedlich hoch exponierter Gruppen von Beschäftigten. In epidemiologischen Studien wird oft versucht, anhand von individuellen Berufsbiographien auf die Belastung mit verschiedenen Noxen zu schließen. Nur in wenigen Fällen sind ausreichende Meßdaten von persönlichen Dosimetern vorhanden. In allen anderen Fällen muß die Exposition einer Person bei ihren Tätigkeiten an den verschiedenen Arbeitsplätzen geschätzt werden. Diese Aufgabe wird auf unterschiedliche Weise bewerkstelligt, z.B. mittels Expertisen von Arbeitsmedizinern, durch Befragungen langjähriger Mitarbeiter oder auch durch Nachstellung historischer Arbeitsbedingungen.

Informationen zur Berufsbiographie und relevanten Gewohnheiten (wie Rauchen und Ernährung) der untersuchten Personen werden in Fall-Kontroll-Studien in der Regel durch Interviews mit Fällen (oder nahestehenden Personen) gewonnen. In Kohortenstudien kann dagegen oft auf eine firmeninterne Dokumentation über die Einsatzorte der Beschäftigten zurückgegriffen werden (z.B. Personalakten). Die Belastungen mit verschiedenen, im voraus bekannten Noxen lassen verhältnismäßig gut rekonstruieren, da die Arbeitsabläufe, Herstellungsverfahren und Arbeitsbedingungen innerhalb eines klar umschriebenen Feldes (einzelne Firma oder Industriebranche) bekannt sind. In dieser Situation läßt sich eine Belastung genauer quantifizieren als in Fall-Kontroll-Studien, bei denen meist nur die mittlere Belastung einer ganzen Berufsgruppe herangezogen werden kann.

Die Schätzung einer individuellen Dosis bei einer großen Kohortenstudie wird erst durch den Einsatz einer *Job-Expositions-Matrix* (JEM) praktikabel, denen Abschnitt 3.5.1.3 (ab Seite 64) im Methodenteil dieses Kapitels gewidmet ist. Eine JEM ist eine Kreuztabelle mit Angaben zur Höhe der Exposition für eine Reihe von relevanten Jobs und Risikofaktoren (siehe Abbildung 3.7), die in Kombination mit Berufsanamnesen (Abbildung 3.1) zur Schätzung der individuellen Exposition dienen.

Die folgenden beiden Abschnitte beschreiben die Methode der Expositionsschätzung, die für die Lufthansa-Studie gewählt wurde, und die Validierung dieser Methode.

3.4.1 Expositionsschätzung in der Lufthansa-Studie

Ausgehend von den zugrundeliegenden Daten der Lufthansa-Studie bieten sich im Prinzip vier verschiedene Möglichkeiten an, die individuelle Strahlenexposition zu schätzen. Wie im Folgenden erläutert, erfordern zwei davon den Einsatz spezieller Software zur Berechnung von Strahlendosen.

- 1) „Logbuch Methode“: Auswertung von „persönlichen Logbüchern“ mit CARI (das genaueste Maß, „gold standard“).

- 2) „JEM-Methode“: Kombination von Berufsanamnese mit einer „Job Expositions-Matrix“ (JEM), die mit CARI aus Taschenflugplänen berechnet wurde.
- 3) Gesamtflugstunden als Surrogat für die Strahlenexposition.
- 4) Gesamtbeschäftigungsdauer (in Jahren) als Surrogat für die Strahlenexposition.

Erstere beiden Ansätze werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert. Der Vergleich dieser vier Methoden ist deshalb interessant, weil genauere Informationen nur für einen Teil der Kohorte vorliegen: Die Gesamtbeschäftigungsdauer ist für alle Mitglieder der Kohorte (ca. 25 000) bekannt, Gesamtflugstunden dagegen nur für Piloten und Flugingenieure, jedoch nicht für das Kabinenpersonal. Für einen Großteil der Piloten (ca. 4500 von insgesamt 5200) liegen Berufsanamnesen in Form von Karteikarten mit Flugstunden vor (vgl. Abschnitt 3.2.1.5), die mit der JEM-Methode ausgewertet werden können. Für 4027 aktive Piloten konnten „Persönliche Logbücher“ in elektronischer Form für die Periode von einem Jahr ausgewertet werden.

3.4.1.1 Logbuch-Methode

Piloten mußten in der Vergangenheit ein persönliches Logbuch führen, in dem alle wesentlichen Angaben eines Fluges festgehalten wurden (darunter Flugzeugtyp, Datum, Start, Ziel und Gesamtdauer). Das moderne Analogon ist eine Datenbank der Fluggesellschaft. Diese Datenquelle ist die detaillierteste, die in der Lufthansa-Studie verwendet wird.

Die uns vorliegenden Daten umfassen weder den gesamten Studienzeitraum noch alle Piloten, da die Daten nach circa sieben Jahren gelöscht werden. Statt dessen wird ein Auszug aus der Datenbank für den Zeitraum Juli 1997 bis einschließlich Juni 1998 im Rahmen der in Abschnitt 3.5.2 „Methodisch bedingte Fehler und ihre Auswirkung auf die Ergebnisse epidemiologischer Studien,“ beschriebenen Validierungsstudie verwendet. Darin sind alle 4027 in diesem Zeitraum beschäftigten Piloten eingeschlossen.

Mit dem oben beschriebenen Computerprogramm CARI kann für jeden einzelnen Flug aus den Logbuchdaten die Strahlendosis eines Piloten berechnet werden, nachdem das fehlende Flughöhenprofil ergänzt wurde (vgl. Abschnitt 3.2.1.9). Auf diese Weise kann die Gesamtstrahlendosis eines Piloten in einem Jahr als Summe seiner Einzeldosen geschätzt werden. Diese Methode ist genauer als die anderen hier vorgestellten Verfahren.

Aus dem hier verwendeten Datensatz lassen sich jährliche Flugstunden aller Piloten aufsummieren, wie sie von der JEM-Methode verwendet werden. Damit ist ein direkter Vergleich der JEM-Methode und der Logbuch-Methode möglich, dessen Ergebnisse in Abschnitt 4.5 vorgestellt werden.

3.4.1.2 JEM-Methode

Diese Methode zur Schätzung individueller Strahlendosen wurde in der Kohortenstudie für 4532 (76%) von 5965 PilotInnen und Flugingenieuren angewendet, und ist damit von zentraler Bedeutung.

Zur Schätzung individueller Strahlendosen aus den in Abschnitt 3.2.1.5 „Flugstunden,, beschriebenen Berufsbiographien (Karteikarten mit Flugstunden) werden zusätzlich zu diesen (nach Kalenderjahr und Flugzeugtyp aufgeschlüsselten) Flugstunden noch Angaben zur jeweiligen Strahlendosisrate pro Kalenderjahr und Flugzeugtyp benötigt. Die einzelnen Flugstunden, multipliziert mit den entsprechenden Dosisraten, ergeben die individuelle Strahlendosis. Die Dosisraten sind in einer Job-Expositions-Matrix tabelliert, deren Konstruktion im Folgenden erläutert wird. Solche Berechnungen lassen sich nur dann sinnvoll durchführen, wenn die Berufsanamnesen nahezu lückenlos sind. Daher konnten sie nur für 4532 von 5965 PilotInnen und Flugingenieuren durchgeführt werden.

Die Expositionsdaten der PilotInnen und Flugingenieure wurden in einer eigenen Datenbank gespeichert, deren zentrale Tabelle für jeden Piloten nach Jahr und Flugzeugtyp aufgeschlüsselte Flugstunden, analog zur Struktur der JEM enthält. Bezeichnen f den Flugzeugtyp, j das Kalenderjahr und p die Person, so bezeichne h_{fjp} die in dieser Tabelle enthaltenen Flugstunden und r_{fjp} die entsprechende, in der JEM enthaltene Strahlendosisrate. Dann sind die individuelle Dosis von p im Jahr j , $d_{jp} = h_{fjp} \times r_{fj}$ und die kumulative individuelle Dosis über die Beschäftigungsdauer $d_p = \sum_j (h_{fjp} \times r_{fj})$.

Aufgrund der unterschiedlichen Flugeigenschaften und Einsatzmöglichkeiten verschiedener Flugzeugtypen unterscheiden sich die erhaltenen Strahlendosisraten. Wie in Abschnitt 2.2.3 „Kosmische Strahlung,, beschrieben, variieren sie außerdem im Laufe der Jahre. Eine dritte Variationsquelle stellt der tatsächliche Einsatz der Flugzeuge durch die Fluggesellschaft dar, der sich im Flugplan widerspiegelt.

Die Konstruktion der JEM erfordert die Berücksichtigung dieser drei Variationsquellen. Dazu wurden historische Taschenflugpläne der Deutschen Lufthansa AG (siehe Abschnitt 3.2.1.8) ab 1960 in 5-Jahres-Schritten von Papiervorlagen in eine Datenbank übertragen. Analog zur Logbuch-Methode wurde mit dem Programm CARI für jeden Flug aus der Flugplan-Datenbank die Strahlendosis einer Person an Bord berechnet. Anschließend wurden aus den Einzeldosen mittlere Strahlendosisraten pro Jahr und Flugzeugtyp berechnet. Erst diese Möglichkeit der Berechnung erlaubt die genaue retrospektive Schätzung von Strahlendosen.

Diese Vorgehensweise geht von der Annahme aus, daß jeder Pilot etwa die gleiche Zusammensetzung von Routen fliegt, wie die im Taschenflugplan für sein Flugzeugmuster angegeben ist, wenn also keine persönlichen Vorlieben bezüglich der Flugrouten berücksichtigt werden. Die Gültigkeit dieser „Routen-Homogenitäts-Annahme“ wurde uns von verschiedenen Lufthansa-Mitarbeitern bestätigt.

Die genaue Vorgehensweise, insbesondere die Extrapolation für die nicht durch Flugpläne abgedeckten Kalenderjahre, wird in Abschnitt 3.4.2 „Imputation fehlender Werte“, beschrieben.

3.4.1.3 Gesamtflugstunden als Surrogat

Wie aus dem vorherigen Abschnitt hervorgeht, sind Gesamtflugstunden ein grobes Surrogatmaß für die individuelle Strahlendosis, denn die Unterschiede zwischen den Belastungen bei verschiedenen Flugzeugtypen bleiben unberücksichtigt. Da nicht alle PilotInnen die gleiche Anzahl Stunden pro Jahr fliegen, sind Gesamtflugstunden immerhin noch ein genaueres Surrogat als die Gesamtbeschäftigungsdauer.

3.4.1.4 Gesamtbeschäftigungsdauer als Surrogat

Die Gesamtbeschäftigungsdauer, das primitivste Surrogat für die individuelle Strahlendosis, ist – im Gegensatz zu Flugstunden – für alle Mitglieder der Kohorte bekannt.

3.4.2 Imputation fehlender Werte

Für die Expositionserfassung mit der JEM-Methode werden jährliche Flugstunden pro Flugzeugtyp benötigt. Die Karteikarten mit Flugstunden enthalten aber zum Teil – als „Vorjahre“ gekennzeichnete – agregierte Werte, aus denen jährliche Werte rekonstruiert werden müssen. Daneben fehlen auch teilweise Eintragungen, die ergänzt werden müssen, damit die JEM-Methode als Ergebnis nicht „0 mSv“ für diese Jahre liefert. Dazu werden zusätzliche Informationen über den Eintritt der Person in den Flugdienst und die Betriebsjahre einzelner Flugzeugtypen benötigt.

3.4.2.1 Agregierte Flugstunden vor ca. 1978

Ein Flugzeugtyp, für den auf der Karteikarte eines Beschäftigten Flugstunden aufgeführt sind, wurde nur in bestimmten Jahren von der Luftfahrtgesellschaft eingesetzt, so daß sich – zusätzlich zur individuellen Beschäftigungsperiode – eingrenzen läßt, in welchen Jahren die/der PilotIn oder Flugingenieur diesen Typ überhaupt geflogen sein kann (bevor jährliche Stunden für sie/ihn vorliegen).

In der Lufthansa-Studie wurden agregierte Flugstunden gleichmäßig auf die „Vorjahre“ verteilt. In den Jahren, in denen mehrere der auf der Karteikarte aufgeführten Flugzeugtypen in Frage kommen, wurden die Flugstunden auf diese Flugzeugtypen verteilt, und zwar anteilig zum Prozentsatz der auf dem jeweiligen Flugzeugtyp verbrachten Flugstunden. Die Summen dieser Flugstunden pro Flugzeugtyp entsprechen genau den auf der Karteikarte angegebenen. Die typische Karriere – erst CopilotIn und danach FlugkapitänIn – bleibt dabei unberücksichtigt.

Dieses Verfahren ist ein Kompromiß zwischen potentieller Genauigkeit und der Datenmanipulation. Die errechneten Werte sind als solche durch eine Markierung in der Datenbank kenntlich gemacht.

3.4.2.2 Vereinzelt fehlende Werte

Bei vereinzelt fehlenden Angaben über Flugstunden und Flugzeugtyp ist anzunehmen, daß der vorherige Flugzeugtyp weitergeflogen wurde und die Jahresflugstunden dem individuellen Durchschnitt aus den anderen Jahren entsprechen. Daher wird für fehlende Werte das zuletzt geflogene Flugzeugmuster eingesetzt, sowie der Mittelwert der individuellen Flugstunden der betreffenden Person über alle anderen vorhandenen Jahre. Ist das zuletzt verwendete Flugzeugmuster für ein bestimmtes Jahr nicht zulässig, weil es von der Fluggesellschaft nicht eingesetzt wurde, wird statt dessen der Typ DMY („Dummy“) eingesetzt. Das ist z.B. dann der Fall, wenn ein ausgemusterter Flugzeugtyp in einem bestimmten Jahr nicht mehr geflogen wurde. Die so erzeugten Werte sind als solche durch eine Markierung in der Datenbank kenntlich gemacht.

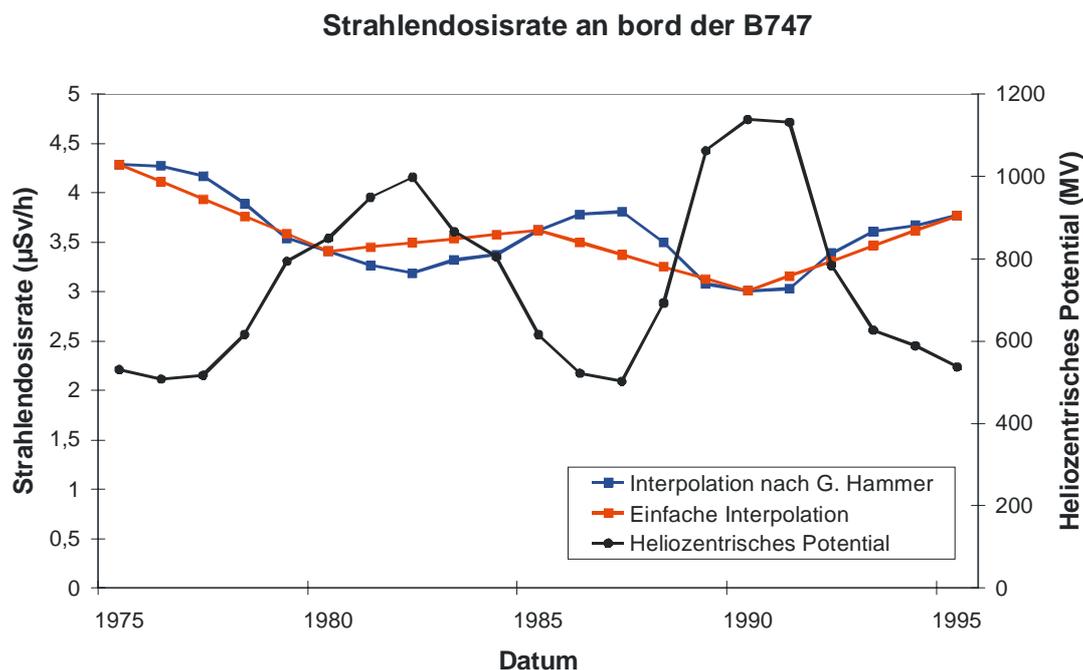
3.4.3 Konstruktion der Job-Expositions-Matrix

Es genügen wenige Abfragen in der Flugplan-Datenbank, um eine Eingabedatei für CARI (vgl. Abschnitt 3.2.2.5) zu generieren. Diese Datei wird in Teile zu je 4000 Flügen gestückelt, um sie mit CARI verarbeiten zu können. Die Ergebnisse der Berechnungen, effektive Strahlendosen für jede Teilstrecke, werden wieder in die Datenbank importiert.

Aus allen Flügen, auf denen ein bestimmter Flugzeugtyp eingesetzt wird, kann nun in wenigen weiteren Abfragen eine Strahlendosisrate pro Flugstunde auf diesem Flugzeugtyp pro Kalenderjahr berechnet werden. Im Folgenden werden die Bezeichnungen f für den Flugzeugtyp, j für das Kalenderjahr eines in der Datenbank enthaltenen Flugplans und r_{ff} für die entsprechende Strahlendosisrate verwendet. Die in der Lufthansa-Studie verwendete JEM ist die Matrix $R = (r_{ff})$. Beispiel: $r_{B747,1990}$.

Da die Flugplan-Datenbank nicht für alle Kalenderjahre Daten enthält, müssen die vorhandenen Daten bei der Konstruktion der JEM interpoliert werden. Eine einfache lineare Interpolation der Werte aus zwei fünf Jahre auseinander liegenden Flugplänen ist inadäquat, da sie keine Schwankungen der Dosisraten aufgrund der Sonnenaktivität berücksichtigt. Abbildung 3.5, ein Auszug der JEM für die B747, verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Abbildung 3.5: Interpolation von Dosisraten verschiedener Flugpläne, ohne bzw. unter Berücksichtigung der Variation des heliozentrischen Potentials



Aus der Überlegung heraus, daß sich Flugpläne mehr oder weniger kontinuierlich ändern, entstand folgendes Interpolationsverfahren: Jeder Flugplan wurde auf die vorherigen und folgenden (im Allgemeinen vier) Kalenderjahre übertragen und ebenfalls mit CARI berechnet. So ergeben sich Strahlendosisraten für die angrenzenden Jahre, die zwar die Variation der Sonnenaktivität, allerdings noch keine Änderung des Flugplans berücksichtigen. Bezeichnet k ein Kalenderjahr, so sei r_{fjk} die Strahlendosisrate für das Jahr k , die unter Verwendung des Flugplanes für das Jahr j berechnet wurde. (Beispiel: Zusätzlich zu $r_{B747,1990}$ wurden $r_{B747,1990,1991}$, $r_{B747,1990,1992}$, $r_{B747,1990,1993}$ und $r_{B747,1990,1994}$ berechnet.)

Die Strahlendosisraten in einem Kalenderjahr, für das kein Flugplan in der Datenbank enthalten ist, wurden als gewichtete Summe aus den für dieses Kalenderjahr berechneten „angrenzenden“ Flugplänen berechnet: $r_{fk} = (5-k+j)/5 \times r_{fjk} + (k-j)/5 \times r_{f(j+5)k}$. Beispiele:

$$r_{B747,1991} := 0,8 \times r_{B747,1990,1991} + 0,2 \times r_{B747,1995,1991},$$

$$r_{B747,1992} := 0,6 \times r_{B747,1990,1992} + 0,4 \times r_{B747,1995,1992},$$

$$r_{B747,1993} := 0,4 \times r_{B747,1990,1993} + 0,6 \times r_{B747,1995,1993},$$

$$r_{B747,1994} := 0,2 \times r_{B747,1990,1994} + 0,8 \times r_{B747,1995,1994}.$$

Auf diese Art und Weise werden sowohl die Variation des heliozentrischen Potentials als auch die progressive Änderung des Flugplans berücksichtigt. Genauere Berechnungen lassen sich nur nach Eingabe der Flugpläne aus den 30 fehlenden Jahren machen.

3.4.4 Validität und Genauigkeit der vorgestellten Methode

Die Genauigkeit der verwendeten Daten hat einen großen Einfluß auf die statistische Effizienz einer Studie. Überlegungen zur Kosten-Nutzen-Optimierung legen daher nahe, verschiedene Möglichkeiten der Expositionserfassung zu vergleichen. In vielen Studien läßt sich die Datenqualität nur unter erheblichem Kostenaufwand verbessern, oder es sind – wie im Falle dieser Kohortenstudie – hochwertige Daten nur für einen Teil der untersuchten Population verfügbar. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die gewählte Methode der Expositionserfassung zu validieren.

Dazu werden die Ergebnisse der JEM-Methode mit Referenzdaten, den „persönlichen Logbüchern“, verglichen. Die Validierung einer Dosisraten enthaltenden Job-Expositions-Matrix ist ein bisher in dieser Form nicht untersuchter methodischer Aspekt der Lufthansa-Studie, dem der Abschnitt (3.5.2 „Methodisch bedingte Fehler und ihre Auswirkung auf die Ergebnisse epidemiologischer Studien,“) gewidmet ist.

In der Lufthansa-Studie sind auf der Basis der vorliegenden Daten zwei Vergleiche möglich: In einem ersten Schritt wird die Situation fehlender Expositionsdaten untersucht, also der Fall, daß für einige Mitglieder der Kohorte lediglich die Gesamtbeschäftigungsdauer bekannt ist. Anhand der ersten vollständig erfaßten und überprüften „Berufsbiographien“ (Flugstunden) von Piloten und Flugingenieuren kann die Korrelation der geschätzten Gesamtstrahlendosis (mit der JEM-Methode) mit der Gesamtbeschäftigungsdauer und den Gesamtflugstunden untersucht werden. Ein Vergleich mit der anhand von Logbuchdaten geschätzten Strahlendosis (also mit der genauesten Schätzung) ist in diesem Schritt noch nicht möglich.

In einem zweiten Vergleich wird auf die in Abschnitt 3.2.1.7 vorgestellten „persönlichen Logbücher“ zurückgegriffen. Anhand dieser Daten wird die Korrelation der Ergebnisse der Logbuch-Methode mit jenen der auf die entsprechenden Flugstunden angewandten JEM-Methode und der einfachen Gesamtflugstunden untersucht.

Über die reine Feststellung einer Korrelation hinaus eignen sich die für diesen zweiten Vergleich erhobenen Daten zur Validierung der JEM-Methode und Quantifizierung ihrer Schätzfehler. Daher wird dieser Datensatz im Folgenden als „Validierungsdaten“ bezeichnet. Zur Berechnung von Schätzfehlern wird ein Fehlermodell benötigt, das im Abschnitt 3.5.2 „Methodisch bedingte Fehler und ihre Auswirkung auf die Ergebnisse epidemiologischer Studien,“ vorgestellt wird.

Dieses Fehlermodell schließt Abweichungen vom Flugplan, saisonale Änderungen des Flugplans und unterschiedliche Flugdauern auf einer bestimmten Flugroute (z.B. Frankfurt-New York) ein, nicht jedoch Fehler aufgrund der Abweichung eines Fluges vom mittleren Flughöhenprofil (vgl. Abschnitt 4.7.2) oder der Approximation durch CARI (vgl. Abschnitt 4.7.1). Letztgenannter Fehler wird von den Entwicklern von CARI auf ca. 4% beziffert. Die Abweichung vom mittleren Flughöhenprofil kann anhand der Daten des in Abschnitt

3.2.2.4 vorgestellten MOZAIC-Meßprogramms geschätzt werden, indem aus diesen Flugpositionsdaten Flughöhenprofile gewonnen werden und Strahlendosen unter Verwendung dieser sowie des mittleren Flughöhenprofils (vgl. Abschnitt 3.2.1.9) für alle Flüge berechnet werden.

3.5 Statistische Methoden

3.5.1 Statistische Methoden in der Epidemiologie

Will man die Mortalität einer besonderen Gruppe von Personen (fliegendes Personal) mit derjenigen einer externen Referenzgruppe (Allgemeinbevölkerung) vergleichen, so müssen die unterschiedlichen Verteilungen von Geschlecht, Alter und anderen bekannten Einflußfaktoren berücksichtigt werden, um verzerrte Ergebnisse zu vermeiden. Daher werden standardisierte Mortalitätsraten (SMR) verglichen, deren Berechnung in diesem Abschnitt skizziert wird. Der Nachweis einer Dosis-Wirkungs-Beziehung ist möglich, wenn standardisierte Mortalitätsraten für unterschiedlich hoch exponierte Gruppen berechnet werden.

Da jedoch nie alle Einflußfaktoren bekannt sind, und anzunehmen ist, daß die Verteilung der nicht beobachteten Faktoren zwischen Subgruppen der beobachteten Gruppe ähnlicher ist als zwischen diesen Personen und der Referenzgruppe, wird die Berechnung relativer Risiken (RR) innerhalb der beobachteten Gruppe den SMR vorgezogen. Dieser interne Vergleich erlaubt es, Unterschiede innerhalb der untersuchten Personengruppe, also eine Dosis-Wirkungs-Beziehung, zu untersuchen.

Analog zu SMR werden für Neuerkrankungen standardisierte Inzidenzraten (SIR) berechnet. Wenn keine ausreichenden Vergleichsraten zur Berechnung von SMR vorliegen, werden proportionale Mortalitätsraten (PMR) berechnet: Das Verhältnis der Mortalitätsraten für einzelne Todesursachen als Prozentsatz der Gesamtmortalität innerhalb der Kohorte zu den entsprechenden Prozentsätzen in der Vergleichspopulation.

Die Berechnung von SMR sowie RR ist in allen Lehrbüchern beschrieben, von denen [33] wegen seiner statistischen Fundiertheit die meistzitierte Referenz ist. Deshalb werden die Verfahren hier nur skizziert.

3.5.1.1 Berechnung standardisierter Mortalitätsraten

Statistische Ämter weltweit publizieren jährlich Mortalitätsraten der Landesbevölkerung, stratifiziert nach Todesursache, Geschlecht, und Altersgruppe. So läßt sich für eine bestimmte Todesursache für jedes Geschlecht eine Tafel (r_{ij}) mit Raten aufstellen, aufgeteilt nach Altersklasse i und Jahresklassen j . Diese Jahresklassen, gewöhnlich 5-Jahres-Klassen, sind nötig, weil sich die Mortalität im Laufe der Jahre ändert. Die Altersklassen sind meist auch in 5-Jahres-Gruppen unterteilt.

Während des Beobachtungszeitraums durchläuft jede Person der untersuchten Gruppe mehrere (Kombinationen von) Alters- und Jahresklassen (ij). Dieser Zeitraum endet mit dem ersten der beiden Zeitpunkte 1) in der Studie vorgesehene Datum und 2) Tod der Person. Die „Verweildauern“ der Person in den einzelnen Klassen werden als „*Personenjahre*“ (n_{ij}) bezeichnet. In der untersuchten Gruppe werden in jeder Klasse $e_{ij} = n_{ij} \times r_{ij}$ Sterbefälle erwartet, falls die entsprechenden Mortalitätsraten der Gruppe jenen der Allgemeinbevölkerung gleichen. Die Anzahl $e = \sum e_{ij}$ kann mit der Anzahl tatsächlich beobachteter Fälle $o = \sum o_{ij}$ verglichen werden. Nimmt man an, o sei Poisson-verteilt (ein seltenes Ereignis), so kann $\text{Var}(o) = e$ angenommen werden, so daß die Testgröße $t = (o - e)^2 / e$ χ^2 -verteilt ist. Auf Basis des χ^2 -Tests können statistisch signifikante Unterschiede zwischen beobachteten und erwarteten Sterbefällen nachgewiesen werden. Das Konfidenzintervall für o/e kann approximativ berechnet werden (nach Byar).

In obigem Abschnitt ist die (Strahlen-)Dosis nicht berücksichtigt worden. Die Aufteilung in Klassen läßt sich dahingehend erweitern. Es muß nunmehr auch berechnet werden, in welcher Dosis-Klasse k sich eine Person zu jedem Zeitpunkt befindet. Das Ergebnis sind – entsprechend der Anzahl der Dosis-Klassen – mehrere Werte o_k und e_k , die wie oben ausgewertet werden können (und entsprechend mehrere SMR_k). Eine Dosis-Wirkungs-Beziehung wird mit einem Trend-Test untersucht.

3.5.1.2 Berechnung relativer Risiken

Relative Risiken (im Englischen „Relative Risk“ oder „Risk Ratio“) sind Quotienten aus zwei Risiken: dem Erkrankungs- oder Sterberisiko einer (meist der exponierten) Gruppe und dem Risiko einer (meist nicht oder niedrigexponierten) Vergleichsgruppe. Im einfachsten Fall setzt man für diese Risiken die Erkrankungs- oder Sterbehäufigkeit in der jeweiligen Gruppe ein. Es genügt also eine 4-Felder-Tafel, in der die Personen als exponiert (ja/nein) und erkrankt (ja/nein) kodiert sind.

Als Erweiterung dessen werden üblicherweise Regressionsmodelle berechnet: Werden die beobachteten Individuen kategorisiert (z.B. nach Geschlecht, Altersgruppen und (Strahlen-)Belastung), so kann – wie bei den SMR – angenommen werden, die Anzahl beobachteter Fälle in jeder Kategorie sei Poisson-verteilt. Sei X die Höhe der (Strahlen-) Exposition und $P(D|X)$ die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Ereignisses (Tod), so läßt sich letztere durch

$$P(D | X=x) = \exp(\alpha_0 + \alpha_1 \times \text{Geschlecht} + \alpha_2 \times \text{Alter} + \beta \times x)$$

modellieren, wobei auch Interaktionsterme (z.B. der Form $\gamma_i \times \text{Alter} \times X$) eingeschlossen werden können.

Im einfachen Fall eines binären Expositionsmodells wird das Risiko für das Auftreten eines Ereignisses gegeben die Exposition ($X = 1$) relativ zum Risiko bei Abwesenheit von Exposition ($X = 0$) wie oben als Quotient berechnet:

$$RR = P(D | X=1) / P(D | X=0) = \exp(\beta)$$

Da der Schätzer des Parameters β bei der Regression als normalverteilt angenommen wird, lassen sich die Grenzen des Konfidenzintervalls des RR durch Exponenzierung aus jenen von β errechnen. Das relative Risiko bezieht sich immer auf eine „Doseinheit“, unabhängig davon, ob die Exposition x binär kodiert ist ($x = 0$ bzw. $x = 1$) oder als stetige Größe. Wird die Exposition z.B. in Sv gemessen, so wird das RR pro Sv berechnet.

In der Diskussion um Dosis-Wirkungs-Beziehungen sind zwei weitere, mit Risikomodelle eng verknüpfte Effektmaße von Bedeutung: Das „Excess Relative Risk“ (ERR), definiert als

$$RR(x) = 1 + ERR(x),$$

und das in der Strahlenepidemiologie verwendete „Dose and Dose Rate Effectiveness Factor“ (DDREF), das die relativ geringere Wirksamkeit niedriger gegenüber höheren Dosisraten (und Expositionszeiträume) bei gleicher Gesamtdosis beschreibt.

Die Diskussion um die korrekte Modellierung des relativen Risikos in der Strahlenepidemiologie ist noch nicht abgeschlossen [41]. Im Niedrigdosisbereich wird oft ein linearer Zusammenhang zwischen Strahlendosis und Wirkung angenommen, aber auch ein linear-quadratisches Modell läßt sich auf viele Daten anpassen. Weiterhin werden Schwellenwertmodelle (engl. „threshold models“) diskutiert: Unterhalb einer bestimmten Schwellendosis könnten die Reparaturmechanismen innerhalb der Zellen durch Strahlung verursachte Schäden beheben. Dazu merkt der jüngste UNSCEAR-Bericht [248] an, es sei unwahrscheinlich, daß dabei eine vollständige, fehlerfreie Reparatur stattfindet, und es komme daher immer zu Zellschäden. Diese Fragestellung ist epidemiologisch nicht zu beantworten; sie ist Gegenstand der Strahlenbiologie.

3.5.1.3 Methoden der Expositionserfassung: Job-Expositions-Matrizen

Job-Expositions-Matrizen (JEM) zur Erfassung berufsbedingter Expositionen werden seit Beginn der 80er Jahre in berufsepidemiologischen Studien eingesetzt [105] [42;131;178]. Die Vorteile dieser Matrizen liegen in der vergleichsweise einfachen und damit kostengünstigen Erstellbarkeit aus der Berufsanamnese von Studienteilnehmern, besonders wenn die individuelle quantitative Expositionsmessung in großen Studien technisch und finanziell unmöglich ist.

Eine JEM ist eine tabellarische Darstellung der Höhe der Exposition. Sie ist aufgeschlüsselt nach den untersuchten Risikofaktoren und verschiedenen Tätigkeiten (Jobs). Diese Tabelle enthält Expositionswerte, die nicht für einzelne Individuen gelten, sondern durchschnittliche Expositionen für die aufgeführten Tätigkeiten darstellen. Zu den beiden Dimensionen „Job“ und „Noxen“ kommen oft die Dimensionen „Zeit“ und „Standort“ hinzu [131], denn die Belastung variiert über die Zeit und zwischen Standorten (andere/neue Herstellungsverfahren, besserer Arbeitsschutz).

Abbildung 3.6: Schema einer JEM

		Jobs				
		Job 1	Job 3	Job <i>n</i>
Expositionen	Risikofaktor 1					
	Risikofaktor <i>m</i>			ja/nein		

Anhand der Berufsbiographie einer Person und einer passenden JEM wird eine Schätzung der individuellen Exposition vorgenommen, indem die Belastung dieser Person für jede in der Berufsbiographie aufgeführte Tätigkeit in der JEM nachgeschlagen wird. Damit kann eine individuelle quantitative Expositionsmessung in großen Studien – sofern Berufsbiographien vorhanden sind – vergleichsweise schnell und kostengünstig durchgeführt werden.

Die Einträge der JEM können – je nach Anforderungen und Datenlage – unterschiedlicher Natur sein: binär (d.h. exponiert ja/nein), Expositionshöhen (z.B. nicht / schwach / hoch), Expositionswahrscheinlichkeiten, durchschnittliche Dosen oder mittlere Dosisraten pro Zeit. Dementsprechend unterschiedlich werden die Ergebnisse der Expositionserfassung ausgewertet.

Die in der Lufthansa-Studie verwendete Job-Expositions-Matrix erfasst nur eine Noxe (kosmische Strahlung), unterscheidet bei den „Jobs“ zwischen verschiedenen Flugzeugtypen und bezieht Kalenderjahre mit ein. Ihre Einträge sind Strahlendosisraten (μSv pro Flugstunde). Das Schema dieser JEM zeigt die folgende Abbildung 3.7. Für die untersuchten Personen wird die Berufsbiographie aus Personalakten erfasst, und mit Hilfe der JEM wird dann eine Schätzung der individuellen Exposition vorgenommen.

Abbildung 3.7: Schema der JEM der Lufthansa-Studie

	CV40	B707	B727	B747	A300	A320	A340
1960							
1965							
1970							
1975	$r \mu\text{Sv/h}$			
1980							
1982							
1990							
1995							

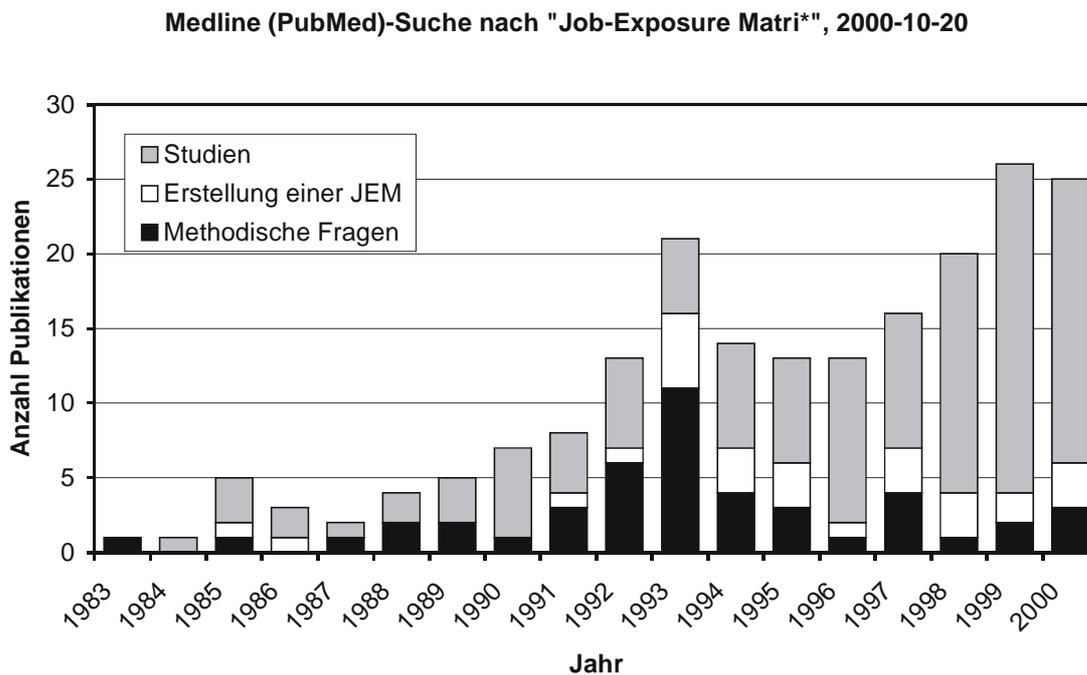
Zu den grundlegenden Eigenschaften von JEM zählt neben der Einfachheit in ihrer Anwendung, daß sie weitgehend frei von differentiellen Meßfehlern sind, d.h., daß das Ergebnis der Expositionsschätzung nicht davon abhängt, ob die ProbandInnen erkrankt (bzw. verstorben) sind oder nicht. Beruht die Expositionserfassung nicht auf bestehenden Datenquellen sondern z.B. auf persönlichen Interviews mit Erkrankten, nahen Verwandten oder Kontrollpersonen, leiden die Ergebnisse unter den als „Erinnerungs-“ und „Interviewer-Bias“ bekannten Verzerrungen: Ein erkrankter Proband wird sich mit seiner Krankheit und möglichen Ursachen beschäftigt haben und sich daher besser an mögliche Expositionen erinnern als eine Vergleichsperson. Auch InterviewerInnen können durch die Art und Weise ihrer Fragestellung die Ergebnisse der Expositionserfassung verzerren [83].

Der gravierendste Nachteil von JEM ist methodisch bedingt: Da die Expositionen lediglich summarisch erfaßt werden, leidet die Präzision der Ergebnisse. Diesen Beschränkungen kann zum Teil durch eine genauer aufgeschlüsselte JEM im Hinblick auf Zeitperioden und Tätigkeiten entgegengewirkt werden [131]. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der Validierung der eingesetzten JEM, um die Genauigkeit der Schätzung zu quantifizieren.

Obwohl JEM in den letzten Jahren in der Epidemiologie zunehmend eingesetzt werden (vgl. Abbildung 3.8), liegen bisher wenig methodische Arbeiten vor, in denen untersucht wurde, wie ihr Einsatz optimiert werden kann [1]. Nicht untersucht wurde z.B. bisher, welchen Einfluß die – methodisch bedingten – Meßfehler in der JEM auf die Gesamtergebnisse der Kohortenstudie haben.

In der Lufthansa-Studie ermöglicht ein zweistufiges Studiendesign die Erfassung der Meßfehler und die Validierung der JEM. Der nächste Abschnitt beschreibt entsprechende Methoden; numerische Ergebnisse finden sich in Abschnitt 4.8.

Abbildung 3.8: Publikationen, in denen eine JEM verwendet oder untersucht wurde (Suche in MedLine im Oktober 2000)



3.5.2 Methodisch bedingte Fehler und ihre Auswirkung auf die Ergebnisse epidemiologischer Studien

Die statistische Effizienz einer Studie hängt in besonderem Maße von der Qualität der vorhandenen Daten ab. Fehler in den beobachteten Größen sind jedoch trotz aller Bemühungen sowohl bei der Planung als auch bei der Durchführung einer epidemiologischen Studie unvermeidbar. Oft lassen sich Größen nicht genau erfassen, wie z.B. das Rauchverhalten, oder sie lassen sich retrospektiv schwer schätzen. Aber auch die verwendete Methode der Expositionserfassung kann einen Schätzfehler bedingen. Obwohl diese Tatsachen im Bereich der Physik bekannt sind, ist ihnen in der Epidemiologie erst in den letzten 20 Jahren Beachtung geschenkt worden. Insbesondere ist über die Eigenschaften von Job-Expositions-Matrizen bisher wenig bekannt.

Die Literatur zu Meßfehlern in der Epidemiologie beschäftigt sich mit zwei großen Themenkomplexen: Kalibrierungsstudien und Validierungsstudien. Das Ziel von Kalibrierungsstudien ist die Korrektur der Werte eines (ungenauen, aber praktischen) Meßinstruments anhand des Wissens über den Zusammenhang dieser Werte mit den „wahren“ Werten, die mit einer aufwendigeren Methode gemessen wurden. Validierungsstudien beschränken sich auf die Quantifizierung des Meßfehlers des verwendeten Instruments. Für beide Arten von Studien werden dem jeweiligen Fehlermodell angepaßte Verfahren zur Korrektur der Effektmaße und ihrer Konfidenzintervalle entwickelt.

Obwohl der Einsatz von Job-Expositions-Matrizen in den letzten Jahren in der Epidemiologie gestiegen ist, wurden bisher wenig methodische Arbeiten durchgeführt, in denen untersucht wurde, welchen Einfluß die methodisch bedingten Meßfehler in der JEM auf die Ergebnisse der Kohortenstudie haben.

Dieses Kapitel befaßt sich mit der speziellen Form von JEM, die in der Lufthansa-Studie verwendet wird. Diese JEM enthält ausschließlich Dosisraten, also die Belastung mit einer Noxe pro Zeiteinheit der Beschäftigung. Mit einer Simulationsstudie werden in einem ersten Schritt generelle Eigenschaften dieser JEM im Zusammenhang mit Meßfehlern untersucht. In einem zweiten Schritt wird die Auswirkung der in Abschnitt 4.7 quantifizierten Schätzfehler in der Lufthansa-Studie analysiert.

3.5.2.1 Meßfehler und ihre Behandlung

Im Kontext einiger epidemiologischen Studien lassen sich Informationen über Risikofaktoren auf mehrere Arten mit unterschiedlichem zeitlichen und finanziellen Aufwand gewinnen, so daß sich die Frage stellt, welches die geeignetste Methode ist. Solche Unterschiede sind:

- einfaches oder mehrfaches Blutdruckmessen bei Probanden
- in der Ernährungsepidemiologie: die Befragung von Probanden nach Ernährungsgewohnheiten oder das Protokollieren aller verzehrten Speisen über einen bestimmten Zeitraum.

Aus Kostengründen wird bei großen Studien oft eine zweistufige Vorgehensweise zur Validierung oder Kalibrierung der Expositionsdaten eingesetzt: Für alle Studienteilnehmer wird das kostengünstigere Verfahren eingesetzt und für eine Untergruppe zusätzlich ein genaueres, aufwendigeres [106]. Anhand eines geeigneten Modells kann der Bezug zwischen der genauen Messungen (oder „wahrem Wert“) X und der einfacheren Messung Z präzisiert werden. Eine solche Validierungs- oder Kalibrierungsstudie soll grundsätzlich schon im Design der Hauptstudie mitgeplant werden [238].

So ist man bei Kalibrierungsstudien in der Lage, für alle Probanden den Erwartungswert von X , gegeben die einfache Messung Z , $E(X|Z)$, anzugeben, um mit diesem Wert unverfälschte Risikoschätzer zu berechnen. Eine gute Einführung dieser Methode geben die Artikel von Rosner und anderen [206-208;220]. Für den Fall der logistischen Regression von X bzw. Z auf eine Zielgröße Y gibt [240] eine umfassende Übersicht verschiedener Verfahren.

Das Ziel von Validierungsstudien ist der Nachweis der Validität der Messungen bzw. Schätzungen Z und die Quantifizierung der Meßfehler $X-Z$. Verschiedene statistische Methoden für die Analyse von Meßfehlern stehen zur Verfügung [39]. Bisher wurde allerdings nur in wenigen Arbeiten (z.B. [23;106]) untersucht, wie eine Validierungsstichprobe effizient durchgeführt werden kann.

In vielen dieser Arbeiten wird ein einfaches, klassisches Fehlermodell verwendet, und es werden einige Normalitäts- und Unabhängigkeitsannahmen über die Variablen getroffen. Während das *klassische Fehlermodell* davon ausgeht, daß der Wert der ungenauen Messung Z um den wahren Wert X schwankt ($Z = X + \epsilon$ mit einem Meßfehler ϵ), wird im *Berkson-Fehlermodell* angenommen, daß der individuelle wahre Wert X um einen Mittelwert Z schwankt ($X = Z + \epsilon$), wie z.B. die exakte Laufzeit einer Küchenuhr, wenn sie auf 5 Minuten eingestellt wird. Letzteres Modell wird immer dann verwendet, wenn fehlende Meßwerte durch einen Mittelwert imputiert werden. (In einer Studie über häusliche Radonbelastung kann z.B. die ungemessene Strahlenbelastung in einem bestimmten Haus durch den Mittelwert der Meßwerte der Nachbarhäuser ersetzt werden.)

In beiden Fehlermodellen werden die Schätzer der Parameter einer Regression $Y = f(X)$ durch den Meßfehler ungenauer, d.h. die Konfidenzintervalle werden breiter. Während die Schätzer der Parameter einer Regression $Y = f(X)$ im klassischen Fehlermodell im Allgemeinen in Richtung Null verzerrt werden, ist dies bei Berkson-Fehlern, zumindest bei der linearen Regression, nicht der Fall [39]. Fehlspezifizierte Fehlermodelle können bei Berkson-Fehlern zur Verzerrung der Regressionsparameter in verschiedene Richtungen führen. Weitergehende Quellen zu Meßfehlermodellen sind z.B. die Lehrbücher von Carroll und anderen [39;40] und die Arbeiten von [9;15;38;106;182;207;221;238].

Ein eleganter Ansatz zur Korrektur der Regressionsschätzer und ihrer Varianzschätzer im Falle der linearen und logistischen Regression, der die klassischen und Berkson-Fehler verbindet, wird in [194] vorgestellt. Er wurde im Rahmen einer Studie über häusliche Radonbelastung entwickelt und angewandt.

Die Verwendung einer Dosisraten enthaltenden JEM, wie sie hier verwendet wird, führt zu einem Berkson-Fehler, denn individuelle Dosisraten weichen in der Regel von dem in der JEM enthaltenen Wert ab, der als Mittelwert für eine ganze Gruppe von Piloten berechnet wurde. Diese Arbeit beschränkt sich aufgrund der schwierigen Handhabbarkeit des in Abschnitt 3.5.2.3 vorgestellten Fehlermodells auf eine Sensitivitätsanalyse, die einen Einblick in die zu erwartenden Verzerrungen der Risikoschätzer der epidemiologischen Studie gibt, ohne eine analytische Angabe über Korrekturfaktoren zu machen. Im Falle der Lufthansa-Studie erweist sich dieses Vorgehen als ausreichend.

3.5.2.2 Schätzfehler bei der Verwendung von Job-Expositions-Matrizen

Das flexible Konzept der Job-Expositions-Matrix erlaubt es, verschiedene Arten von Expositions-Information in einer Tabelle zusammenzufassen. Diese Angaben spiegeln die durchschnittliche Belastung mit Noxen für die betrachteten Tätigkeiten wider, so daß die tatsächliche Exposition eines Individuums immer davon abweicht. Aus der Natur der Daten der JEM ergeben sich unterschiedliche Schätzfehler [83].

Enthält eine JEM z.B. Expositionswahrscheinlichkeiten, führt das zu dem Problem der möglichen Mißklassifikation der individuellen Exposition, da einzelne Personen fälschlicherweise als exponiert (oder nicht exponiert) eingestuft werden. Die Eigenschaften solcher JEM wurden bereits in [32] untersucht. Ein ähnliches Phänomen tritt bei JEMs mit ordinaler Expositionsinformation auf (z.B. nicht-, niedrig-, hochexponiert), siehe [132;178].

In verschiedenen Studien, in denen eine JEM mit kategoriellen Einträgen verwendet wurde, wurde untersucht, wie gut das Ergebnis der Klassifizierung der Exposition durch die JEM mit derjenigen durch die Probanden oder durch Experten (Arbeitsmediziner, etc.) übereinstimmt [2;72;99;125;132;143;150;179;184;226;233]. Die Motivation dieser Art von Untersuchung ist die Validierung des Einsatzes von JEM, der gerade bei Fall-Kontroll-Studien einige Vorteile gegenüber klassischen Interview hat (vgl. Abschnitt 3.5.1.3 „Methoden der Expositionserfassung: Job-Expositions-Matrizen,,). Die Klassifikation der Experten gilt stets als „gold standard“.

In der Lufthansa-Studie kommt eine JEM zum Einsatz, die keine kategoriellen Expositionswerte enthält, sondern stetige (Strahlen-)Dosisraten pro Arbeitsstunde, so daß sich die Art der damit verbundenen Schätzfehler und die (in Abschnitt 3.4.2 vorgestellte) Vorgehensweise zur Validierung der JEM vom oben beschriebenen Fall deutlich unterscheiden.

3.5.2.3 Fehlermodell für die hier verwendete Form von Job-Expositions-Matrizen

Entsprechend der zur Verfügung stehenden Expositionsdaten enthält die hier verwendete JEM mittlere Dosisraten pro Flugzeugtyp und Kalenderjahr (Abschnitte 3.4.1.2 „JEM-Methode,, und 4.2.2.3 „Verteilung der ausgewerteten Daten,,).

Diese Form von JEM eignet sich für jede Studie, bei der Dosisraten der Exposition angegeben werden können, z.B. wenn die Exposition aus betrieblichen Gründen protokolliert wird oder für einen Standort leicht rekonstruiert werden kann. Aus diesem Grund ist die Untersuchung der Eigenschaften einer solchen JEM nicht nur für die Lufthansa-Studie interessant. Die Auswirkung der inhärenten Schätzfehler dieser Methode auf die Parameter der (für epidemiologische Zwecke interessanten) logistischen und der Poisson-Regression werden hier untersucht.

Das hier vorgestellte Fehlermodell unterscheidet sich dadurch von gängigen Modellen, daß die Varianz des Fehlers mit steigenden Exposition (hier: Flugstunden) wächst. Nur im Falle einer kleinen Varianz des Fehler läßt sich dieses Modell durch Logarithmierung auf ein einfacheres reduzieren, das z.B. in [194] behandelt wird.

Aus den Grundgrößen

Individuelle Flugstunden h (extern gegeben, also fest)

Individuelle Dosisrate $R = \mu_R + \varepsilon$ mit $\varepsilon \sim N(0, \sigma_R^2)$

berechnen sich, betrachtet man ein einzelnes Jahr aus der Karriere einer PilotIn,

$$\text{Geschätzte Dosis (JEM)} \quad X_S = h \times \mu_R$$

$$\text{Tatsächliche Dosis} \quad X_T = h \times R$$

Woraus sich folgender Zusammenhang ergibt:

$$X_T = h \times R = h \times (\mu_R + \varepsilon) \Rightarrow X_T = X_S + h \times \varepsilon$$

(Bezogen auf eine gesamte Karriere summieren sich diese Terme. Das Fehlermodell bleibt im wesentlichen gleich.)

Aus diesem Zusammenhang läßt sich ersehen, daß der Fehler in diesem Modell, $h \times \varepsilon$, ein Berkson-Fehler ist. Die tatsächliche Strahlendosis X_T einer/s PilotIn mit h Flugstunden ist gleich der mittleren Dosis X_S einer/s PilotIn mit h Flugstunden plus eine individuelle Abweichung $h \times \varepsilon$. Im Unterschied zu einfachen Modellen steigt die Varianz dieser Abweichung mit steigender Anzahl Flugstunden h .

Eine Parallele zu gängigen Fehlermodellen läßt sich leicht herstellen: Betrachtet man logarithmierte Werte

$$Z_T = \text{Log}(X_T) = \text{Log}(h) + \text{Log}(R) = \text{Log}(h) + \text{Log}(\mu_R + \varepsilon)$$

$$Z_S = \text{Log}(X_S) = \text{Log}(h) + \text{Log}(\mu_R)$$

so ergibt sich für Meßfehler mit kleiner Varianz ein einfaches Modell mit Berkson-Fehler:

$$Z_T = Z_S + \text{Log}(1 + \varepsilon/\mu_R) \approx Z_S + \text{Log}(\exp(\varepsilon/\mu_R)) = Z_S + \varepsilon/\mu_R$$

$$Z_T = Z_S + \eta \text{ mit } \eta \sim N(0, \sigma_\eta^2)$$

In der Tat wird bei Studien über Radonexposition oft angenommen, die Dosisrate sei log-normalverteilt, also $R = \mu_R \times \varepsilon$, was zu $Z_T = Z_S + \varepsilon$ führt.

Aus den Validierungsdaten lassen sich auf individueller Ebene die tatsächliche Dosis x_{Ti} schätzen und die Flugstunden h_i aufsummieren, anhand deren (und der JEM) die geschätzte Dosis x_{Si} ermittelt werden kann. Daraus wird der Fehler $\varepsilon = (X_T - X_S) / h$ berechnet.

Wie oben angemerkt, variiert die Varianz des hier betrachteten Meßfehlers mit der Meßgröße. Ein solcher Fehler wird *heteroskedastisch* genannt, andernfalls (bei gleichbleibender Varianz) *homoskedastisch*. Folgende, recht allgemeine Beispielrechnung verdeutlicht den Effekt eines heteroskedastischen Meßfehlers auf den Risikoschätzer β .

Wie oben bezeichnen

X_S ein fehlerhaft gemessenes Surrogat

X_T die nicht gemessene, echte Größe

sowie

Y einen Risikoschätzer, der z.B., gegeben X_T , Poisson-verteilt ist:

$$Y | X_T \sim \text{Poisson}(\lambda X_T)$$

was zu einer loglinearen Linkfunktion führt:

$$E(Y | X_T) = \exp(\beta_0 + \beta \cdot X_T)$$

Betrachtet man die bedingte Verteilung von X_T gegeben X_S , und geht man dabei von einem normalverteilten Berkson-Fehler aus, so hat man

$$X_T | X_S \sim N(\mu_{X_S}; g(X_S))$$

wobei $g(X_S)$ die (nicht konstante) Varianz des Meßfehlers bezeichnet. Über die momenterzeugende Funktion gelangt man zu der Formel

$$E(Y | X_S) = \exp(\beta_0 + \beta \cdot X_S + \frac{1}{2}\beta^2 \cdot g(X_S))$$

Die Formeln für den Erwartungswert von Y gegeben X_T bzw. X_S unterscheiden sich also um den Term $\frac{1}{2}\beta^2 \cdot g(X_S)$.

Im Falle eines homoskedastischen Fehlers, also $g(X_S) = \sigma^2$, ist der Erwartungswert von $Y \exp(\beta_0 + \beta \cdot X_S + \frac{1}{2}\beta^2 \cdot \sigma^2) = \exp(\beta_0 + \beta \cdot X_S)$, d.h. der Risikoschätzer β ist unverzerrt.

Im Falle eines heterokedastischen Fehlers hingegen, z.B. $g(X_S) = X_S$, ist der Erwartungswert der beobachteten Daten $\exp(\beta_0 + (\beta + \frac{1}{2}\beta^2) \cdot X_S)$. In diesem Beispiel wird aus den fehlerbehafteten Daten nicht β sondern $\gamma = \beta + \frac{1}{2}\beta^2$ geschätzt; das Modell ist fehlspezifiziert. Daraus wird deutlich, daß der fehlerbehaftete Schätzer γ nicht einmal das gleiche Vorzeichen wie β haben muß.

Die Verzerrung des Risikoschätzers der epidemiologischen Studie β durch den Schätzfehler wird durch eine Simulationsstudie in Abschnitt 4.8 „Einfluß der Fehler bei der Expositionsschätzung auf die Risikoschätzer in der Lufthansa-Studie,“ untersucht.

3.6 Zusammenfassung

Zum Nachweis einer Beziehung zwischen der Strahlendosis und der Häufigkeit des Auftretens einzelner Erkrankungen ist eine gute Quantifizierung der individuellen Strahlenexposition nötig. In einer großen historischen Kohortenstudie wird diese retrospektive Schätzung erst durch den Einsatz einer Job-Expositions-Matrix praktikabel.

Die Erstellung der JEM orientiert sich an den verwertbaren berufsbiographischen Daten, im Falle der Lufthansa-Studie an Karteikarten mit Angaben zu Flugstunden, aufgeschlüsselt nach Jahr und Flugzeugtyp. Entsprechend enthält die JEM durchschnittliche, jährliche Strahlendosisraten für jeden Flugzeugtyp. Zur Erstellung der JEM wurden Taschenflugpläne der Deutschen Lufthansa AG aus den Jahren 1960 bis 1995 verwendet. Für jeden einzelnen darin enthaltenen Flug wurde mit einer Software eine Strahlendosis

berechnet, und anschließend wurden nach Häufigkeit der Flüge gewichtete Mittelwerte gebildet.

Anhand dieser Durchschnittswerte wurden individuelle Strahlenbelastungen geschätzt, die von den tatsächlichen Belastungen abweichen. Dieses Problem betrifft alle Studien, die eine Job-Expositions-Matrix verwenden. Zur Qualitätssicherung der Expositionserfassung gehört daher eine Quantifizierung des Schätzfehlers, vergleichbar mit der Angabe eines physikalischen Meßfehlers. In der Lufthansa-Studie wurde dazu ein Datensatz mit einer detaillierten Auflistung von einzelnen Flügen verwendet.

Zur Qualitätssicherung gehört weiterhin die Beschreibung des Einflusses des Meßfehlers auf die weiteren Ergebnisse der Studie. Obwohl der Einsatz von Job-Expositions-Matrizen in den letzten Jahren in der Epidemiologie gestiegen ist, wurden bisher wenig methodische Arbeiten durchgeführt, in denen der Einfluß des methodisch bedingten Meßfehlers bei Verwendung einer JEM untersucht wurde. Das hier vorgestellte Fehlermodell bildet die Grundlage für entsprechende Simulationsstudien.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zunächst die Daten und die Methoden zur Ergänzung von fehlenden Werten vorgestellt. Anschließend werden die Job-Expositions-Matrix und die Ergebnisse der Expositionserfassung beschrieben. Es folgen die Auswertung der Validierungsdaten und die Ergebnisse der Validierungsstudie. Schließlich werden die Ergebnisse einer Simulationsstudie zum Effekt der Fehler der Methode auf die Schätzer der epidemiologischen Studie präsentiert.

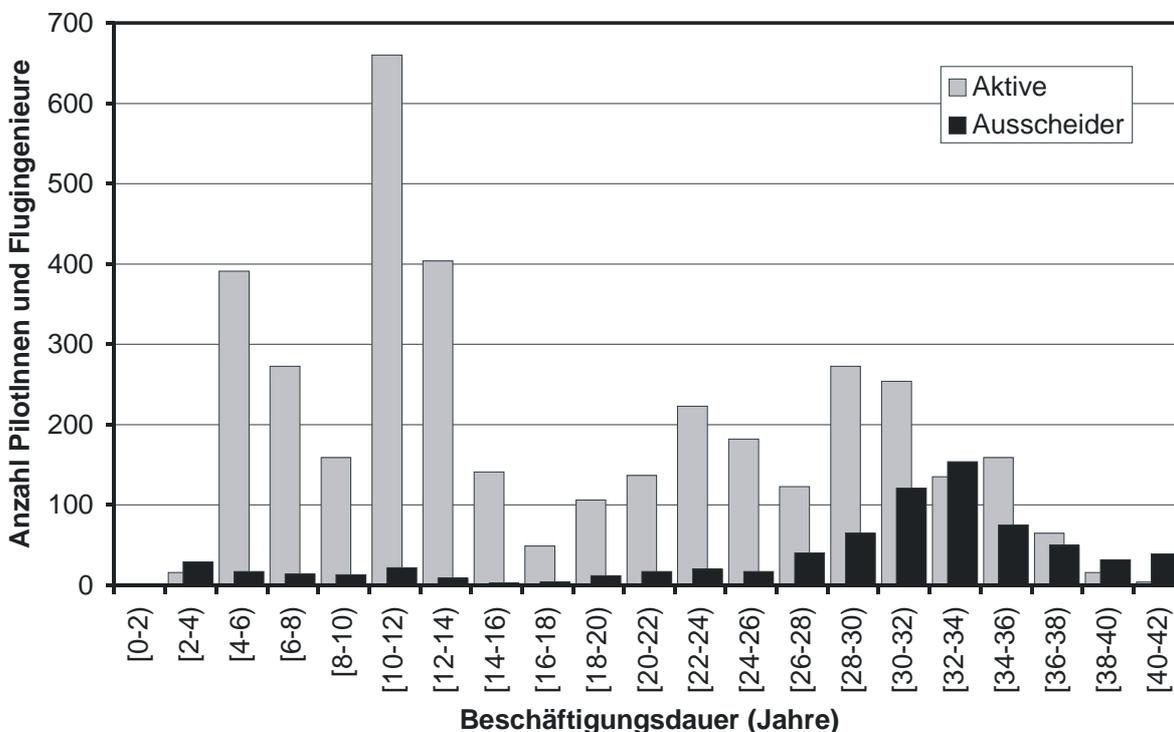
4.1 Beschäftigungsdauer

Die Gruppe der PilotInnen und Flugingenieure besteht zum 31.10.2000 aus insgesamt 5965 Menschen. Für 4274 Aktive und 1691 Ausgeschiedene unter ihnen wurden Flugstunden erfaßt. Die durchschnittliche Beschäftigungsdauer beträgt ca. 29 Jahre, streut aber stark (Tabelle 4.1 und Abbildung 4.1).

Tabelle 4.1: Beschäftigungsdauer (Jahre)

	Anzahl	Median	Mittelwert	Std. Abw.
Aktive	4274	9,55	13,8	9,8
Ausscheider	1691	29,2	25,7	10,0

Abbildung 4.1: Histogramm der Beschäftigungsdauer



4.2 Individuelle Flugstunden

Die Daten über Flugstunden lagen ursprünglich nur in Form von Karteikarten vor, die manuell aus Ausdrucken des Abrechnungssystems CALSY übernommen wurden. Für die Ausscheider bis ca. 1997 liegen Flugstunden nur in dieser Form vor. Die Karteikarten der Aktiven werden zur Zeit bei der Lufthansa in eine Datenbank übertragen, in der seit 1996 automatisch die Daten aus CALSY eingelesen werden. Beide manuellen Schritte sind sehr zeitintensiv, so daß bis jetzt weder alle Daten nach 1992 von den Ausdrucken auf die Karteikarten, noch alle Karteikarten in die Datenbank übertragen wurden. So entsteht eine Lücke in den Expositionsdaten für den Zeitraum 1992 bis 1995.

Für die Lufthansa-Studie wurden sämtliche nicht übertragene Karteikarten (vgl. Abbildung 3.1) kopiert und eingegeben. Die elektronischen Daten wurden anschließend hinzugefügt, so daß die Daten schließlich in einem Format bereitlagen, das in Tabelle 4.2 beispielhaft dargestellt ist.

Tabelle 4.2: Expositionsdaten des 1962 eingestellten Piloten mit Studien-Nr. 113110

Jahr	Funktion	Flugzeug	Blockstunden
< 1978	FO	B707	2148
< 1978	FO	B737	297
< 1978	FO	LO45	584
< 1978	CP	B737	4386
< 1978	CP	A300	389
1978	CP	A300	531
1979	CP	A300	505
1980	CP	A300	496
1981	CP	A300	477
1982	CP	A300	426
1983	CP	A300	381
1984	CP	A300	402
1985	CP	A300	357

Jahr	Funktion	Flugzeug	Blockstunden
1986	CP	A300	487
1987	CP	A300	125
1987	CP	A310	278
1988	CP	A310	479
1989	CP	A310	243
1989	CP	DC10	155
1996	CP	DC10	534
1997	CP	DC10	316

4.2.1 Personen mit vollständig fehlenden Flugstunden

Um die Vollständigkeit der Daten über Flugstunden zu überprüfen, wurde die Flugstunden-Datenbank mit den Stammdaten der epidemiologischen Studie verglichen. Daraus geht hervor, daß Angaben über Flugstunden bei 890 (53% von 1691) ausgeschiedenen PilotInnen und Flugingenieuren vollständig fehlen.

Tabelle 4.3: PilotInnen mit und ohne Angaben zu Flugstunden

	ohne (jedwede) Angaben	mit Angaben	Σ
Aktive	61	4213	4274
Ausscheider	890	801	1691
Σ	951	5014	5965

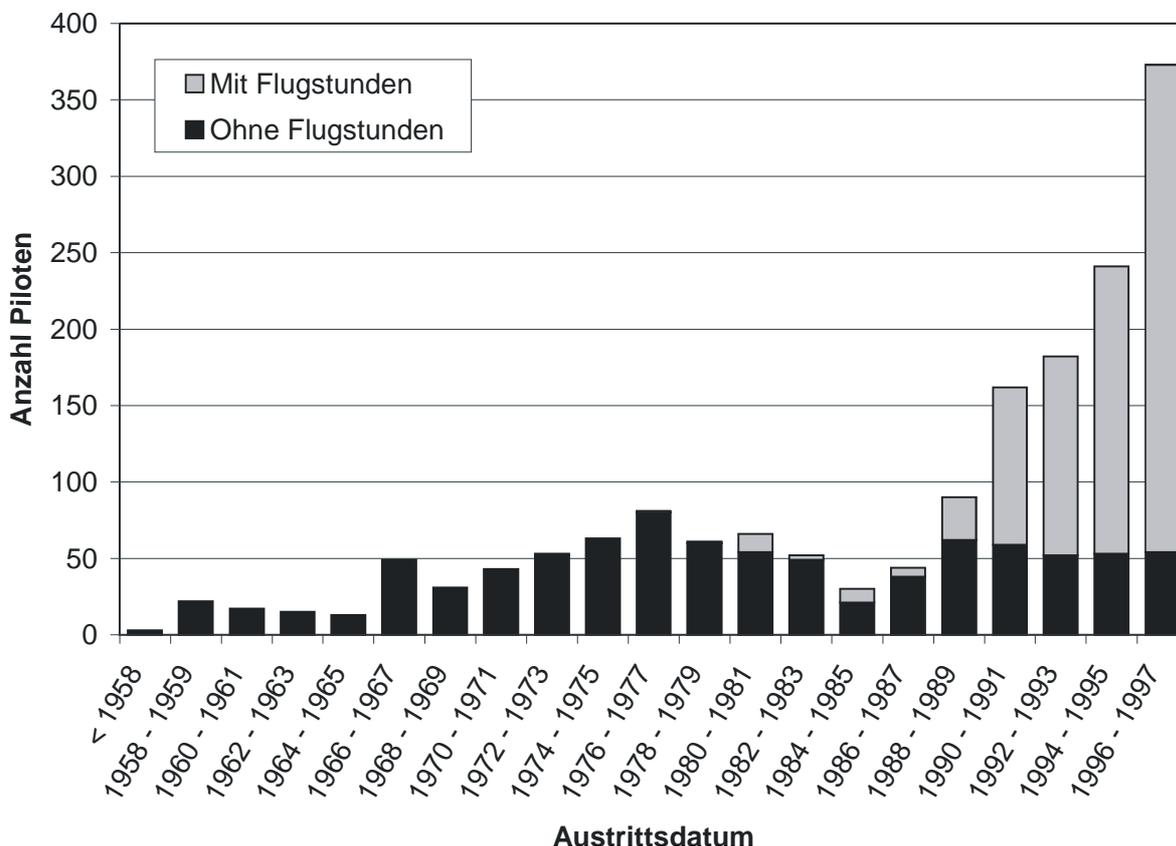
Der Vergleich der Ausscheider ohne Flugstunden mit den anderen zeigt, daß diese Gruppe im Schnitt 5 Jahre älter ist und die Beschäftigten ein früheres Austrittsdatum (14 Jahre) sowie eine geringere Gesamtbeschäftigungsdauer (13 Jahre) haben.

Tabelle 4.4: Vergleich der Ausscheider mit und ohne Angaben zu Flugstunden

Merkmal	ohne Angaben			mit Angaben		
	N	Mittelwert (Datum/Jahre)	Std.-Abw. (Jahre)	N	Mittelwert (Datum/Tage)	Std.-Abw. (Tage)
Geburtsdatum	890	19.04.1935	13,6	801	23.06.1942	8,7
Eintrittsdatum	888	28.10.1967	12,1	801	17.08.1968	10,0
Austrittsdatum	890	01.09.1980	10,4	801	26.05.1994	3,4
Beschäftigungsdauer	889	12,8	10,3	801	25,8	10,0

Eine nähere Betrachtung des Austrittsdatums bestätigt die Annahme, daß um so mehr Information über Flugstunden fehlt, je früher das Austrittsdatum liegt.

Abbildung 4.2: Histogramm des Austrittsdatums der aus dem Flugdienst ausgeschiedenen PilotInnen und Flugingenieure



4.2.2 Fehlende oder aggregierte Werte

In Abschnitt 3.4.2 „Imputation fehlender Werte“, wird beschrieben, daß die vorhandenen Daten über Flugstunden nicht immer jährlich aufgeschlüsselt vorliegen und Lücken

aufweisen können. Sie werden ergänzt, damit die JEM-Methode sinnvoll angewandt werden kann. Dieser Abschnitt beschreibt die bestehenden Lücken.

4.2.2.1 Agregierte Flugstunden vor ca. 1978

Für 1776 (30% von 5965) PilotInnen und Flugingenieure lagen bis ca. 1978 Flugstunden nur in kumulierter Form (lediglich aufgeschlüsselt nach Flugzeugtyp) vor. Anhand des Karriereprofils und des Eintrittsdatums in den Flugdienst wurden daraus jährliche Flugstunden extrapoliert.

Tabelle 4.5: PilotInnen mit agregierten Flugstunden

	ohne agregierte Flugstunden	mit agregierten Flugstunden	Σ
Aktive	3023	1190	4213
Ausscheider	215	586	801
Σ	3238	1776	5014

4.2.2.2 Lücke 1992-1995 und vereinzelt fehlende Werte

Die Daten von nahezu 50% aller PilotInnen und Flugingenieuren weisen aufgrund von Verzögerungen bei der Eingabe der Daten Lücken in den Jahren 1992 bis 1995 und vereinzelt in anderen Jahren auf (vgl.

Abbildung 4.3). Fehlende Werte wurden aus den Daten der anderen Jahre ergänzt. Nach Extrapolation der agregierten Flugstunden konnte die Anzahl fehlender Werte gezählt werden. Wie Tabelle 4.6 zu entnehmen ist, sind die Daten von 482 (9,6%) der PilotInnen und Flugingenieuren aufgrund eines hohen Anteils (75%) fehlender Werte nicht auswertbar. Der prozentuale Anteil fehlender Jahresflugstunden an den gesamten Flugstunden einer/s PilotIn bzw. Flugingenieurs ist für die Qualität der Imputation wichtiger als die absolute Anzahl. Daher ist dieser Anteil in Abbildung 4.4 ergänzend zur Tabelle dargestellt.

Tabelle 4.6: PilotInnen mit einer kritischen Anzahl fehlender Werte

	unter $\frac{3}{4}$ fehlender Werte	über $\frac{3}{4}$ fehlender Werte	Σ
Aktive	3775	438	4213
Ausscheider	757	44	801
Σ	4532	482	5014

Abbildung 4.3: Kumulative Häufigkeit fehlender Werte

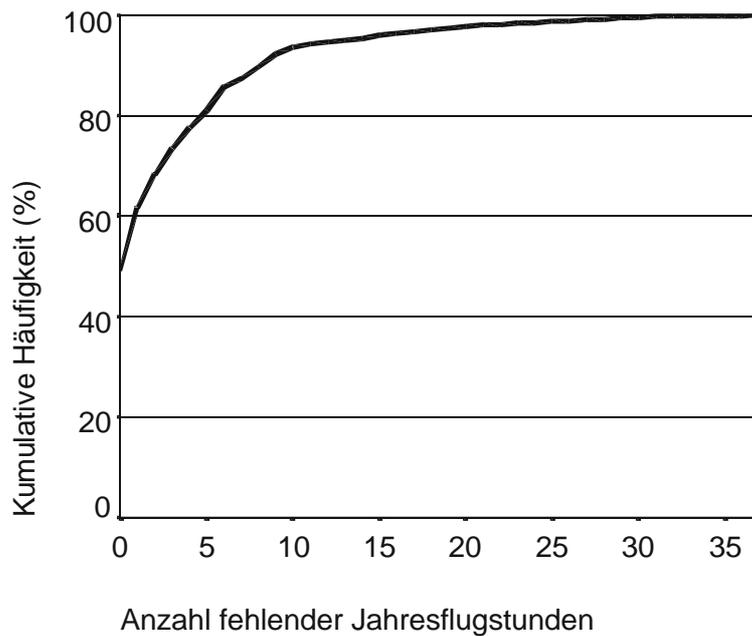
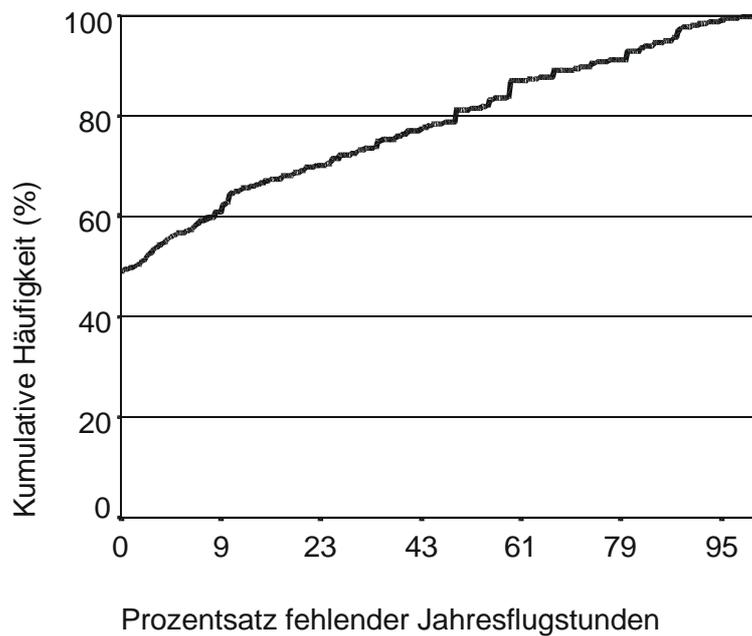
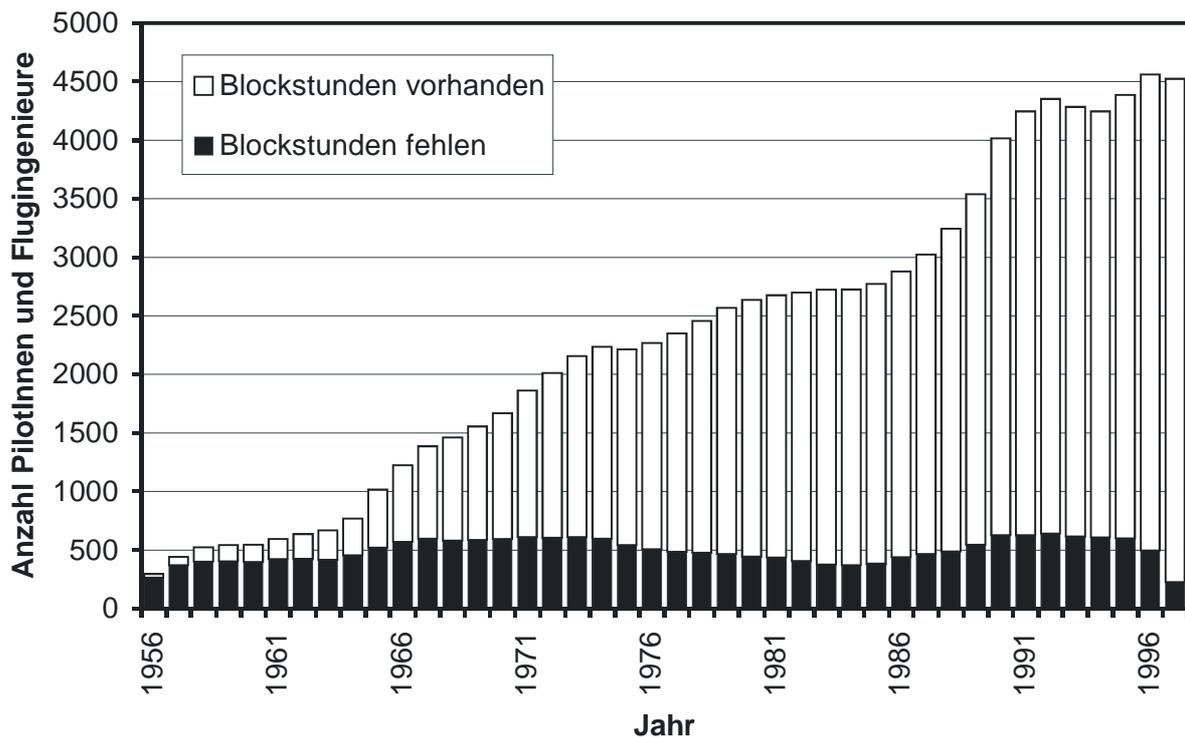


Abbildung 4.4: Kumulative Häufigkeit des Anteils fehlender Werte an den individuellen Beschäftigungsjahren



Die Qualität der Daten steigt im Laufe der Jahre, wie Abbildung 4.5 verdeutlicht: Die Anzahl von Personen mit fehlenden Werten bleibt mit ca. 500 etwa konstant, während die Anzahl aktiver PilotInnen und Flugingenieure insgesamt auf 4532 wächst.

Abbildung 4.5: Anzahl untersuchter Personen, aufgeschlüsselt nach Fehlen oder Vorhandensein von Blockstunden



4.2.2.3 Verteilung der ausgewerteten Daten

Entsprechend der Art der vorliegenden Information über Flugstunden wird im Folgenden unterschieden zwischen:

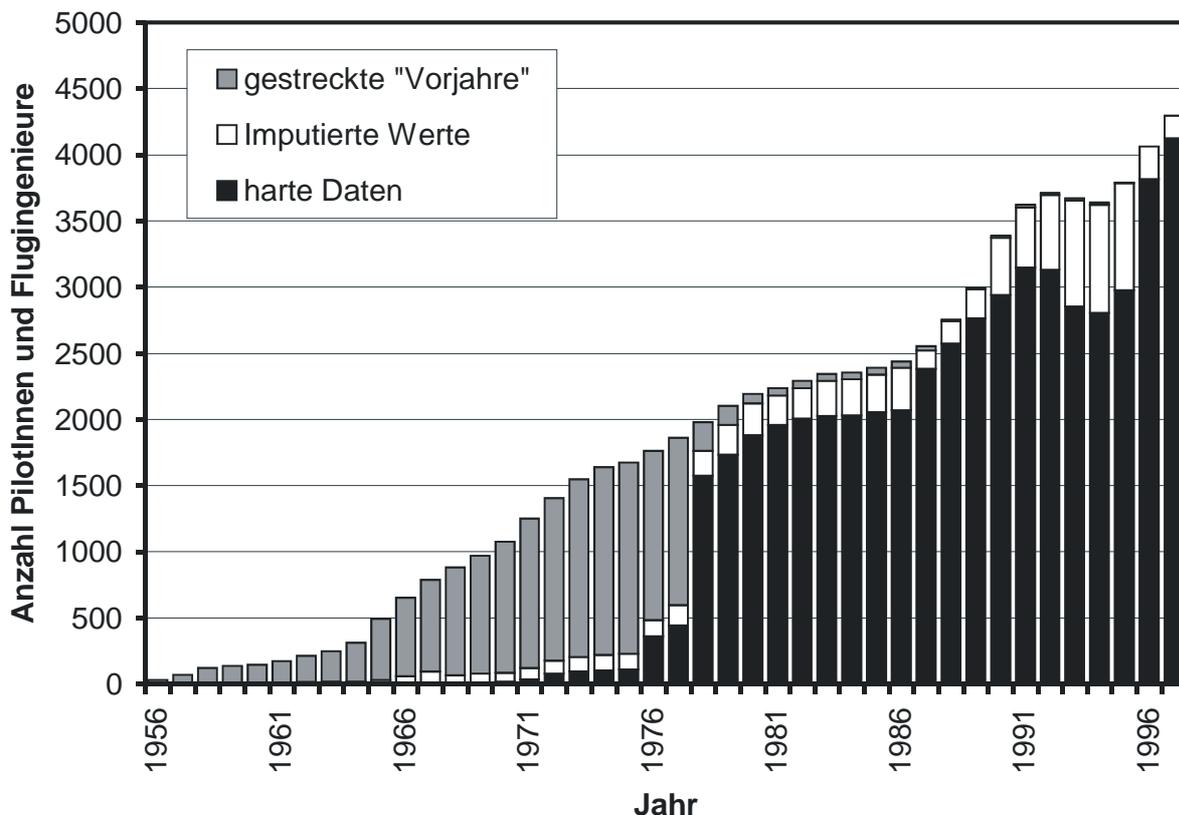
- 1) „harten Daten“ (vorliegende jährliche Blockstunden),
- 2) „gestreckten Daten“, die aus aggregierten Blockstunden berechnet wurden (vgl. Abschnitt 3.4.2.1), und
- 3) „imputierten Daten“, die Lücken in den Daten schließen (vgl. Abschnitt 3.4.2.2).

Die Auswertbaren Daten setzen sich aus diesen drei Datenarten zusammen: Vor 1978 zum größten Teil aus „gestreckten Daten“ (19% aller Datenwerte, siehe Tabelle 4.7), später aus „harten Daten“ (71% aller Datenwerte) und zu einem kleineren Teil aus „imputierten Werten“ (10% aller Datenwerte). Hier fällt die Erfassungslücke für die Jahre 1992-1995 auf (Abbildung 4.6).

Tabelle 4.7: Anzahl ausgewerteter Datenwerte

Art der Daten	Datenwerte	
	N	%
harte Daten	59.784	71
gestreckte Daten	15.798	19
imputierte Daten	8.399	10
Σ	83.981	100

Abbildung 4.6: Verteilung der ausgewerteten Blockstunden



4.3 Job-Expositions-Matrix

Die Expositionserfassung in der Studie erfolgt nach der in Abschnitt 3.4.1.2 beschriebenen „JEM-Methode“, deren Kernstück die Job-Expositions-Matrix ist. Ihre Konstruktion anhand der in Abschnitt 3.2.1.8 vorgestellten Flugplan-Datenbank ist in Abschnitt 3.4.2 beschrieben worden.

Insgesamt enthält die Flugplan-Datenbank 4595 einzelne Flüge (ohne Berücksichtigung ihrer Häufigkeit). Ihre Anzahl verzehnfacht sich im Zeitraum 1960 bis 1995.

Tabelle 4.8: Anzahl in der Flugplan-Datenbank enthaltener Flüge

Flugplan	B707	B727	B737	B747	DC10	A300	A340	Andere	Σ
1960	9							107	116
1965	19	41						117	177
1970	86	158	138					53	435
1975	76	145	287	10	28			49	595
1980	26	166	200	16	40	61		0	509
1982	18	145	293	25	42	38		28	589
1990		139	430	73	38	110		0	790
1995			912	52		107	36	277	1384

Wegen des großen Umfangs der JEM wurde die tabellarische Darstellung der JEM in Anhang A – „Job-Expositions-Matrix,, verlagert. Ihre bildhafte Darstellung (Abbildung 4.7) faßt die gleichen Daten viel anschaulicher zusammen. Flugzeuge der Firma Airbus sind mit einem Kreis gekennzeichnet, die der Firma Boeing mit einem Quadrat. Der künstliche Flugzeugtyp „Unbekannt“ (oder „Dummy“), mit dem Rauten-Symbol versehen, steht hier stellvertretend für die durchschnittliche Strahlendosisrate über alle PilotInnen und Flugingenieure.

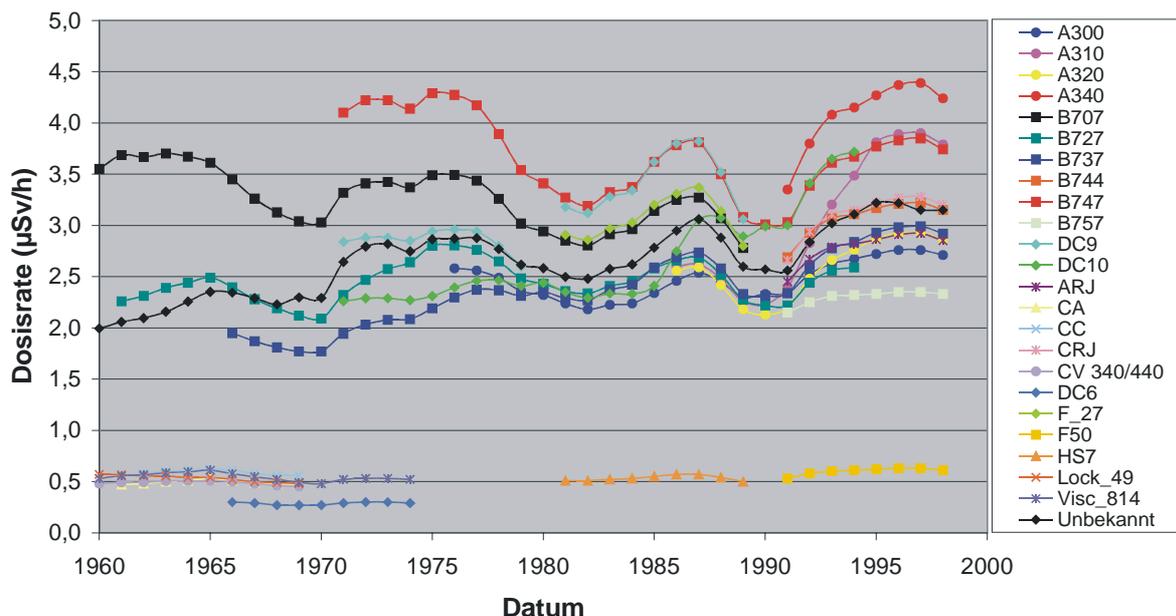
Die aus Abbildung 3.5 bekannten Schwankungen des heliozentrischen Potentials treten hier deutlich zutage. Seine hohen Werte in den Jahren um ca. 1991 äußern sich darin, daß die Strahlendosisraten für alle Flugzeugtypen in diesem Jahr auffallend niedrig sind.

Der Einfluß der niedrigeren Flughöhe (max. 21000 Fuß) von Propellerflugzeugen auf die Dosisrate ist in der Grafik sehr deutlich zu erkennen. Düsenflugzeuge dagegen lassen sich in Bezug auf Strahlendosisraten nicht so einfach voneinander unterscheiden.

Die längere Verweildauer von Langstreckenflügen auf Reiseflughöhe im Vergleich zu Mittel- oder Kurzstreckenflügen spiegelt sich in etwas höheren Strahlendosisraten für die Flugzeugtypen wider, die hauptsächlich auf solchen Flügen eingesetzt werden.

Die errechneten Strahlendosisraten sind niedriger als Schätzungen oder Messungen auf nördlichen Routen, weil in dieser Arbeit die Routenverteilung des gesamten Flugplans berücksichtigt wurde. Sie gelten also spezifisch für das fliegende Personal der Deutschen Lufthansa AG und Fluggesellschaften mit ähnlichem Flugplan.

Abbildung 4.7: Job-Expositions-Matrix



4.4 Ergebnisse der Expositionserfassung

Die folgenden Auswertungen beziehen sich auf die 4532 PilotInnen und Flugingenieure für die ausreichende Informationen vorliegen (vgl. Abschnitt 4.2.2.2). Die ausgewerteten Flugstunden dieser PilotInnen und Flugingenieure summieren sich auf ca. 43 Millionen. Ihre Verteilung auf Flugzeugkategorien wird in Tabelle 4.9 dargestellt.

Tabelle 4.9: Verteilung der ausgewerteten Flugstunden auf Kategorien von Flugzeugen

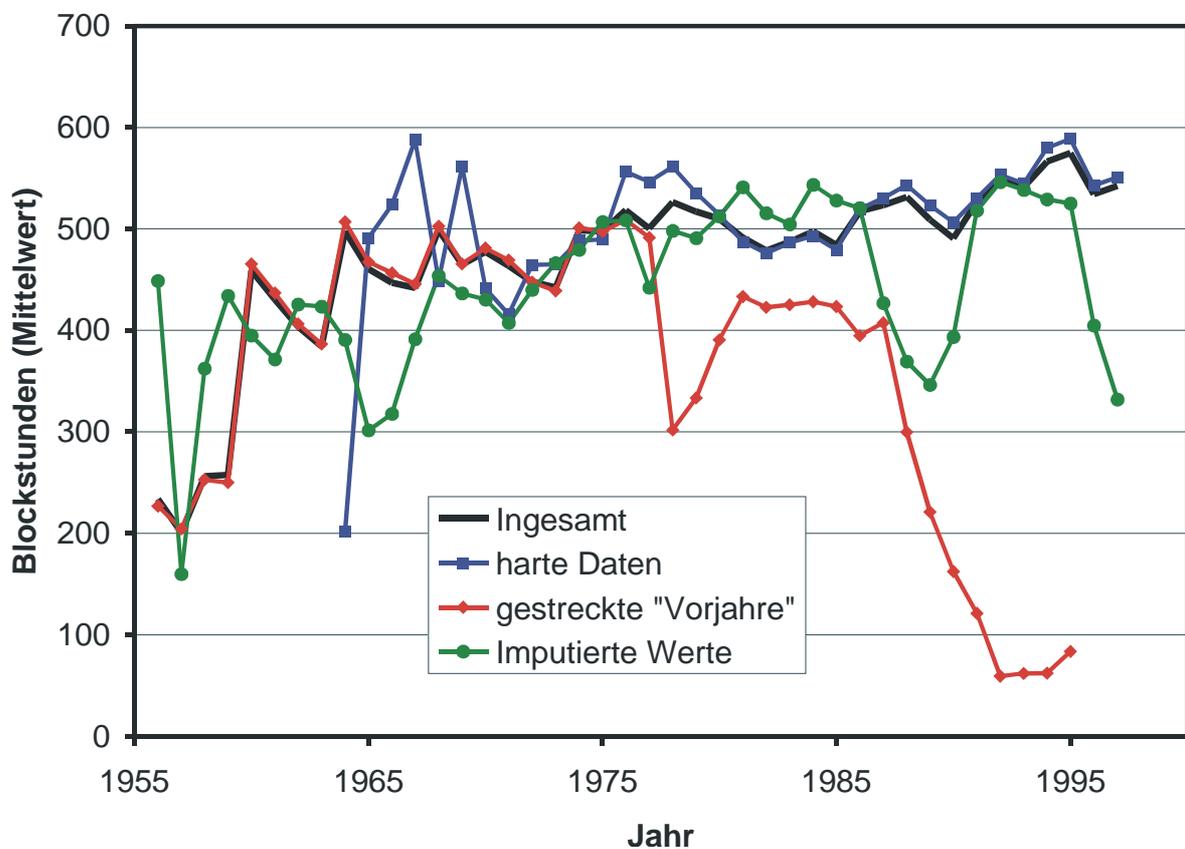
	Propellerflugzeuge		Düsenflugzeuge		Σ
	Kurz- und Mittelstrecke	Langstrecke	Kurz- und Mittelstrecke	Langstrecke	
Aktive	103.785	11.372	21.615.179	10.936.339	32.666.675
Ausscheider	322.200	161.104	4.051.513	5.856.160	10.390.977
Σ	425.985	172.476	25.666.692	16.792.499	43.057.652

Aus den Expositionsdaten läßt sich ableiten, daß die Flugstunden von Flugingenieuren, CopilotInnen und FlugkapitänInnen (Tabelle 4.10 bzw. Abbildung 4.8) im Laufe der Jahre von durchschnittlich 545 im Jahre 1960 auf 598 im Jahre 1997 gestiegen ist, wobei sich die Anzahl Flugstunden von CopilotInnen und FlugkapitänInnen nicht nennenswert unterscheiden.

Tabelle 4.10: Entwicklung der Flugstunden in der untersuchten Zeitspanne

Jahr	Anzahl PilotInnen und Flugingenieure	jährliche Flugstunden	
		Mittelwert	Std.-Abw.
1960	545	459	155
1970	1668	477	145
1980	2637	510	120
1990	4016	491	171
1997	4525	598	160

Abbildung 4.8: Entwicklung der Flugstunden in der untersuchten Zeitspanne

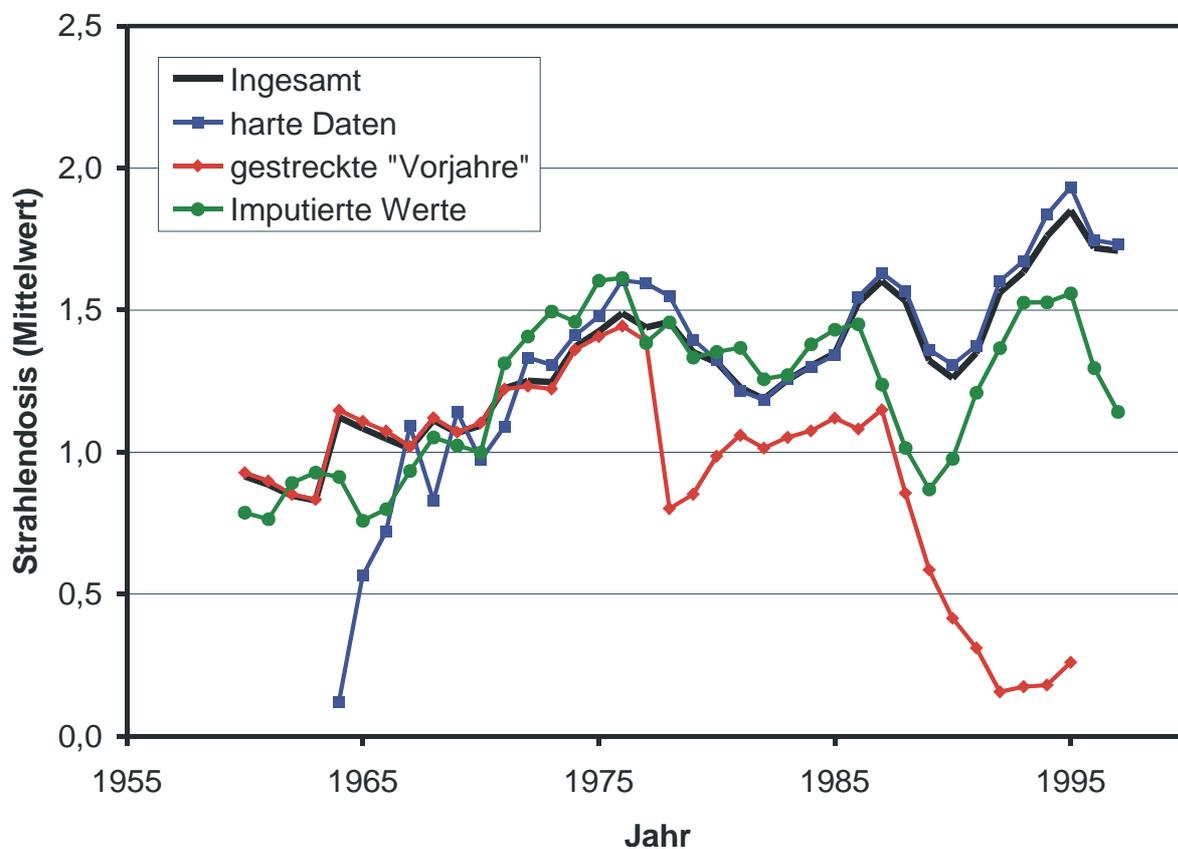


Aufgrund des einfachen Schätzverfahrens läßt sich die Varianz der geschätzten jährlichen, individuellen Strahlendosis dieser PilotInnen und Flugingenieure auf einem bestimmten Flugzeugtyp aus der Varianz ihrer Flugstunden und der zutreffenden Strahlendosisrate berechnen. Eine entsprechende nach Flugzeugtyp aufgeschlüsselte Tabelle wäre nicht aufschlußreich. Statt dessen stellen Tabelle 4.11 und Abbildung 4.9 die durchschnittliche jährliche Strahlendosis aller PilotInnen und Flugingenieure dar.

Tabelle 4.11: Entwicklung der Strahlendosis in der untersuchten Zeitspanne

Jahr	Anzahl PilotInnen und Flugingenieure	Jährliche Strahlendosis (mSv)	
		Mittelwert	Std.-Abw.
1960	545	0,91	0,43
1970	1668	1,09	0,35
1980	2637	1,32	0,38
1990	4016	1,26	0,51
1997	4525	1,71	0,57

Abbildung 4.9: Durchschnittliche jährliche Strahlendosen



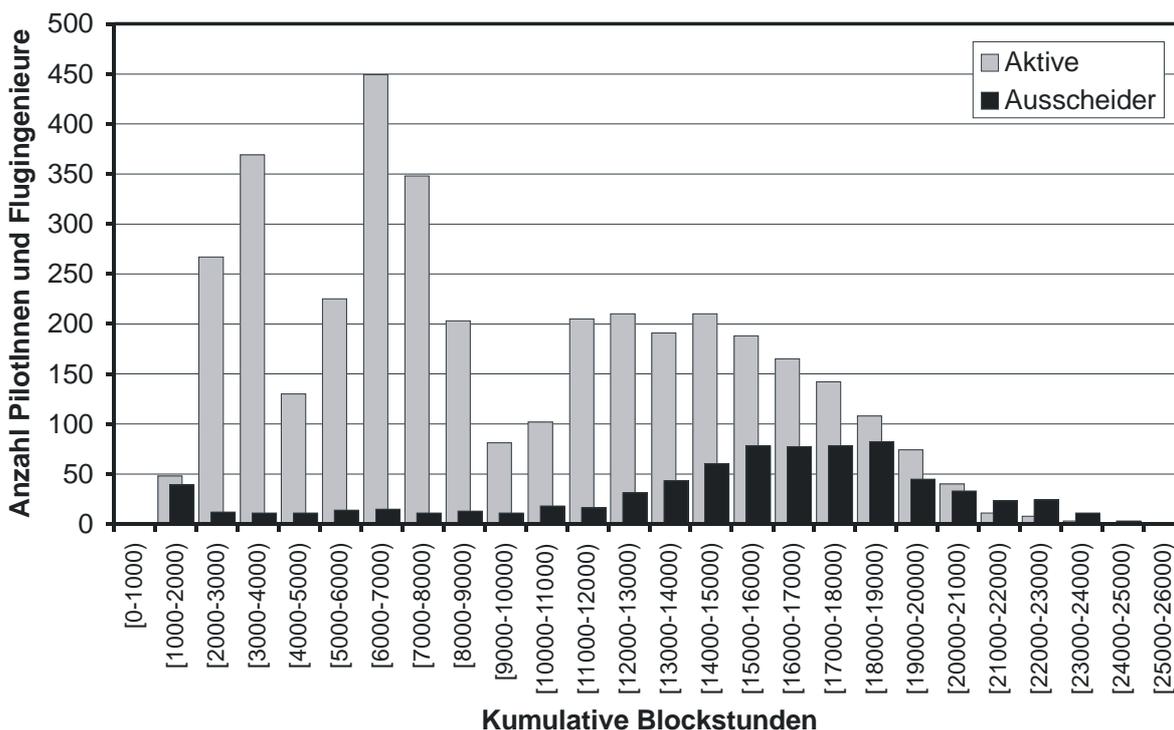
Die kumulierten Blockstunden von „AusscheiderInnen“, die ihre fliegerische Karriere beendet haben, lassen sich nicht mit denen noch aktiver PilotInnen vergleichen. In der folgenden Tabelle 4.11 und der zugehörigen Abbildung 4.10 werden sie der Vollständigkeit halber mit aufgeführt. Die Blockstunden betragen etwa 14.000 Stunden insgesamt oder ca. 530 Stunden pro Beschäftigungsjahr. Ihre Streuung entspricht derjenigen der Beschäfti-

gungsdauer. Ihre Verteilung ähnelt wegen der guten Korrelation stark der Verteilung der Gesamtbeschäftigungsdauer (vgl. Abbildung 4.1).

Tabelle 4.12: Individuelle kumulative Blockstunden (h)

	Anzahl	Median	Mittelwert	Std. Abw.
Aktive	3775	7.203	8.644	5.170
Ausscheider	757	14.975,5	13.687	5.554

Abbildung 4.10: Histogramm individueller kumulativer Blockstunden



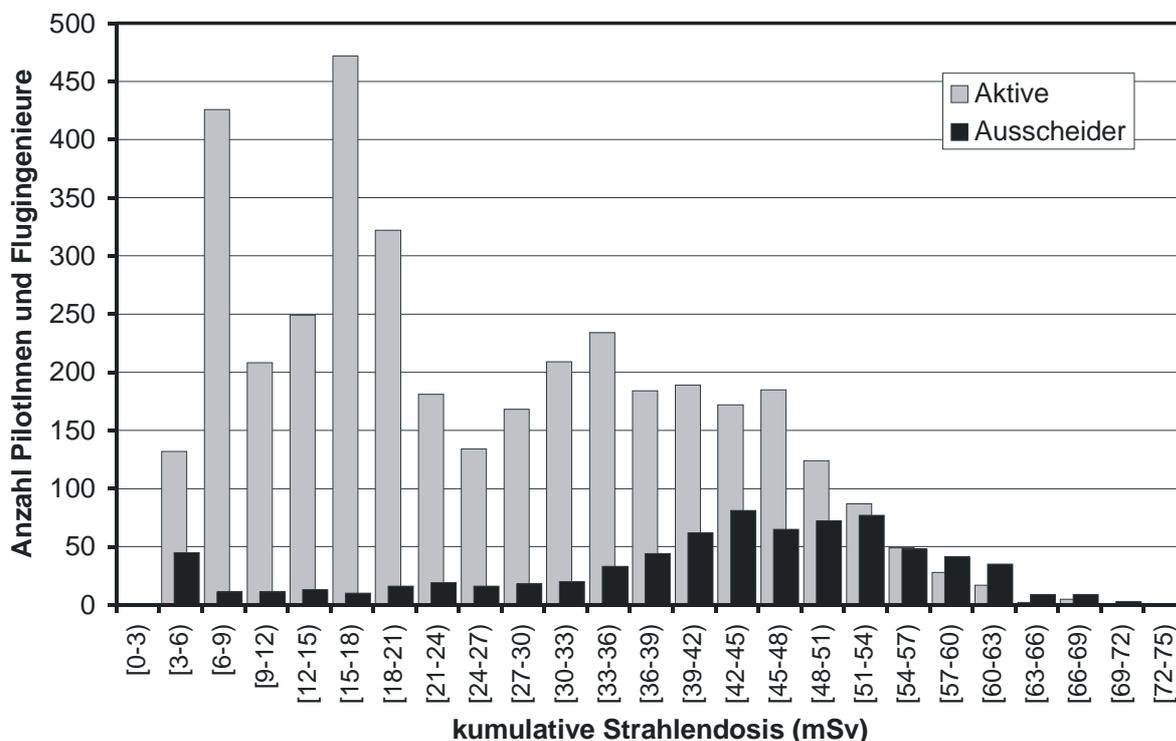
Das folgende nach Aktiven und AusscheiderInnen aufgeschlüsselte Histogramm (Abbildung 4.11) stellt individuelle, über die gesamte Karriere kumulierte Strahlendosen dar. Die statistischen Kennzahlen sind in Tabelle 4.15 zusammengefasst. Die hier beobachtete große Streuung der Daten wird durch die Streuung der Blockstunden erklärt (vgl. auch Abschnitt 4.6 „Vergleiche,,“).

Da Ausscheider proportional weniger Düsenflugzeuge geflogen sind als heute noch aktive PilotInnen, werden kumulative Strahlendosen in der Zukunft noch ansteigen. Prognosen lassen sich aus den vorgestellten Strahlendosisraten und einer Schätzung der Flugstunden erstellen.

Tabelle 4.13: Individuelle kumulative Strahlendosen (mSv)

	Anzahl	Median	Mittelwert	Std. Abw.
Aktive	3775	19,52	22,82	14,61
Ausscheider	757	41,36	38,19	15,98

Abbildung 4.11: Histogramm individueller kumulativer Strahlendosen



4.5 Validierungsdaten

Die in Abschnitt 3.2.1.7 vorgestellten „Logbuchdaten“ sind Aufzeichnungen der Flüge aller 4029 PilotInnen und Flugingenieure des Lufthansa-Konzerns (CB, DE, FM, LH, SF) in den Monaten Juli 1997 bis Juni 1996, bis auf zwei Piloten der Lufthansa Cargo, die der Verwendung ihrer Daten nicht zugestimmt haben. Diese Daten sind die detailliertesten, die im Rahmen der Lufthansa-Studie ausgewertet wurden, und haben den Status einer Referenz.

4.5.1 Deskriptive Auswertungen

Es wurden insgesamt 389.176 Flüge auf 24 verschiedenen, in der folgenden Tabelle 4.14 aufgezählten Flugzeugtypen durchgeführt. Sieben davon werden nicht vom Konzern selbst, sondern von Partnergesellschaften verwendet. Die McDonnell Douglas MD-11 (MD11) wurde während des Zeitraums neu eingeführt, so daß nur insgesamt 21 PilotInnen

je mit MD11 geflogen sind. Weiterhin haben MD11-PilotInnen nur wenige Flugstunden, weil die nötige Umschulung viel Zeit in Anspruch nimmt. Dies führt zu gegenüber anderen Flugzeugtypen verzerrten Ergebnissen. Aus diesem Grunde wurde die MD11 aus den Flugzeugtyp-bezogenen Auswertungen ausgenommen.

Ein weiterer virtueller Flugzeugtyp „Dummy“ (DMY) ist ein Stellvertreter für einen unbekanntem Flugzeugtyp; er wird immer dann eingesetzt, wenn die betreffende Person sich nicht auf einem vom Konzern durchgeführten Flug befand und selbst keine Angabe über den Flugzeugtyp gegeben hat. Das ist in der Regel dann der Fall, wenn die/der PilotIn für eine Fremdgesellschaft geflogen ist oder mit einer Fremdgesellschaft vom/zum Einsatzort geflogen ist.

Tabelle 4.14: In den Validierungsdaten verwendete Flugzeugtypen

Flugzeugtyp	Beschreibung	Anzahl Flüge	mittlere Flugdauer	verwendet von Lufthansa
A300	Airbus A300	19.365	2:15	ja
A310	Airbus A310	13.478	1:45	ja
A319	Airbus A319	28.282	1:30	ja
A320	Airbus A320	69.884	1:25	ja
A321	Airbus A321	34.605	1:30	ja
A340	Airbus A340	9437	8:55	ja
AR8	Avro Aerospace Avroliner RJ85	602	1:22	ja
AT2	Aeritalia ATR 42-200	144	1:02	nein
AT4	Aeritalia ATR 42-400	37	0:54	nein
ATR	Aerospatale/Alenia	115	0:55	nein
B737	Boeing 737	146.488	1:26	ja
B744	Boeing 747-400	13.544	8:52	ja
B747	Boeing 747-200 u. 300	13.877	6:30	ja
B757	Boeing 757	21.440	3:11	ja
B767	Boeing 767	8451	5:41	ja
CRJ	Canadair RegionalJet	807	1:40	ja
DC10	McDonnell Douglas DC10	4126	2:52	ja
DH3	De Havilland DHC-3 Dash 3	76	1:06	nein
DH8	De Havilland DHC-8 Dash 8	72	1:09	nein
DMY	Dummy	3050	2:39	unzutreffend

Flugzeugtyp	Beschreibung	Anzahl Flüge	mittlere Flugdauer	verwendet von Lufthansa
F27	Fokker F27	2	1:23	nein
F50	Fokker F50	940	1:06	ja
MD11	McDonnell Douglas MD-11	353	4:30	ja
SF3	Saab-Fairchild 340 Turbo Prop	1	0:55	nein

PilotInnen besitzen in der Regel eine Typenerlaubnis für nur ein Flugzeugmuster, d.h. sie können Flugzeuge mit gleichem Cockpit, wie z.B. die Airbus 320 und ihre verkürzten bzw. verlängerten Versionen A319 und A321 oder Boeing 757 und 767 fliegen. Nur sehr wenige PilotInnen haben eine Typenerlaubnis für beide , Muster A320 und A340, deren Cockpits sich ähneln. Da für den Einsatz der PilotInnen auf verschiedenen Flügen nicht der genaue Flugzeugtyp sondern die Typenerlaubnis ausschlaggebend ist, wurden die Daten entsprechend aggregiert.

Die Information über die Typenerlaubnis wurde aus den Daten selbst extrahiert, indem das am häufigsten geflogene Flugzeugmuster für jede(n) PilotIn ermittelt wurde. Dabei fiel auf, daß für 37 PilotInnen das Muster DMY der häufigste Eintrag war – ein Zeichen dafür, daß sie für fremde Gesellschaften gearbeitet haben. Diese Personen wurden, ebenso wie die MD11-PilotInnen, von den Auswertungen ausgeschlossen, so daß schließlich die Daten von 3972 PilotInnen und Flugingenieuren ausgewertet wurden.

3410 (86%) der PilotInnen sind bei der Deutschen Lufthansa beschäftigt, die restlichen 15% in den anderen Gesellschaften des Konzerns. Tabelle 4.15 läßt deutlich erkennen, welche Flugzeugtypen von den verschiedenen Gesellschaften eingesetzt wurden.

Tabelle 4.15: Anzahl PilotInnen im Lufthansa-Konzern Juli 1997 bis Juni 1998

Muster	Condor	Condor Berlin	Lufthansa Cargo	Lufthansa Passage
A300				277
A310				38
A320	1	30		863
A340				326
B737				957
B744				534
B747			157	351
B757	345			
DC10	61			32
DMY	5			32
MD11			18	

4.5.1.1 Flugstunden

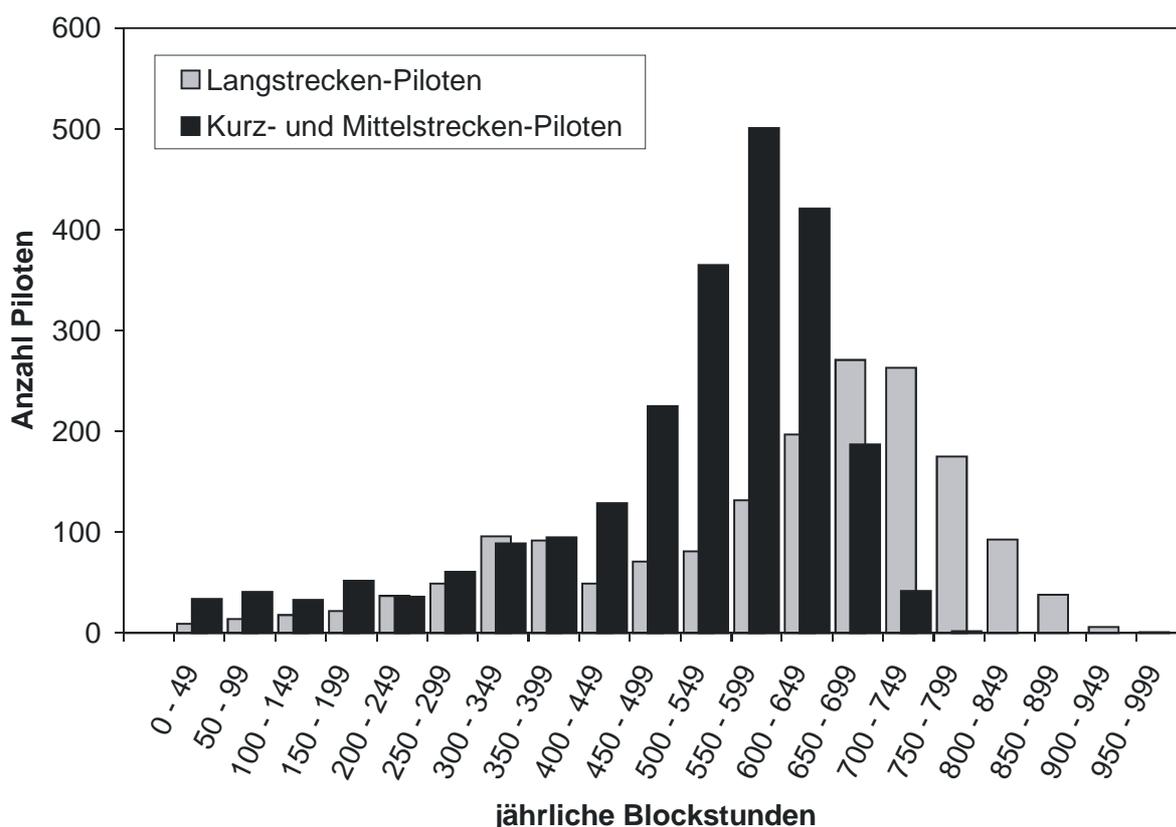
Die Flugstunden der PilotInnen (Tabelle 4.16) liegen bei ca. 577 Std. pro Jahr, wobei Langstrecken- und Condor-PilotInnen im Schnitt länger fliegen als ihre KollegInnen (Median von 648 Stunden gegenüber 552 Stunden, siehe

Abbildung 4.12). Unter *Langstrecke* werden Flüge mit einer Dauer von über 4-5 Stunden verstanden, bzw. unter *Langstrecken-Mustern* Flugzeuge, die im Einsatz eine entsprechende mittlere Flugdauer haben.

Tabelle 4.16: Verteilung der jährlichen Blockstunden und Anzahl Flüge von 3972 PilotInnen im Zeitraum Juli 1997 bis Juni 1998

Flugzeugtyp	Anzahl PilotInnen	Flugstunden			Flüge
		Median	Mittelwert	Std. Abw.	Median
A300	276	507	471	117	239
A310	38	474	439	131	242,5
A320	894	576	517	172	391
A340	326	651	605	148	83
B737	957	558	525	120	392
B747/B744	1043	603	546	183	69
B757/B767	345	770	726	165	219
DC10	93	505	458	157	172
Insgesamt	3972	577	546	170	211

Abbildung 4.12: Vergleich der Flugstunden von Langstrecken-PilotInnen mit jenen der anderen PilotInnen



4.5.1.2 Strahlendosen

Strahlendosen wurden mit CARI-5E (siehe Abschnitt 3.2.2.5) für jeden Flug berechnet. Dazu wurde die Datenbank um die Flughöhenprofile (siehe Abschnitt 3.2.1.9) der einzelnen Flugzeugtypen ergänzt (Datenbanktabellen „Profile“, „Mustergruppen“ und zusätzlich „Korrespondenz Muster zu Mustergruppe“). Da das gleiche Flughöhenprofil für mehrere Flugzeugmuster mit ähnlichen Flugleistungen verwendet wird, sind Muster zu Gruppen zusammengefaßt. Weiterhin mußten fehlende Werte für Taxizeiten (Roll- und Wartezeiten am Boden) in der Tabelle „Flüge“ ergänzt werden. Dies wurde in einer Datenbank-Abfrage realisiert, in der die entsprechenden Mittelwerte eingesetzt werden, die zuvor aus den bekannten Daten berechnet worden sind. Weitere Datenbank-Abfragen führen diese Daten zusammen und formatieren sie zu einer Eingabedatei für CARI.

Daraus ergeben sich genaue Schätzungen der individuellen Strahlenexposition in diesem Jahreszeitraum (Tabelle 4.17). Zwei Mittelungseffekte sind zu beachten:

- 1) Da ein(e) PilotIn niemals ausschließlich Langstrecken- bzw. Kurzstreckenflüge durchgeführt hat, ist die individuelle Dosisrate die Summe der Dosisraten an Bord von verschiedenen Mustern, gewichtet mit ihren jeweiligen Flugstunden.

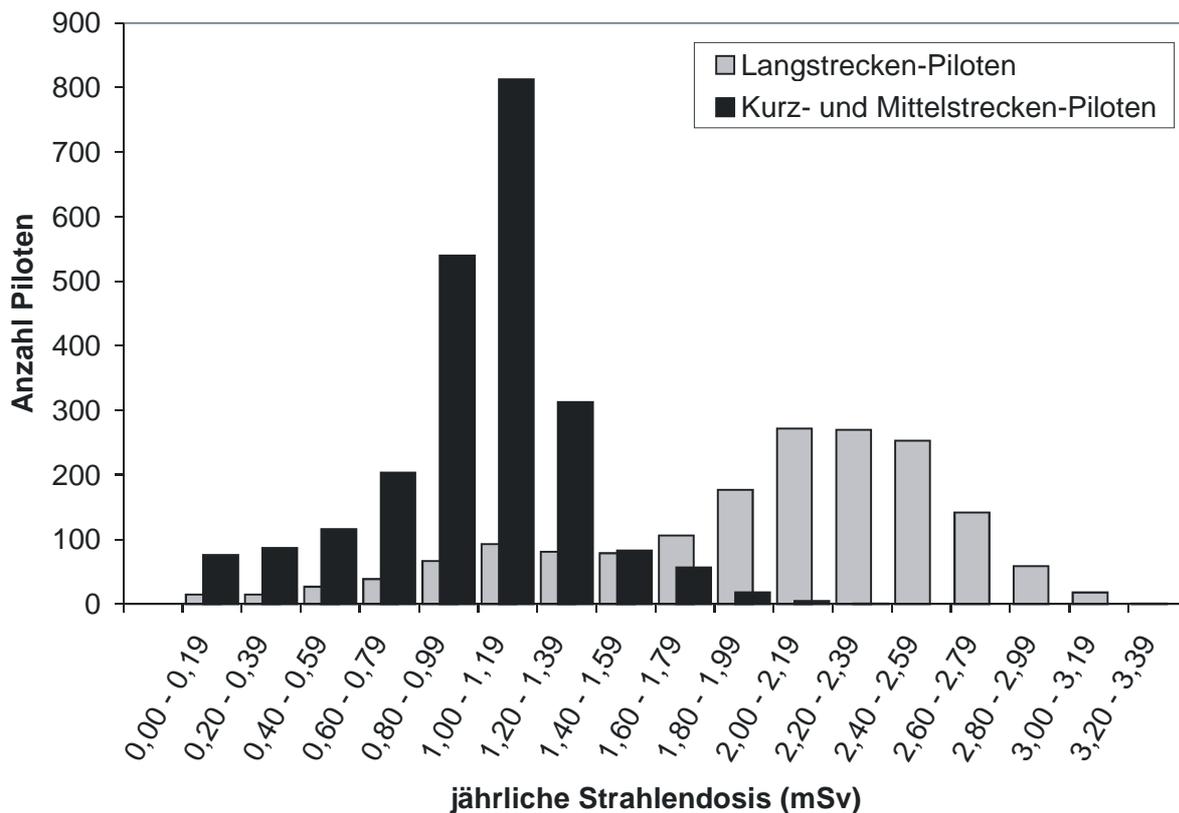
- 2) Die mittlere Dosisrate an Bord eines bestimmten Flugzeugtyps setzt sich aus den Dosen auf verschiedenen Routen zusammen, so daß die in der Literatur zitierten Maximalwerte nicht erreicht werden.

Die mittlere Strahlendosisrate der Langstrecken-PilotInnen (ca. 3,4 $\mu\text{Sv/h}$) unterscheidet sich deutlich von derjenigen der Kurz- und Mittelstrecken-PilotInnen (ca. 1,9 $\mu\text{Sv/h}$). Da Langstrecken-PilotInnen zudem etwas mehr Blockstunden haben, fällt ihre jährliche Dosis entsprechend höher aus (vgl. auch Abbildung 4.13).

Tabelle 4.17: Verteilung der geschätzten jährlichen Strahlendosis (mSv) und Strahlendosisrate ($\mu\text{Sv/h}$) aus den Logbuchdaten von 3972 PilotInnen im Zeitraum Juli 1997 bis Juni 1998

Flugzeugtyp	Anzahl PilotInnen	Flugdauer Mittelwert	Strahlendosis			Dosisrate
			Median	Mittelwert	Std. Abw.	Mittelwert
A300	276	2:16	1,07	1,03	0,31	1,52
A310	38	1:46	1,00	0,94	0,38	1,21
A320	894	1:28	1,03	0,97	0,36	1,39
A340	326	8:56	2,36	2,23	0,57	3,70
B737	957	1:26	1,03	1,00	0,28	1,58
B747/B744	1043	7:41	2,12	1,92	0,68	3,21
B757/B767	345	3:12 / 5:41	2,03	1,92	0,45	2,37
DC10	93	2:53	1,17	1,08	0,42	2,21

Abbildung 4.13: Vergleich der jährlichen Strahlendosis von Langstrecken-PilotInnen (A340, B747, B767) mit derjenigen der anderen PilotInnen



4.5.2 Der Zusammenhang von Flugstunden und Flugzeugtyp mit der jährlichen Strahlendosis

Die Bedeutung der beiden Einflußfaktoren „Flugstunden“ und „Flugzeugtyp“ auf die jährliche Strahlendosis läßt sich mit einer Varianzanalyse quantifizieren (Tabelle 4.18): Aus der Spalte „Eta-Quadrat“ ist zu ersehen, daß sich 72% der Gesamtvarianz der Strahlendosis auf die Flugstunden zurückführen läßt, ein kleinerer Teil (12%) auf den Interaktionsterm zwischen Flugstunden und der Art des Flugzeugmusters (Lang- bzw. Kurz- oder Mittelstrecke), und ein wesentlich geringerer Teil (1%) auf die Art des Flugzeugmusters allein. (Der Interaktionseffekt kommt dadurch zustande, daß LangstreckenpilotInnen mehr Flugstunden haben.)

Tabelle 4.18: Ergebnisse einer Varianzanalyse zum Einfluß von „Flugstunden“ und „Flugzeugtyp“ (hier kodiert als Langstrecke bzw. Kurz- oder Mittelstrecke) auf die jährliche Strahlendosis

Quelle		Quadrat- summe vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signi- fikanz	Eta- Qua- drat
Konstanter Term	Hypothese	6,272	1	6,272	2,680	0,349	0,728
	Fehler	2,340	1	2,340			
Flugstunden	Hypothese	610,022	1	610,022	10333,665	0,000	0,723
	Fehler	234,064	3965	0,059			
Lang/Kurz	Hypothese	2,340	1	2,340	39,646	0,000	0,010
	Fehler	234,064	3965	0,059			
Lang/Kurz * Flugstunden	Hypothese	32,963	1	32,963	558,380	0,000	0,123
	Fehler	234,064	3965	0,059			

4.6 Vergleiche

Anhand der bereits vorgestellten Daten der Haupt- und Validierungsstudie lassen sich zwei Fragen beantworten:

- Wie ist die Qualität von Surrogatsmaßen, wenn keine Flugstunden, sondern nur die Beschäftigungsdauer als Expositionsmaß vorhanden ist?
- Wie valide ist die JEM-Methode in der Lufthansa-Studie?

Beide sind durch die Verfügbarkeit unterschiedlicher Daten motiviert (vgl. Tabelle 4.19). Während die Personaldaten (also die Beschäftigungsdauer) aller Beschäftigten bekannt ist, sind Flugstunden nur für die PilotInnen und Flugingenieure bekannt, und Logbuchdaten von PilotInnen sind nur für die zurückliegenden sieben Jahre zu erhalten.

Tabelle 4.19: Verfügbarkeit unterschiedlicher Studiendaten

	Beschäftigungsdauer	Flugstunden	Logbuch-Daten
Kabinenpersonal	Ja	Nein	nein
Nicht mehr aktives Cockpitpersonal	Ja	Ja	nein
Aktives Cockpitpersonal	Ja	Ja	letzte 7 Jahre

4.6.1 Beschäftigungsdauer als Surrogatsmaß für die Strahlenexposition

Für diese Arbeit wurden die ersten 509 verfügbaren vollständigen und überprüften Karrieren von PilotInnen analysiert. Diese PilotInnen sind bereits aus dem aktiven Flugdienst ausgeschieden. Bekannt sind für diese Gruppe von Personen:

- 1) Beschäftigungsdauer,
- 2) Gesamtflugstunden und
- 3) mit der JEM-Methode berechnete Gesamtstrahlendosis.

Diese Daten erlauben nicht den Vergleich mit den „Gold Standard“ Logbuchdaten, umfassen aber die gesamte Karriere der untersuchten Personen. Die Verteilung dieser Variablen ist in der folgenden Tabelle 4.20 zusammengefaßt.

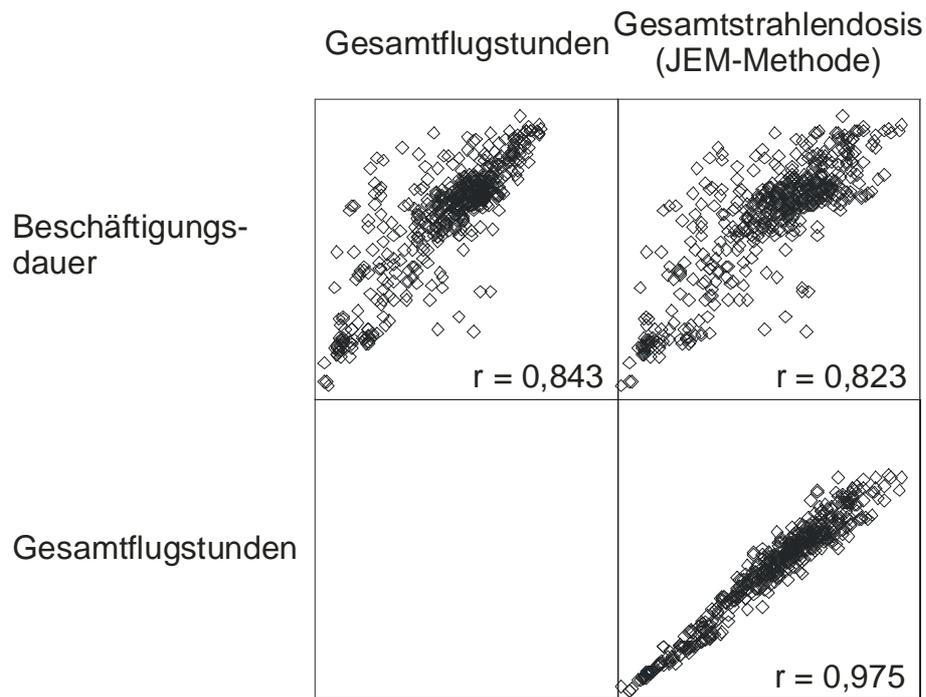
Tabelle 4.20: Verteilung der Expositionsmaße der Karrieren

	Median	Mittelwert	Std. Abw.
Beschäftigungsdauer (Jahre)	29.1	26.6	8.6
Gesamtflugstunden	14229	12999	5207
Jahresflugstunden	495.4	480.6	131.0
Gesamtstrahlendosis (JEM-Methode) (mSv)	37.9	35.4	14.2

Da die untersuchten PilotInnen im Laufe ihrer Karriere unterschiedliche Flugzeugtypen (mit unterschiedlichen Strahlendosisraten) geflogen sind, wäre eine niedrigere Korrelation zwischen Gesamtflugstunden und Gesamtstrahlendosis als zwischen der Beschäftigungsdauer und den Gesamtflugstunden zu erwarten. Bei den vorliegenden Daten ist diese Korrelation jedoch exzellent ($R = 0,975$, siehe Abbildung 4.14). Auch die Korrelation zwischen Beschäftigungsdauer und Gesamtstrahlendosis ist gut ($R = 0,823$). Die beobachtete Streuung der Streudiagramme erklärt sich durch die Unterschiede bei den Flugstunden und der Karriere der einzelnen PilotInnen.

Die Validität der JEM-Methode vorausgesetzt (worauf im nächsten Abschnitt eingegangen wird), kann für das Kabinenpersonal die Beschäftigungsdauer als valides Surrogat für die Strahlenexposition verwendet werden.

Abbildung 4.14: Korrelation zwischen Beschäftigungsdauer, Gesamtflugstunden und mit der JEM-Methode berechneter Gesamtstrahlendosis

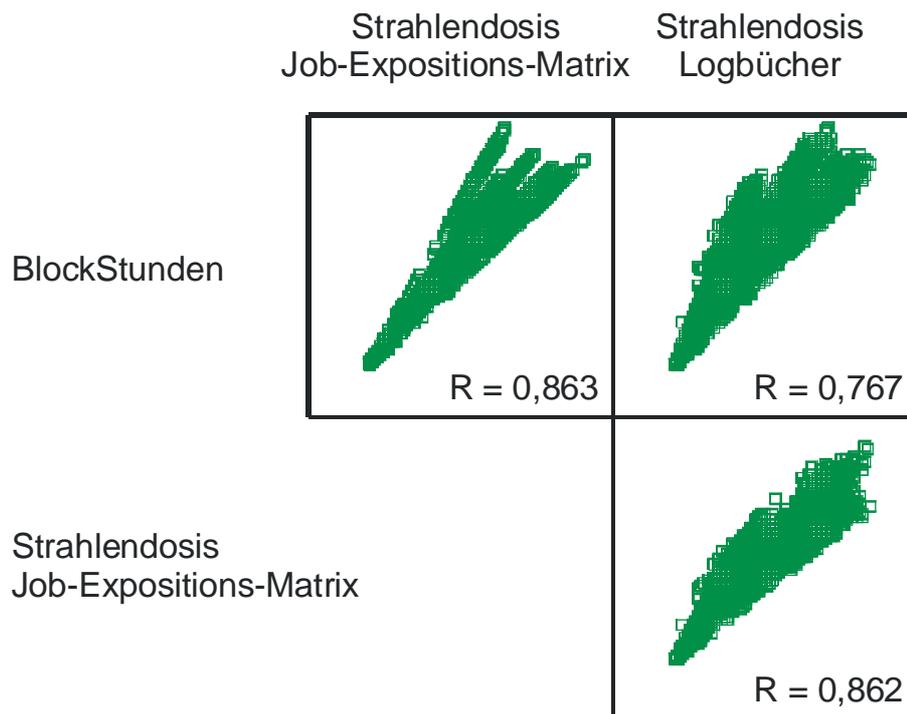


4.6.2 Validität der JEM-Methode

Analog zur Vorgehensweise im vorangehenden Abschnitt können auf der Basis der Validierungsdaten folgende drei Expositionsmaße verglichen werden: 1) jährliche Flugstunden, 2) mit der JEM-Methode berechnete jährliche Strahlendosis und 3) anhand der Logbuch-Daten berechnete jährliche Strahlendosis. Dieser Vergleich bezieht sich im Unterschied zum vorherigen auf ein einziges Kalenderjahr.

Da die JEM-Methode darin besteht, Flugstunden durch eine von Flugzeugtyp und Kalenderjahr abhängige Strahlendosisrate zu multiplizieren, korrelieren Flugstunden und JEM-Dosissschätzung für jedes Flugzeugmuster einzeln betrachtet perfekt. Die beobachtete Konusform der Streudiagramme (Abbildung 4.15) erklärt sich also durch die Unterschiede bei den Flugzeugtypen der einzelnen PilotInnen.

Abbildung 4.15: Korrelation zwischen jährlichen Flugstunden und mit der JEM-Methode bzw. anhand der Logbuch-Daten berechneten jährlichen Strahlendosis



Der Vergleich von JEM-Methode und den „Gold Standard“ Logbuch-Daten ergibt, daß beide Maße sehr gut korrelieren, sowohl für jeden Flugzeugtyp einzeln ($R = 0,791$ bis $R = 0,936$) als auch insgesamt ($R = 0,767$) (Tabelle 4.21), wobei alle Korrelationskoeffizienten signifikant zum 1%-Niveau sind. Der Schätzfehler der JEM-Methode wächst, wie es in diesem Kontext zu erwarten ist, proportional zur Strahlendosis (Abbildung 4.15).

Tabelle 4.21: Korrelation zwischen Strahlendosen, die mit der JEM-Methode bzw. anhand der Logbuch-Daten berechnet wurden

Flugzeugtyp	Anzahl PilotInnen	Korrelations-Koeffizient (nach Spearman)
A300	275	0,830
A310	38	0,827
A320	836	0,819
A340	336	0,926
B737	954	0,791
B747/B744	1033	0,926
B757/B767	248	0,894
DC10	71	0,933
Insgesamt	3970	0,767

4.6.3 Zusammenfassung

Auf die gesamte Karriere bezogen sind die Flugstunden der größte Einflußfaktor für die Strahlendosis der PilotInnen und Flugingenieure. Der Einfluß der geflogenen Flugzeugtypen ist wesentlich geringer, da jede Person im Laufe ihrer Karriere auf verschiedenen Flugzeugtypen eingesetzt war. Allerdings ist zu erwarten, daß PilotInnen mit späterem Karrierebeginn am Ende ihrer Laufbahn eine höhere Strahlendosis haben werden als ihre hier untersuchten älteren Kollegen, da letztere häufiger Propellerflugzeuge geflogen sind.

Andere, hier nicht gemessene Faktoren, wie z.B. Abweichungen der tatsächlichen Flughöhe von dem verwendeten durchschnittlichen Flughöhenprofil oder Verletzungen der Routen-Homogenitäts-Annahme (siehe Abschnitt 3.4.1.2 „JEM-Methode,“) haben einen geringeren Einfluß auf die Strahlendosis als reine Flugstunden. Über weitere Faktoren wie solare Teilchenereignisse ist bisher zu wenig bekannt, um sie berücksichtigen zu können.

Trotz dieser Unsicherheiten kann die Beschäftigungsdauer als valides Surrogat für die Strahlenexposition verwendet werden, wenn letztere nicht bekannt ist. Es ist zu erwarten, daß die Korrelation der Beschäftigungsdauer einer/s PilotIn mit der aus Logbuch-Daten über die gesamte Dauer der Karriere berechneten Strahlendosis – falls solche Daten vorhanden wären – nicht schlechter ausfällt als das Produkt 0,651 der Einzelkorrelationen $R = 0,823$ aus Abbildung 4.14 und $R = 0,791$ aus Tabelle 4.21.

4.7 Fehler bei der Dosisermittlung

Bei jedem Schritt, der für die Konstruktion der Job-Expositions-Matrix nötig ist, werden vereinfachende Annahmen getroffen, die zu Fehlern führen können. Im Folgenden wird der Einfluß der einzelnen Fehlerquellen geschätzt. Diese sind das zur Schätzung der Dosis eines Besatzungsmitglieds auf einem Einzelflug benutzte Programm CARI, das Standard-Flughöhenprofil des Expertenkomitees und die Verwendung eines vereinfachenden Flugplans.

Da ein Besatzungsmitglied jährlich im Durchschnitt zwischen 69 und 242 Flügen durchführt und viele Abweichungen „zufällig“ sind, kann man davon ausgehen, daß sich die einzelnen Fehler für jede Person mitteln.

4.7.1 Einfluß der Approximationen von CARI

Der Programmcode LUIN [175], auf dem die Berechnungen von CARI beruhen, der aber nicht direkt in CARI verwendet wird, basiert auf physikalischen Transportgleichungen. Während die Rechenergebnisse von LUIN hervorragend mit Meßwerten übereinstimmen, führen die Vereinfachungen von CARI zu geringen Schätzfehlern in der Größenordnung von 4%.

4.7.1.1 Vereinfachende Formeln

CARI verwendet eine Tabelle vorberechneter Werte, um die Berechnungen zu beschleunigen. Für geographische Positionen eines Flugzeuges zwischen mehreren Punkten, für die Werte tabelliert sind, werden diese Daten interpoliert. Dabei garantiert ein engmaschiges Koordinatennetz eine gute Präzision.

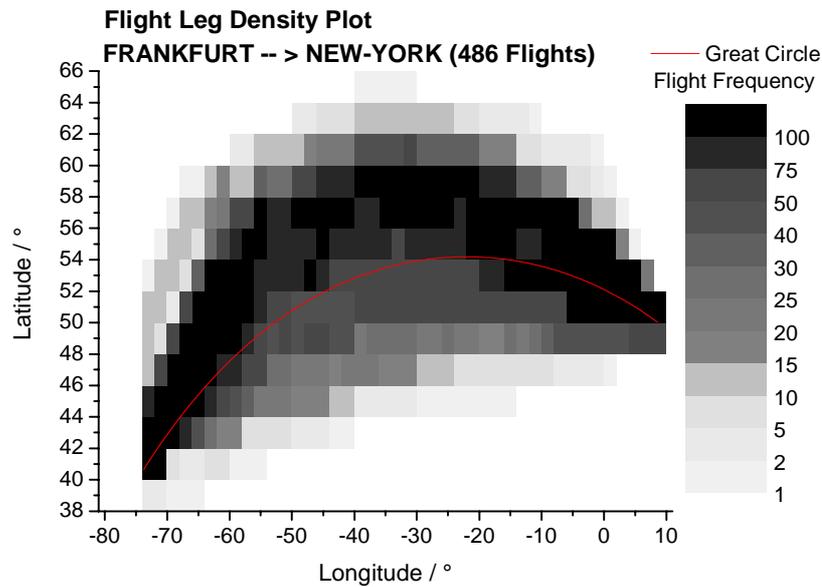
4.7.1.2 Großkreis-Annahme

CARI geht bei den Berechnungen davon aus, daß der Flug entlang eines Großkreises über der Erdoberfläche verläuft, und läßt damit einige Einflußfaktoren außer Acht:

- 1) meteorologische Verhältnisse, denn Winde werden bei der Flugplanung berücksichtigt,
- 2) geographische Verhältnisse, denn es werden Funkfeuer angefliegen und die Flugstrecke über dem offenen Meer wird möglichst kurz gehalten, und schließlich
- 3) politische Verhältnisse, die bewirken können, daß ein Land nicht überflogen wird.

Die Abweichungen vom Großkreis (Abbildung 4.16) bewirken insgesamt geringe Abweichungen der berechneten Strahlendosis.

Abbildung 4.16: Abweichung der Flugbahn des Fluges Frankfurt -> New York vom geographischen Großkreis (Quelle: [70])



4.7.1.3 Monatsmittel für heliozentrisches Potential

CARI greift auf eine Tabelle zurück, in der das heliozentrische Potential als jährliche bzw. monatliche Durchschnittswerte abgelegt ist, so daß Tagesschwankungen unberücksichtigt bleiben (Abbildung 4.17, Wert von CARI grün dargestellt). Diese Schwankungen beschränken sich jedoch meist auf ± 200 MV (Abbildung 4.18), so daß die dadurch entstehenden Fehler auf maximal 10% der Strahlendosis begrenzt sind (vgl. auch Abbildung 2.6 oder Abbildung 4.20).

Abbildung 4.17: Schwankung des heliozentrischen Potentials im Januar 1999 (Quelle: [70])

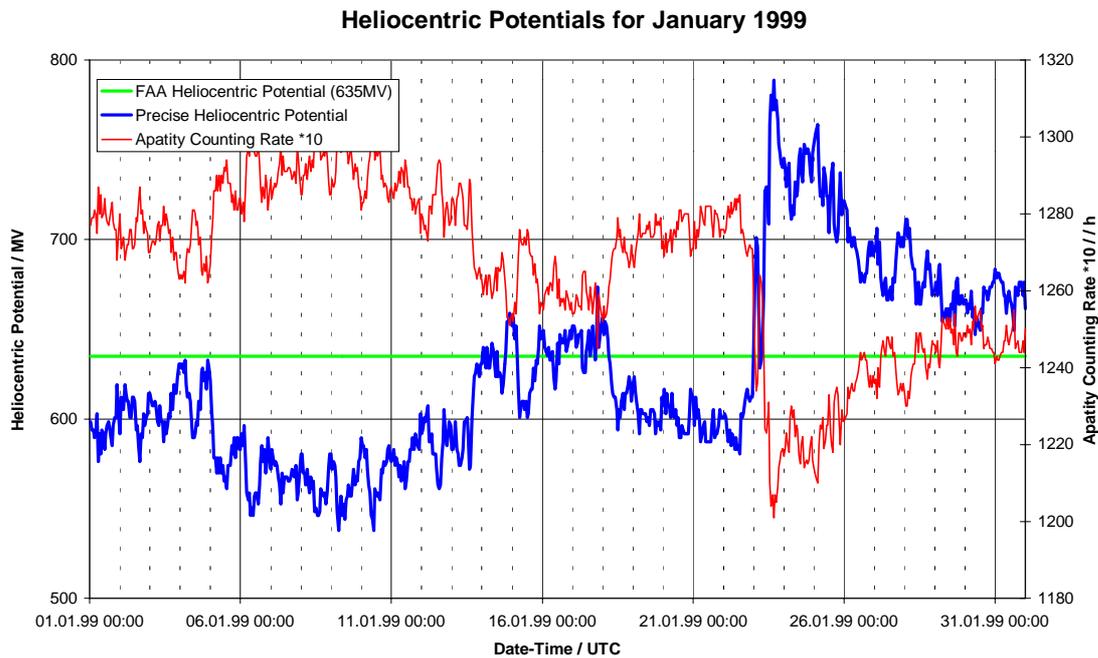
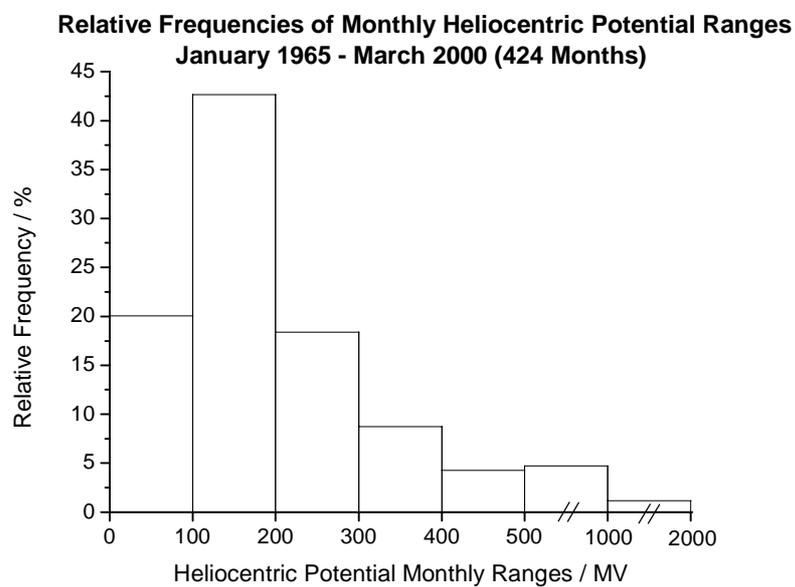


Abbildung 4.18: Schwankungsbreite des heliozentrischen Potentials in den Jahren 1965 bis 2000 (Quelle: [70])



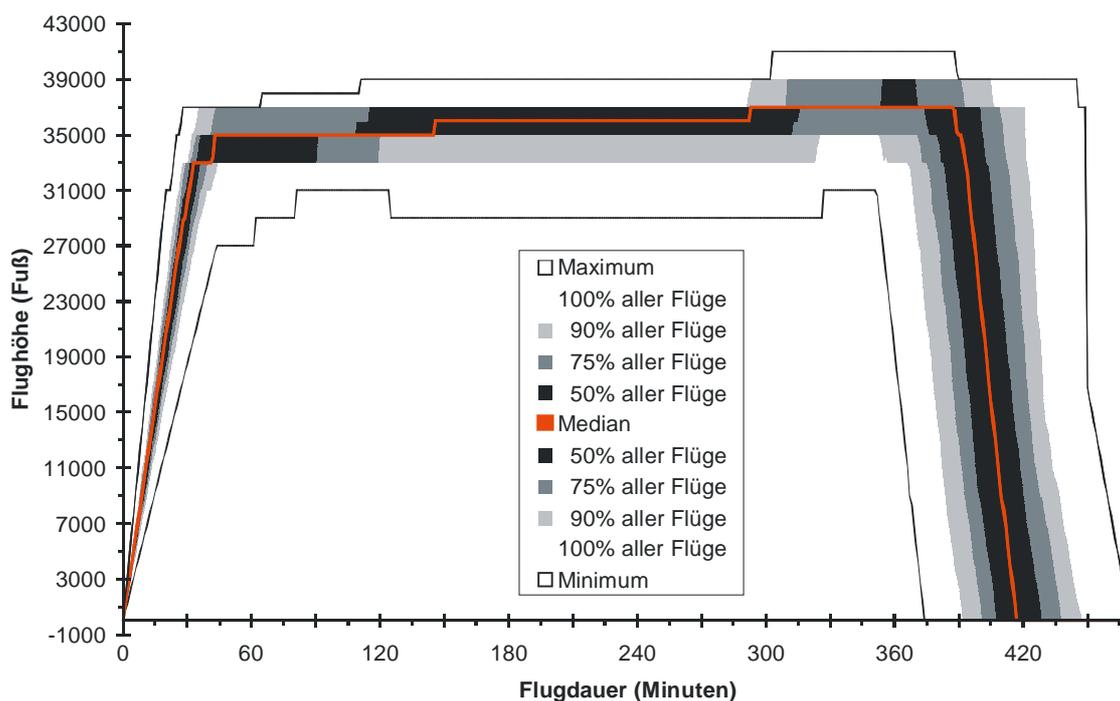
4.7.2 Einfluß des tatsächlichen Flughöhenprofils und der Flugdauer auf die Dosisrate

Wegen des großen Einflusses der Flughöhe auf die erhaltenen Strahlendosisraten (Abbildung 2.6) ist eine Untersuchung des standardmäßig verwendeten Flughöhenprofils, das in der Expertenrunde festgelegt wurde, erforderlich. Diese Problematik kann im Rahmen dieser Arbeit nicht umfassend untersucht werden, da nur wenige Vergleichsdaten für Flughöhenprofile verfügbar sind.

Hier werden anhand der Daten des MOZAIC-Meßprogramms (siehe Abschnitt 3.2.2.4) – stellvertretend für alle anderen Strecken und Flugzeugtypen – Flüge Frankfurt → New York auf Airbus A340 untersucht. Das MOZAIC-Programm war auf Linienflüge mit A340 beschränkt. Diese Route Frankfurt → New York ist in den uns vorliegenden MOZAIC-Daten die häufigste.

Abbildung 4.19 macht deutlich, daß sowohl die Flugdauer als auch das Flughöhenprofil dieses siebenstündigen Fluges variieren. Es ist jedoch eine deutliche Häufung um ein medianes Flughöhenprofil und die flugplanmäßige Flugdauer erkennbar.

Abbildung 4.19: Verteilung des Flughöhenprofils von 534 MOZAIC-Flügen auf der Route Frankfurt → New York



Der Einfluß des Flughöhenprofils auf die Strahlendosis kann anhand der MOZAIC-Daten quantifiziert werden, indem die Berechnungen mit CARI für jeden Flug sowohl mit dem tatsächlichen als auch mit dem Standard-Flughöhenprofil durchgeführt werden. Um den Einfluß des heliozentrischen Potentials auszuschließen, wurde ein Datum mit

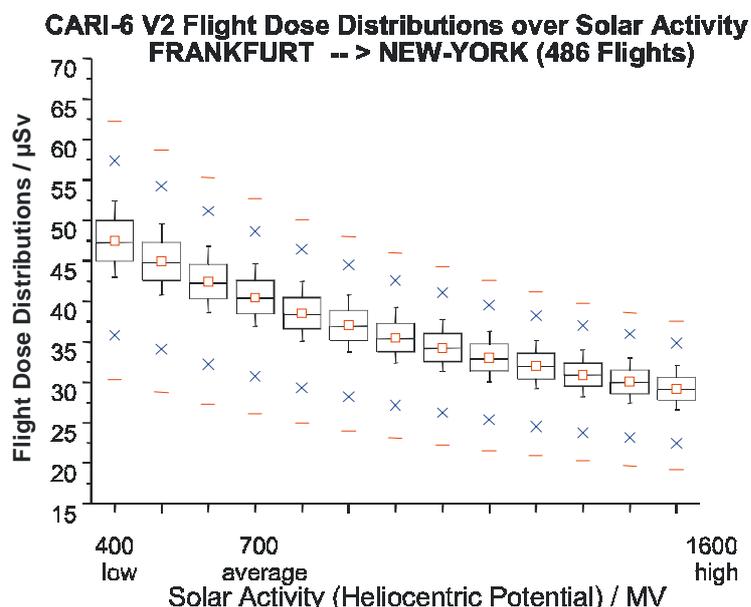
durchschnittlichem heliozentrischen Potential gewählt (10'1992). Der Variationskoeffizient der mit dem realen Flughöhenprofil berechneten Strahlendosisrate liegt bei 9,3%, während er unter Verwendung des Standard-Flughöhenprofils verschwindend gering ist (Tabelle 4.22).

Tabelle 4.22: Vergleich der mit dem tatsächlichen und dem Standard-Flughöhenprofil berechneten Strahlendosisrate ($\mu\text{Sv/h}$) für 534 MOZAIC-Flüge auf der Route Frankfurt \rightarrow New York

	Mittelwert	Std. Abw.	Median
mit realem Flughöhenprofil	4,70	0,44	4,69
mit Standard-Flughöhenprofil	4,36	0,02	4,36

Der Einfluß des Flughöhenprofils ist im Vergleich zum Einfluß des heliozentrischen Potentials gering, wie folgende Abbildung 4.20 verdeutlicht, in der nicht das Flughöhenprofil geändert wurde, sondern das heliozentrische Potential. Der „Box and Whisker Plot“ bezieht sich auf die Gesamtheit aller Flüge Frankfurt \rightarrow New York (in der Auswertung von Ernst Felsberger werden 468 statt 534 Flüge berücksichtigt).

Abbildung 4.20: Streuung der Strahlendosis auf der Route Frankfurt \rightarrow New York mit dem heliozentrischen Potential (Quelle: [70])



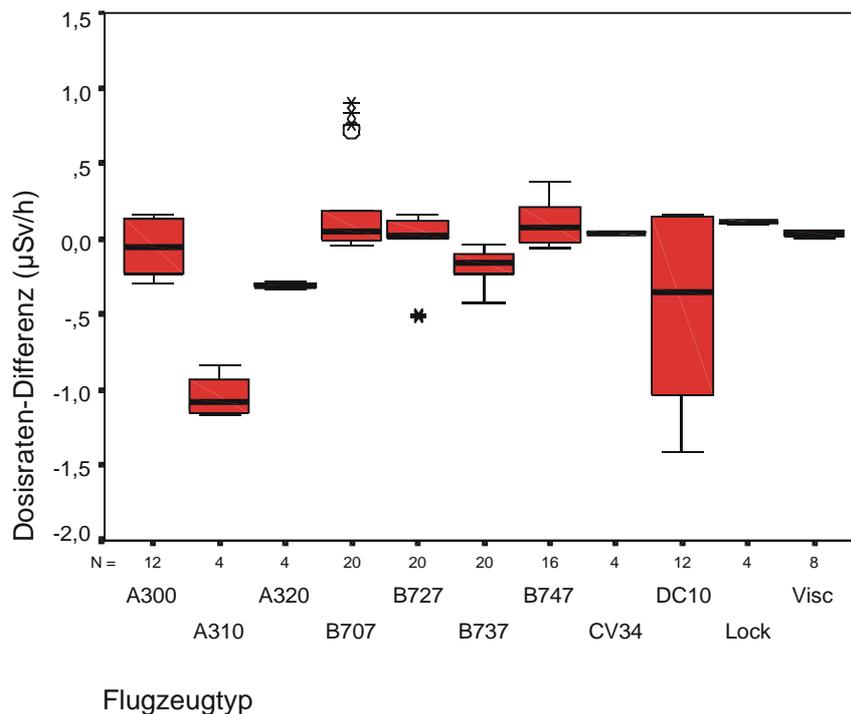
4.7.3 Einfluß des Flugplans auf die Dosisrate

Aufgrund von Änderungen der angeflogenen Ziele und der Zusammensetzung der Flotte einer Fluggesellschaft ergeben sich jährlich Modifikationen des Flugplans. Aus Abbildung 4.7 wird deutlich, daß Ihr Einfluß auf die Strahlendosisraten an Bord einzelner Flugzeuge gegenüber dem Einfluß des heliozentrischen Potentials gering ist. Wie in Abschnitt 3.4.3 beschrieben, werden zur Konstruktion der Job-Expositions-Matrix Strahlendosisraten für gewisse Jahre die Flugpläne der angrenzenden Jahre herangezogen. Für diese Jahre können Strahlendosisraten auf der Grundlage von zwei Flugplänen verglichen werden (Tabelle 4.23 bzw. Abbildung 4.21). Aufgrund der geringen Zahlen können keine verlässlichen Werte angegeben werden, jedoch deuten die hier dargestellten Ergebnisse darauf hin, daß die Unterschiede zwischen zwei aufeinander folgenden Flugplänen selten bedeutende Änderungen der Strahlendosisrate bewirken.

Tabelle 4.23: Verteilung der Differenzen von Strahlendosisraten, die aus zwei aufeinander folgenden Flugplänen berechnet wurden

Flugzeugtyp	N	Dosisraten-Differenz ($\mu\text{Sv/h}$)		
		Mittelwert	Std. Abw.	Median
A300	12	-0,06	0,17	-0,06
A310	4	-1,04	0,15	-1,08
A320	4	-0,31	0,02	-0,31
B707	20	0,20	0,32	0,05
B727	20	-0,04	0,25	0,02
B737	20	-0,19	0,13	-0,16
B747	16	0,11	0,16	0,08
CV34	4	0,04	0,00	0,04
DC10	12	-0,47	0,61	-0,36
Lock	4	0,11	0,01	0,11
Visc	8	0,04	0,02	0,04
Insgesamt	124	-0,08	0,37	0,01

Abbildung 4.21: Verteilung der Differenzen von Strahlendosisraten, die aus zwei aufeinander folgenden Flugplänen berechnet wurden



Unterschiede im Einsatz einzelner Flugzeugtypen zwischen zwei Fluggesellschaften geben darüber hinaus einen Anhaltspunkt für die obere Grenze der möglichen Variation der Strahlendosisraten. Trotz aller Vereinfachungen liegen diese Werte in der gleichen Größenordnung (siehe folgende Tabelle).

Tabelle 4.24: Vergleich von Strahlendosisraten ($\mu\text{Sv/h}$) in dieser (DE) und in einer norwegischen Studie (NO) (Quelle der norwegischen Daten: [246])

Jahr	Convair 440		B 737		B 747		DC 10	
	DE	NO	DE	NO	DE	NO	DE	NO
1960	0,48	0,22						
1965	0,51	0,33						
1970		0,08	1,7					
1975			2,2		4,4	3,9	2,3	4,3
1980			2,3	2,2	3,4	3,5	2,4	2,5
1985			2,6	2,3	3,7	4,0	2,4	3,5
1990			2,2		2,9		2,8	3,4
1995			2,9		3,3			

4.7.4 Streuung auf individueller Ebene

Eine nähere Betrachtung der Verteilung der Strahlendosisrate erlaubt es, die Fehlertermini des in Abschnitt 3.5.2.3 vorgestellten Fehlermodells zu schätzen. Wie aus Abbildung 4.22 deutlich wird, streut die tatsächliche individuelle Dosisrate um den Wert der JEM. Die Streuung der individuellen Dosisrate, die sich aus der Anwendung der JEM-Methode ergibt, ist dagegen vernachlässigbar. Die nach Flugzeugtyp aufgeschlüsselten Lage- und Streumaße der individuellen Strahlendosisraten sind in Tabelle 4.25 aufgeführt.

Abbildung 4.22: Streuung individueller Strahlendosisraten

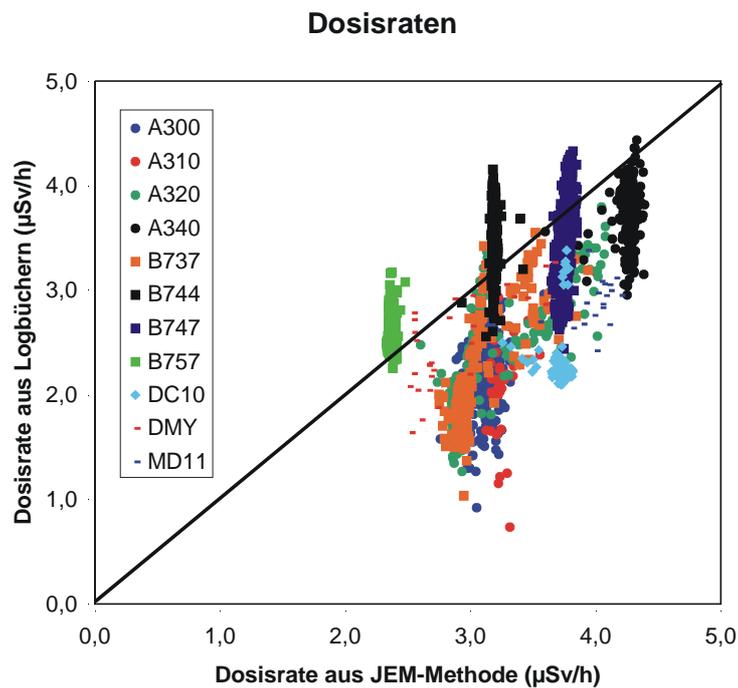


Tabelle 4.25: Streuung der individuellen Strahlendosisrate

Flugzeug- typ	Anzahl PilotInnen	Dosisrate Logbücher ($\mu\text{Sv/h}$)			Dosisrate JEM ($\mu\text{Sv/h}$)		
		Median	Mittelwert	Std. Abw.	Median	Mittelwert	Std. Abw.
A300	277	2,23	2,18	0,33	3,10	3,10	0,10
A310	38	2,13	2,09	0,49	3,21	3,25	0,14
A320	894	1,77	1,87	0,38	2,89	2,94	0,22
A340	326	3,69	3,69	0,26	4,27	4,26	0,07
B737	957	1,84	1,91	0,31	2,93	2,95	0,13
B744	534	3,42	3,43	0,27	3,18	3,18	0,03
B744	534	3,42	3,43	0,27	3,18	3,18	0,03
B747	508	3,56	3,56	0,42	3,76	3,75	0,04
B757/B767	345	2,63	2,63	0,17	2,36	2,35	0,06
DC10	93	2,25	2,33	0,30	3,72	3,69	0,10

Individuelle Abweichungen der geflogenen Routen von der Zusammensetzung des Flugplans sind für die Streuung der Strahlendosisrate auf individueller Ebene von Bedeutung (Tabelle 4.25).

4.7.5 Zusammenfassung

Aus der Validierungsstudie wird deutlich, daß individuelle Flugstunden (und in geringerem Maße der geflogene Flugzeugtyp) der bestimmende Faktor für die Streuung der Strahlendosis ist (Tabelle 4.18), und zwar bereits auf der Basis von Daten für ein einziges Jahr.

Die meisten Abweichungen der tatsächlichen Strahlendosis auf einem bestimmten Flug von dem entsprechenden Mittelwert können als „zufällig“ betrachtet werden, so daß man davon ausgehen darf, daß sich die einzelnen Fehler über die 69 bis 242 Flüge, die jedes Besatzungsmitglied jährlich durchführt, mitteln.

Die kombinierten Fehler aus den Approximationen von CARI und der Streuung der Flugdauer sowie des Flughöhenprofils aller Flüge um die im Flugplan angegebenen Werte vergrößern die Streuung individueller Strahlendosen über die berechneten Werte hinaus um ca. 10%. Leichte Veränderungen des Flugplans sind hingegen vernachlässigbar.

Auf die gesamte Dauer einer fliegerischen Karriere gesehen ist mit starken Mittelungseffekten zu rechnen, zumal ein(e) PilotIn im Laufe ihrer/seiner Karriere mehrere unterschiedliche Flugzeugtypen fliegt. Die hier dargestellten Ergebnisse validieren den Einsatz der JEM-Methode für diese Art von Studien.

4.8 Einfluß der Fehler bei der Expositionsschätzung auf die Risikoschätzer in der Lufthansa-Studie

Die statistische Effizienz einer epidemiologischen Studie, insbesondere die Untersuchung einer Dosis-Wirkungs-Beziehung, hängt in besonderem Maße von der Qualität der Expositionsdaten ab. In diesem Abschnitt werden daher die Ergebnisse der Validierungsstudie ausgewertet und somit Erkenntnisse darüber gewonnen, welchen Einfluß Fehler bei der Expositionsschätzung auf die epidemiologischen Risikoschätzer in der Lufthansa-Studie haben.

In Abschnitt 4.8.1 werden die theoretischen Betrachtungen aus Abschnitt 3.5.2 um numerische Ergebnisse ergänzt. Die Effekte von Fehlern einer Job-Expositions-Matrix, die Dosisraten als Einträge hat, auf die Risikoschätzer werden vorgestellt. Die Untersuchung dieser speziellen Form von JEM ist neu. Die Effekte von Meßfehlern in diesem Kontext sind zum Teil contra-intuitiv. In Abschnitt 4.8.2 werden die gleichen Untersuchungen durchgeführt, jedoch mit Ergebnissen der Validierungsstudie.

4.8.1 Ergebnisse einer Simulationsstudie zu Fehlern in Job-Expositions-Matrizen

Mit einer Simulationsstudie lassen sich die theoretischen Betrachtungen aus Abschnitt 3.5.2 durch konkrete Zahlen für das betrachtete Fehlermodell ergänzen. In diesem Abschnitt wird der Einfluß unterschiedlich großer Fehler in den Dosisraten auf verschiedene große relative Risiken untersucht.

Die Vorgehensweise der Simulationsstudie ist die folgende: Für fest vorgegebene Parameter wird eine Studienpopulation konstruiert und ausgewertet. Die festen Parameter sind hier: die Verteilung der Flugstunden H und der Dosisrate R in der untersuchten Population, die Regressionsparameter α^* und β^* der logistischen Regression, und die Varianz des Schätzfehlers. Anhand dieser Angaben kann eine Gruppe von Individuen mit je einer eigenen tatsächlichen und geschätzten Strahlendosis (X_T und X_S) simuliert werden. Jedem Individuum wird zufällig, gemäß dem logistischen Regressionsmodell, ein Vitalstatus D (lebend oder gestorben) zugewiesen.

Die Auswertung dieser „Studiendaten“ mit der logistischen Regression

$$Y = P(D = 1 | X) = \text{logit}(\alpha + \beta \cdot X)$$

ergibt Schätzer für α^* und β^* , die, je nachdem ob X_T oder X_S eingesetzt wurde, mit $\hat{\alpha}_T, \hat{\beta}_T, \hat{\alpha}_S, \hat{\beta}_S$ bezeichnet werden. Wurde X_T eingesetzt, so sollten die Parameterschätzer gleich α^* und β^* sein. Neben den Parameterschätzern wird auch deren Varianz geschätzt. Das Basisrisiko α ist hier von geringerem Interesse als der Risikoschätzer $\beta = \text{Log}(\text{Odds Ratio})$.

Die Auswertung einer einzigen zufällig erzeugten Studienpopulation reicht nicht aus, um zuverlässige Aussagen über die berechneten Schätzer zu machen. Es ist daher nötig, eine angemessene Anzahl (hier: 1000) simulierter Studienpopulationen für jede Parameterkonstellation auszuwerten. Auf diese Weise ergeben sich (für X_T wie X_S , α wie β) drei Werte: 1) die Mittelwerte der Parameterschätzer über alle 1000 Wiederholungen, 2) die Mittelwerte der (1000) entsprechenden Varianzen, und 3) die Varianz (über alle 1000 Wiederholungen) der Parameterschätzer, also $\bar{\hat{\beta}}, \overline{Var(\hat{\beta})}, Var(\hat{\beta})$. Eine zu geringe Anzahl Wiederholungen bewirkt, daß letztere Varianz viel größer ist als der Mittelwert der Einzelvarianzen. Bei einer angemessenen Anzahl sind beide etwa gleich.

Für diese Simulationsstudie wurden $\alpha^* = \text{expit}(0,1)$, $H \sim N(1; 0,2)$ und $R \sim N(\mu_R=1; \sigma_R^2)$ gewählt, so daß die mittlere Dosis einer exponierten Person 1 ist.

Die Einzelschritte der mit SAS programmierten Simulationsstudie sind die folgenden:

Für die Werte $\text{exp}(\beta) = \text{Odds Ratio} = 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20$

Für die Werte $\sigma_R = \mu_R \times 10\%, 20\%, 50\%, 100\%, 200\%$ (d.h. der Variationskoeffizient σ_R/μ_R der Dosisrate, der „Meßfehler“, wird variiert)

1000 Wiederholungen von

- Generieren der Kohorte von 5000 exponierten und 5000 nicht-exponierten
- Generieren individueller Flugstunden h_i und der Strahlendosisrate r_i entsprechend den jeweiligen Verteilungen
- Berechnen der Strahlendosen $X_T = h_i \times r_i$ und $X_S = h_i \times \mu_R$
- Generieren des Vitalstatus Y nach dem logistischen Modell mit Parametern α^* und β^*
- Logistische Regression von Y auf X_T und X_S

Vergleich der Mittelwerte und Varianzen der geschätzten Regressionsparameter.

Das zentrale Ergebnis dieser Simulationsstudie, die Verzerrung des Risikoschätzers, ist in Tabelle 4.26 zusammengefaßt. Sehr große Odds Ratios werden gegen 1,0 (bzw. $\beta = 0$) verzerrt, wie man es auch bei klassischen Meßfehlern erwarten würde. Aufgrund des fehlspezifizierten Modells ist auch der entgegengesetzte Effekt (für Odds Ratio zwischen 2 und 6) zu beobachten. Beschränkt man die Betrachtung auf den realistischeren Bereich $VK(R) < 50\%$ (das Konfidenzintervall für μ_R ginge in diesem Fall von 0 bis $2 \cdot \mu_R$), so ist der Effekt nicht ganz so deutlich. Zum Teil kann die Verzerrung der Risikoschätzer auch auf die Korrelation zwischen Meßgröße X_S und Meßfehler η zurückgeführt werden, die mit dem Variationskoeffizienten (VK) der Dosisrate steigt.

Tabelle 4.26: Ergebnis der Simulationsstudie: Beobachtetes Odds Ratio als Funktion von echtem Odds Ratio und dem Variationskoeffizienten der Dosisrate

Echtes OR	Variationskoeffizient von $R (= \sigma_R/\mu_R)$				
	10%	20%	50%	100%	200%
2	2,00	2,01	2,08	2,29	2,88
4	4,01	4,04	4,24	4,67	5,33
6	6,00	6,02	6,09	6,24	6,46
8	7,89	7,92	7,66	7,37	7,14
10	9,93	9,75	9,04	8,24	7,60
15	14,76	14,16	11,91	9,77	8,33
20	19,49	18,29	14,22	10,81	8,77
Corr(X_S, η)	0,14	0,27	0,57	0,81	0,94

4.8.2 Ergebnisse einer Simulationsstudie zur Lufthansa-Studie

Um den möglichen Effekt des Meßfehlers in der Lufthansa-Studie genauer abzuschätzen, wurden realitätsnähere Werte für die Parameter angenommen. Wie oben wurde $\alpha^* = \text{expit}(0,1)$ gewählt. Wegen des untersuchten Risikofaktors (ionisierender Strahlung) wurde das relative Risiko für Leukämie (4,67 pro Sv) aus den Daten von [41] berechnet und hier eingesetzt: $\beta^* = \text{Log}(4,67) = 1,54$. Aus der Validierungsstudie ist die Verteilung der individuellen Flugstunden $H \sim N(600; 120^2)$ und der Strahlendosisrate (in $\mu\text{Sv/h}$) für den Airbus 340 $R \sim N(3,91; 0,29^2)$ bekannt. Der Variationskoeffizient der Dosisrate σ_R/μ_R , beträgt ca. 7,4%. Angenommen wurde eine Beschäftigungsdauer von 30 Jahren.

Unter diesen Bedingungen (30 Jahre, 600 Std./Jahr, 3,91 $\mu\text{Sv/h}$) beträgt die Gesamtstrahlendosis bei Ende der Beschäftigung 0,07 Sv. Legt man das obige Odds Ratio von 4,67 pro Sv zugrunde, so ergibt sich für 0,07 Sv ein Odds Ratio von 1,2. Aus einem Odds Ratio von 9,90 pro Sv ergäbe sich ein Odds Ratio von 2,0.

Die Ergebnisse der Simulation für die Lufthansa-Studie sind in Tabelle 4.27 zusammengefaßt. Wegen der kleinen mittleren Dosis (0,07 Sv) unterscheidet sich die exponierte Gruppe kaum von der nicht exponierten, so daß sogar der Schätzer β_T (für die Regression der tatsächlichen Dosis X_T nach Y) ein breites Konfidenzintervall hat und leicht verzerrt ist (erwartet wird $\beta^* = \text{Log}(4,67) = 1,54$).

Tabelle 4.27: Ergebnisse der Simulation für die Lufthansa-Studie (für $\beta^* = \text{Log}(4,67) = 1,54$)

	Variationskoeffizient von $R (= \sigma_R/\mu_R)$				
	10%	20%	30%	40%	50%
Mittelwert von β_S	1,509	1,508	1,509	1,511	1,516
Mittlere Std. Abw. von β_S	0,886	0,886	0,887	0,887	0,887
Mittelwert von β_T	1,504	1,498	1,493	1,490	1,493
Mittlere Std. Abw. von β_T	0,877	0,850	0,811	0,763	0,713
Verhältnis β_S / β_T	1,00	1,01	1,01	1,01	1,02
$\text{Corr}(X_T, X_S)$	0,99	0,96	0,93	0,88	0,83
$\text{Corr}(X_T, \eta)$	0,14	0,27	0,39	0,49	0,57

Wie erwartet bzw. im vorangehenden Abschnitt gesehen, sinkt die Korrelation zwischen X_T und X_S mit wachsendem Meßfehler, während die Korrelation zwischen X_T und dem Fehlerterm η wächst.

Das Verhältnis der Schätzer β_S / β_T wächst mit steigendem Meßfehler nur wenig. Das Konfidenzintervall des Schätzers β_S (für die Regression der geschätzten Dosis X_S nach Y) ist für $\text{VK}(R) = 10\%$ kaum breiter und für $\text{VK}(R) = 50\%$ etwa 25% breiter als das von β_T . Aufgrund der großen Varianz dieser Schätzer lassen sich die Ergebnisse nicht voneinander unterscheiden.

Die erwartete Verzerrung des Risikoschätzers und seines Konfidenzintervalls in der Lufthansa-Studie ($\text{VK}(R) = 7,4\%$) sind vernachlässigbar. Für den größten Teil der Kohorte liegen detaillierte Informationen, wie die hier zugrunde gelegten Flugstunden, ohnehin nicht vor, so daß die Gesamtbeschäftigungsdauer als Surrogat verwendet werden muß.

4.9 Zusammenfassung

Die Berufsbiographien von ca. 4500 der insgesamt ca. 6000 untersuchten PilotInnen und Flugingenieure waren entweder vollständig oder konnten soweit ergänzt werden, daß individuelle Strahlendosen daraus geschätzt werden konnten.

Im Zeitraum zwischen 1956 bis 1997 ist die Anzahl der jährlichen Flugstunden leicht (von ca. 400 auf 550 Std.), die durchschnittliche jährliche Strahlendosis dagegen stark gestiegen (von 0,9 auf 1,7 mSv), was sich auf den zunehmenden Einsatz von Düsenflugzeugen zurückführen läßt. Am Ende ihrer ca. 30-jährigen Karriere haben PilotInnen durchschnittlich 15.000 Flugstunden absolviert und erreichen kumulative Strahlendosen von ca. 40 mSv. Es ist zu erwarten, daß heute noch aktive PilotInnen, die wesentlich

häufiger Düsen- als Propellerflugzeuge geflogen sind, etwas höhere Gesamtstrahlendosen aufweisen werden.

Diese Ergebnisse wurden anhand eines Datensatzes mit Informationen zu knapp 400.000 während eines Jahres durchgeführten Flügen aller 4000 PilotInnen des Lufthansa-Konzerns validiert. Die mittleren Strahlendosisraten an Bord von Langstreckenflugzeugen liegen zwischen 3,2 und 3,7 $\mu\text{Sv/h}$, an Bord anderer Flugzeuge zwischen 1,2 und 2,4 $\mu\text{Sv/h}$. Aus den Validierungsdaten geschätzte jährliche Strahlendosen von Langstrecken-PilotInnen liegen bei 2 mSv gegenüber 1 mSv bei den anderen PilotInnen, was zum Teil an den höheren Strahlendosisraten und zum Teil an der höheren Anzahl Flugstunden liegt.

Die mit der Job-Expositions-Matrix und den aggregierten Validierungsdaten geschätzten Strahlendosen korrelieren sehr gut mit den aus Einzelflügen summierten Dosen ($R = 0,862$). Diese Ergebnisse belegen die Validität des Einsatzes einer Job-Expositions-Matrix als Schätzverfahren in der Hauptstudie.

Überraschenderweise ist auch die Korrelation der individuellen Gesamtbeschäftigungsdauer mit der Anzahl der Flugstunden und der geschätzten Gesamtstrahlendosis hoch. In der epidemiologischen Studie läßt sich demnach die Beschäftigungsdauer für das Kabinenpersonal als Surrogat für die Strahlendosis einsetzen.

Der Einfluß der vielen potentiellen Fehlerquellen bei der Erstellung der Job-Expositions-Matrix und den anderen Schritten der Dosisermittlung wurde beschrieben. Durch diese Unsicherheiten vergrößert sich die Streuung der individuellen Strahlendosen um ca. 10%. Es ist jedoch mit starken Mittelungseffekten zu rechnen, da ein(e) PilotIn im Laufe ihrer/seiner Karriere mehrere Flugzeugtypen fliegt.

Die Verzerrung des Risikoschätzers der epidemiologischen Studie und seines Konfidenzintervalls aufgrund des Schätzfehlers bei der Dosisermittlung wurde durch Simulationsstudien untersucht. Dabei stellte sich heraus, daß diese Verzerrung bei den zu erwartenden kleinen Strahlendosen vernachlässigbar ist.

5 Diskussion

Die Auswirkungen ionisierender Strahlung auf die menschliche Gesundheit sind verhältnismäßig gut erforscht, vor allem im Bereich hoher und mittlerer Dosen. Im Bereich niedriger Strahlendosen und Strahlendosisraten bestehen jedoch noch Unsicherheiten. Aus gesundheitswissenschaftlicher Sicht sind gerade die gesundheitlichen Auswirkungen niedriger Strahlendosen von Interesse, weil eine große Zahl von Personen über längere Zeiträume exponiert ist. Es handelt sich dabei nicht nur um spezifische Gruppen beruflich exponierter Personen (Beschäftigte in der Nuklearindustrie, Bergarbeiter, Radiologen, Flugpersonal), sondern insbesondere um die „im Alltag“ exponierte Allgemeinbevölkerung, die z. B. durch häusliche Radonbelastung, durch medizinische Diagnostik und wegen des veränderten Urlaubsverhaltens zunehmend auch durch kosmische Strahlung.

Kosmische Strahlung nimmt innerhalb der ionisierenden Strahlung eine besondere Stellung ein, da ein Großteil (ca. 60%) der Strahlendosis von Neutronen stammt und bisher keine ausreichenden epidemiologischen Daten zur Bewertung des Krebsrisikos nach Exposition durch Neutronen existieren [112].

Mit dieser Arbeit wird ein Beitrag geleistet, diese Wissenslücke zu schließen. Im Rahmen einer nationalen Kohortenstudie bei Piloten und Kabinenpersonal wurde eine detaillierte Erfassung und Schätzung der Strahlenexposition vorgenommen. Diese hat zum einen das Ziel, die Exposition dieser Personengruppe weitaus exakter als bisher zu beschreiben, und ist zum anderen Grundlage der statistischen Auswertung der Kohortenstudie.

Die berufliche Belastung mit ionisierender Strahlung aus künstlichen Quellen ist schon seit langem als Gefahrenquelle bekannt. Erst später wurde natürliche Strahlung als Gefahrenquelle erkannt. Kosmische Strahlung ist in der Zivilluftfahrt in den Blickpunkt gerückt, seit die Flughöhen – und damit die Strahlenbelastung – durch den Einsatz von Düsenmaschinen gestiegen sind. So sind PilotInnen und andere Personen, die in Düsenflugzeugen arbeiten, einer nicht zu vernachlässigenden Strahlenexposition ausgesetzt. Seit 1996 existieren entsprechende europäische Strahlenschutzrichtlinien [67], die bei der Umsetzung in die deutsche Strahlenschutzverordnung berücksichtigt werden. Neben dem Flugpersonal selbst hat die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK) daher Interesse an Erkenntnissen über Qualität und Höhe der Exposition des fliegenden Personals, wie sie hier präsentiert werden. Vom internationalen Interesse an diesem Thema zeugen nicht zuletzt Aktivitäten der international Strahlenschutzkommission (ICRP) [113] und von der EU-Kommission geförderte Forschung [66] und mitveranstaltete Tagungen [134].

Sowohl das Flugpersonal als auch die restliche Bevölkerung, die für das Thema Strahlung sensibilisiert ist, sind verunsichert und verlangen Informationen zu potentiellen gesundheitlichen Risiken, was durch Fernsehsendungen (WDR-Sendung Monitor vom

29.06.2000) und Anfragen von Zeitschriften (Flug- und Reisemedizin [262], Deutsches Ärzteblatt [24]) belegt wird.

Bisherige Messungen und Schätzungen der Strahlenbelastung des Flugpersonals wurden vornehmlich auf Langstreckenflügen für nördliche Routen oder Polarrouten durchgeführt. Sie geben also obere Grenzen der möglichen Belastung des Flugpersonals an. Durch den Einsatz von Flugplänen konnten wesentlich realistischere Schätzungen der durchschnittlichen Strahlendosisraten für das Cockpitpersonal der Deutschen Lufthansa AG berechnet werden. Die hier vorgestellte Job-Expositions-Matrix faßt Strahlendosisraten für 23 Flugzeugtypen für den Zeitraum von 1960 bis 1997 zusammen und ist damit die detaillierteste und genaueste derzeit verfügbare Quantifizierung der Strahlenexposition des Flugpersonals.

Die Ermittlung genauer Risikoschätzer in der epidemiologischen Studie verlangt eine möglichst gute Erfassung der individuellen Strahlenexposition. Somit sind eine sorgfältige Planung der Expositionserfassung und die Kontrolle ihrer Qualität wichtig. Zu diesem Zwecke wurde eine Validierungsstudie durchgeführt, in der detaillierte Daten zu den Flügen von ca. 4000 Piloten im Zeitraum von einem Jahr ausgewertet wurden. Diese Auswertung konnte aus Kosten- und Zeitgründen nicht für die Gesamtkohorte gemacht werden. In dieser Arbeit wurden die Fehler des gewählten Verfahrens zur Expositionsschätzung quantifiziert und es wurde nachgewiesen, daß die Verwendung einer Job-Expositions-Matrix trotz ihrer methodisch bedingten Fehler hinreichend gute Ergebnisse liefert.

Die Fehler der Expositionsschätzung müssen bei der Auswertung epidemiologischer Studien berücksichtigt werden, da sie die Risikoschätzer verzerren können und ihre Nichtberücksichtigung eine falsche Genauigkeit vortäuscht. Für Dosisraten enthaltende Job-Expositions-Matrizen (und das entsprechende Fehlermodell) liegen noch keine theoretischen Ergebnisse über die Auswirkungen solcher Fehler vor. Daher wurden sie in einer Simulationsstudie untersucht. Es stellte sich heraus, daß die zu erwartenden Verzerrungen der Risikoschätzer im Falle der Lufthansa-Studie sehr gering sind.

Anhand der Daten des Cockpitpersonals wurde weiterhin untersucht, wie gut die Beschäftigungsdauer mit der geschätzten Strahlendosis korreliert. Die Auswertung ist für das Kabinenpersonal relevant, denn für diese Personen ist außer der Beschäftigungsdauer keine weitere Information über die Strahlenexposition verfügbar. In dieser Arbeit wurde nachgewiesen, daß beide Größen gut korrelieren und die Gesamtbeschäftigungsdauer damit ein valides Surrogatmaß für die Strahlenbelastung des Kabinenpersonals ist.

Dies ist die erste Arbeit, die sich im Rahmen einer Kohortenstudie über das Flugpersonal eines zivilen Luftfahrtunternehmens mit der Erfassung der Exposition durch kosmische Strahlung befaßt. Bisher war dies wegen mangelnder Software nicht möglich, so daß selbst große Kohortenstudien die Beschäftigungsdauer als Surrogatmaß für die

Strahlenexposition verwenden mußten. Diese Arbeit zeigt, daß retrospektive Schätzungen bis in die 60er Jahre möglich sind.

Viele der existierenden Schätzungen und Messungen der ionisierenden Strahlung an Bord von Passagierflugzeugen zielen auf die Ermittlung oberer Grenzen der möglichen Exposition von Besatzung und Passagieren. Im Rahmen der Lufthansa-Studie werden dagegen möglichst exakte Schätzungen der tatsächlichen Exposition der Beschäftigten benötigt, denn die Verwendung oberer Grenzen würde zu einer Überschätzung der Strahlendosis und so zu einer Unterschätzung möglicher Gesundheitseffekte führen. Für die hier gewählte Methode der Expositionserfassung werden Informationen aus Taschenflugplänen und individuellen Flugstunden verwendet, um zu einer realitätsnahen Schätzung zu kommen.

Durch die Beschränkung auf ionisierende Strahlung und die Verwendung bestehender Datenquellen wird zum einen erreicht, daß die Qualität der Daten für alle untersuchten Personen homogen ist und nicht unter den Problemen interview- oder fragebogenbasierter Methoden leidet. Zum anderen ist eine wesentlich präzisere Validierung der JEM möglich, als dies bei einem Vergleich der JEM-Ergebnisse mit Einschätzungen durch Experten der Fall wäre.

Die Verwendung historischer Datenquellen für epidemiologische Studien ist meist aus zwei Gründen problematisch. Zum einen sind die verwendeten Daten nicht zum Zwecke der Studie gesammelt worden, so daß sie in ihrer Genauigkeit und ihrem Informationsgehalt nicht dem Optimum der Studie entsprechen. Zum anderen sind diese Aufzeichnungen teilweise lückenhaft, so daß fehlende Werte imputiert werden müssen. Das ideale Datenmaterial für diese Studie wären die in der Validierungsstudie verwendeten Aufzeichnungen, die zwar seit jeher gemacht werden, aber nicht über längere Zeiträume aufbewahrt werden.

Auf der Basis dieser Daten konnte die Qualität der Job-Expositions-Matrix nur für die Periode eines Jahres, stellvertretend für alle anderen Jahre evaluiert werden. Es sind jedoch keine nennenswerten Verzerrungen zu erwarten, denn das Berechnungsverfahren für die JEM ist für den gesamten Beobachtungszeitraum identisch.

Aus den hier vorgelegten jährlichen Strahlendosen läßt sich ableiten, daß die Gesamtstrahlendosis nach einer 30-jährigen Karriere unter 100 mSv liegt. Ausgehend vom Kenntnisstand über andere strahlenexponierte Berufsgruppen sind zwar keine stark erhöhten Krebs-Mortalitätsraten zu erwarten, aber ein solcher Schluß ist noch verfrüht, denn die relative biologische Wirksamkeit von Neutronenstrahlung, die nach den in [113] festgelegten Wichtungsfaktoren rechnerisch einen hohen Anteil an der Strahlendosis hat, wird noch diskutiert. Erst die epidemiologische Auswertung der Lufthansa-Studie wird Hinweise darauf geben können, ob diese Wichtungsfaktoren bisher über- oder unterschätzt worden sind.

Das Programm CARI, mit dem in dieser Arbeit Strahlendosen für einzelne Flüge berechnet worden sind, verwendet diese Wichtungsfaktoren, um eine effektive Strahlendosis aus den (nicht ausgegebenen) physikalischen Strahlendosen zu berechnen. Ein Kritikpunkt an diesem Programm, neben der genannten Unsicherheit der Wichtungsfaktoren, sind die in CARI verwendeten Annahmen und Vereinfachungen. Zu den wichtigsten zählen die Verwendung monatlicher Mittelwerte des heliozentrischen Potentials anstelle von täglichen Werten, die Nichtberücksichtigung von solaren Teilchenereignissen und die Approximation der Flugstrecke durch einen Großkreis um die Erdkugel. Für die prospektive Expositionserfassung des Flugpersonals im Rahmen der betrieblichen Überwachung zum Strahlenschutz ist die Verwendung präziserer Software möglich und wünschenswert. Für die retrospektive Rekonstruktion durchschnittlicher Strahlendosisraten reicht die von CARI gebotene Genauigkeit aber völlig aus.

Die epidemiologische Studie wird zeigen, für welche Todesursachen es eine Beziehung zwischen der Strahlendosis und der Mortalitätsrate gibt. Dadurch wird nicht nur eine feinere mathematische Modellierung der Dosis-Wirkungs-Beziehung möglich sein, sondern diese Ergebnisse werden auch Hinweise auf Interaktionen ionisierender Strahlung mit anderen möglichen Risikofaktoren für das Flugpersonal geben, über die bisher zu wenig bekannt ist.

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur Verbesserung der Kenntnis der Auswirkungen kosmischer Strahlung auf die menschliche Gesundheit und somit zu einer rationalen Grundlage für den Schutz des Flugpersonals und der Passagiere, die das Flugzeug als Verkehrsmittel zunehmend intensiv nutzen.

Literatur

1. Ahrens W (1999): Retrospective Assessment of Occupational Exposure in Case-Control Studies. Ecomed Vlg., Landsberg.
2. Ahrens W, Jöckel KH, Brochard P, Bolm Audorff U et al. (1993): Retrospective assessment of asbestos exposure--I. Case-control analysis in a study of lung cancer: efficiency of job-specific questionnaires and job exposure matrices. *Int.J.Epidemiol.* 22 Suppl 2: S83-95.
3. Akiba S, Sun Q, and Tao Z (1997): Infant leukaemia mortality among the residents in high-background-radiation areas in Guangdong, China. Wei L. *High Levels of Natural Radiation*(96): 255-262. Amsterdam, Elsevier.
4. Albert RE, Shore RE, and Harley N (1991): Cancer risk among staff at two radiotherapy departments in Denmark. *Br J Radiol* 64: 455-460.
5. Andersson M, Carstensen B, and Visfeldt J (1993): Leukemia and other related hematological disorders among Danish patients exposed to Thorotrast. *Radiat Res* 134(2): 224-233.
6. Andersson M, Juel K, and Storm HH (1993): Pattern of mortality among Danish thorotrast patients. *J Clin Epidemiol* 46(7): 637-644.
7. Aoyama T (1989): Radiation risk of Japanese and Chinese low dose-repeatedly irradiated population. *Sangyo Ika Daigaku Zasshi* 11 Suppl: 432-442.
8. Armstrong B, Theriault G, Guenel P, Deadman J et al. (1994): Association between exposure to pulsed electromagnetic fields and cancer in electric utility workers in Quebec, Canada, and France [see comments]. *Am.J.Epidemiol.* 140(9): 805-820.
9. Armstrong BG (1998): Effect of measurement error on epidemiological studies of environmental and occupational exposures. *Occup Environ Med* 55(10): 651-656.
10. Ashmore JP, Krewski D, Zielinski JM, Jiang H et al. (1998): First analysis of mortality and occupational radiation exposure based on the National Dose Registry of Canada. *Am J Epidemiol* 148(6): 564-574.
11. Astakhova LN, Anspaugh LR, Beebe GW, Bouville A et al. (1998): Chernobyl-related thyroid cancer in children of Belarus: a case-control study. *Radiat Res* 150(3): 349-356.
12. Bagshaw M, Irvine D, and Davies DM (1996): Exposure to cosmic radiation of British Airways flying crew on ultralonghaul routes. *Occup.Environ.Med.* 53(7): 495-498.
13. Band PR, Le ND, Fang R, Deschamps M et al. (1996): Cohort study of Air Canada pilots: mortality, cancer incidence, and leukemia risk. *Am.J.Epidemiol.* 143(2): 137-143.

14. Band PR, Spinelli JJ, Ng VT, Moody J et al. (1990): Mortality and cancer incidence in a cohort of commercial airline pilots. *Aviat.Space.Environ.Med.* 61(4): 299-302.
15. Bashir SA and Duffy SW (1995): Correction of risk estimates for measurement error in epidemiology. *Methods Inf.Med.* 34(5): 503-510.
16. Baverstock KF, Papworth D, and Vennart J (1981): Risks of radiation at low dose rates. *Lancet* 1(8217): 430-433.
17. Baverstock KF and Papworth DG (1989): The UK radium luminiser survey. Taylor DM. 21: 72-76. BIR Report.
18. Beck P, Bartlett D, O'Brien K, and Schrewe UJ (1999): In-flight validation and routine measurements. *Radiation Protection Dosimetry* 84(4): 303-308.
19. Beral V, Fraser P, Carpenter L, Booth M et al. (1988): Mortality of employees of the Atomic Weapons Establishment, 1951-82. *BMJ* 297(6651): 757-770.
20. Bhatia S, Robison LL, Oberlin O, Greenberg M et al. (1996): Breast cancer and other second neoplasms after childhood Hodgkin's disease [see comments]. *N Engl J Med* 334(12): 745-751.
21. Binks KS, Thomas DI, and McElvenny D (1989): Mortality of workers at the Chapelcross plant of British Nuclear Fuels. Goldfinch EP. *Radiation Protection - Theory and Practice*: 49-52. Bristol, Instituts of Physics.
22. Bithell JF and Stewart PA (1975): Prenatal irradiation and childhood malignancy: a review of British data from the Oxford survey. *Br J Cancer* 31(271): 287.
23. Blettner M and Becher H (1990): Adjusting for misselection using subsampling in epidemiological studies. *Stat.Med.* 9(11): 1339-1352.
24. Blettner M and Grosche B (1997): Tumorrisiko bei fliegendem Personal. *Dt Ärztebl* 94(3): A104-109.
25. Blettner M and Zeeb H (1999): Epidemiological Studies Among Pilots and Cabin Crew. *Radiation Protection Dosimetry* 86(4): 269-273.
26. Boice-JD J, Day NE, Andersen A, Brinton LA et al. (1985): Second cancers following radiation treatment for cervical cancer. An international collaboration among cancer registries. *J Natl Cancer Inst* 74(5): 955-975.
27. Boice-JD J, Preston DL, and Davis FG (1991): Frequent chest x-ray fluoroscopy and breast cancer incidence among tuberculosis patients in Massachusetts. *Radiat Res* 125: 214-222.
28. Boice JDJ, Blettner M, and Auvinen A (2000): Epidemiologic studies of pilots and aircrew [In Process Citation]. *Health Phys* 79(5): 576-584.

29. Boice JDJ, Engholm G, Kleinerman RA, Blettner M et al. (1988): Radiation dose and second cancer risk in patients treated for cancer of the cervix. *Radiat Res* 116(1): 3-55.
30. Boice JDJ, Harvey EB, Blettner M, Stovall M et al. (1992): Cancer in the contralateral breast after radiotherapy for breast cancer [see comments]. *N Engl J Med* 326(12): 781-785.
31. Boice JDJ, Morin MM, Glass AG, Friedman GD et al. (1991): Diagnostic x-ray procedures and risk of leukemia, lymphoma, and multiple myeloma [published erratum appears in *JAMA* 1991 Jun 5;265(21):2810]. *JAMA* 265(10): 1290-1294.
32. Bouyer J, Dardenne J, and Hemon D (1995): Performance of odds ratios obtained with a job-exposure matrix and individual exposure assessment with special reference to misclassification errors. *Scand.J.Work.Environ.Health* 21(4): 265-271.
33. Breslow NE and NE Day (1987): Volume II. The design and analysis of cohort studies. International Agency for Research on Cancer, Lyon, France.
34. Cardis E, Gilbert ES, Carpenter L, Howe G et al. (1995): Effects of low doses and low dose rates of external ionizing radiation: cancer mortality among nuclear industry workers in three countries [see comments]. *Radiat Res* 142(2): 117-132.
35. Cardis E, Gilbert ES, Carpenter L, Howe G et al. (1995): Effects of low doses and low dose rates of external ionizing radiation: cancer mortality among nuclear industry workers in three countries. *Radiat.Res.* 142(2): 117-132.
36. Carnes BA, Groer PG, and Kotek TJ (1997): Radium dial workers: issues concerning dose response and modeling. *Radiat Res* 147(6): 707-714.
37. Carpenter L, Higgins C, Douglas A, Fraser P et al. (1994): Combined analysis of mortality in three United Kingdom nuclear industry workforces, 1946-1988. *Radiat Res* 138(2): 224-238.
38. Carroll RJ, Roeder K, and Wassermann L (1999): Flexible parametric measurement error models. *Biometrics* 55: 44-54.
39. Carroll RJ, D Ruppert, LA Stefanski (1995): *Measurement Error in Nonlinear Models*. CRC Press,
40. Chen C-L and JW van Ness (1999): *Statistical Regression with Measurement Error* (Kendall's Library of Statistics, 6). Edward Arnold, London.
41. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (1990): *Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation; BEIR V*. National Academy Press, Washington, DC.
42. Coughlin SS and Chiazze LJ (1990): Job-exposure matrices in epidemiologic research and medical surveillance. *Occup Med* 5(3): 633-646.

43. Crawford WA and Holcomb LC (1991): Environmental tobacco smoke (ETS) in airliners--a health hazard evaluation. *Aviat.Space.Environ.Med.* 62(6): 580-586.
44. Curtis RE, Boice JDJ, Stovall M, Bernstein L et al. (1992): Risk of leukemia after chemotherapy and radiation treatment for breast cancer [see comments]. *N Engl J Med* 326(26): 1745-1751.
45. Curtis RE, Boice JDJ, Stovall M, Bernstein L et al. (1994): Relationship of leukemia risk to radiation dose following cancer of the uterine corpus. *J Natl Cancer Inst* 86(17): 1315-1324.
46. Damber L, Larsson LG, Johansson L, and Norin T (1995): A cohort study with regard to the risk of haematological malignancies in patients treated with x-rays for benign lesions in the locomotor system. I. Epidemiological analyses. *Acta Oncol* 34(6): 713-719.
47. Darby S, Whitley E, Silcocks P, Thakrar B et al. (1998): Risk of lung cancer associated with residential radon exposure in south-west England: a case-control study. *Br.J.Cancer* 78(3): 394-408.
48. Darby SC, Reeves G, Key T, Doll R et al. (1994): Mortality in a cohort of women given X-ray therapy for metropathia haemorrhagica. *Int J Cancer* 56(6): 793-801.
49. Darby SC, Whitley E, Howe GR, Hutchings SJ et al. (1995): Radon and cancers other than lung cancer in underground miners: a collaborative analysis of 11 studies. *J Natl Cancer Inst* 87(5): 378-384.
50. Davis FG, Boice JDJ, Hrubec Z, and Monson RR (1989): Cancer mortality in a radiation-exposed cohort of Massachusetts tuberculosis patients. *Cancer Res* 49(21): 6130-6136.
51. de Vathaire F, Grimaud E, and Diallo I (1997): Thyroid tumours following fractionated irradiation in childhood. IAEA-TECDOC-976: 121-124. Vienna. *Low Doses of Ionizing Radiation: Biological Effects and Regulatory Control.*
52. de Vathaire F, Hawkins M, Campbell S, Oberlin O et al. (1999): Second malignant neoplasms after a first cancer in childhood: temporal pattern of risk according to type of treatment. *Br J Cancer* 79(11-12): 1884-1893.
53. de Vathaire F, Le Vu B, and Vathaire CC (2000): Thyroid cancer in French Polynesia between 1985 and 1995: influence of atmospheric nuclear bomb tests performed at Mururoa and Fangataufa between 1966 and 1974. *Cancer Causes Control* 11(1): 59-63.
54. de Vathaire F, Schlumberger M, Delisle MJ, Francese C et al. (1997): Leukaemias and cancers following iodine-131 administration for thyroid cancer. *Br J Cancer* 75(5): 734-739.

55. de Vathaire F, Shamsaldin A, Grimaud E, Campbell S et al. (1995): Solid malignant neoplasms after childhood irradiation: decrease of the relative risk with time after irradiation. *C R Acad Sci III* 318(4): 483-490.
56. DeGroot LJ, Reilly M, Pinnameneni K, and Refetoff S (1983): Retrospective and prospective study of radiation-induced thyroid disease. *Am J Med* 74(5): 852-862.
57. Delongchamp RR, Mabuchi K, Yoshimoto Y, and Preston DL (1997): Cancer mortality among atomic bomb survivors exposed in utero or as young children, October 1950-May 1992. *Radiat Res* 147(3): 385-395.
58. Dement WC, Seidel WF, Cohen SA, Bliwise NG et al. (1986): Sleep and wakefulness in aircrew before and after transoceanic flights. *Aviat.Space.Environ Med* 57(12 Pt 2): B14-28.
59. Désir D, Van Cauter E, Fang VS, Martino E et al. (1981): Effects of "jet lag" on hormonal patterns. I. Procedures, variations in total plasma proteins, and disruption of adrenocorticotropin-cortisol periodicity. *J.Clin.Endocrinol.Metab.* 52(4): 628-641.
60. Dobyns BM, Sheline GE, Workman JB, Tompkins EA et al. (1974): Malignant and benign neoplasms of the thyroid in patients treated for hyperthyroidism: a report of the cooperative thyrotoxicosis therapy follow-up study. *J Clin Endocrinol Metab* 38(6): 976-998.
61. Doody MM, Lonstein JE, and Stovall M (2000): Breast cancer mortality following diagnostic x-rays: findings from the U.S. scoliosis cohort study. *Spine*
62. dos SS, I, Jones M, Malveiro F, and Swerdlow A (1999): Mortality in the Portuguese thorotrast study. *Radiat Res* 152(6 Suppl): S88-S92.
63. dos SS, I, Malveiro F, and Portugal R (1995): Mortality from primary liver cancers in the Portuguese Thorotrast cohort study. van Kaick G. 229-233Singapore, World Scientific. *Health Effects of Internally Deposited Radionuclides: Emphasis on Radiation and Thorium.*
64. Douglas AJ, Omar RZ, and Smith PG (1994): Cancer mortality and morbidity among workers at the Sellafield plant of British Nuclear Fuels. *Br J Cancer* 70: 1232-1243.
65. Epidemiological Study Group of Nuclear Workers (Japan) (1997): First analysis of mortality of nuclear industry workers in Japan. *Health Phys* 32: 173-184.
66. EURADOS (European Dosimetry Group) (1997): Exposure of air crew to cosmic radiation. CR-97-96-661-EN-C(85), European Commission.
67. EURATOM (1996): EURATOM Standards on Radiation Protection, Directive 96/29/Euratom. *EC Official Journal* 19(L 159)

68. European Commission (1996): Exposure of air crew to cosmic radiation. A report of EURADOS Working Group 11 "The radiation exposure and monitoring of air crew" Radiation Protection 85. EURADOS Report 1996-01
69. Felsberger E, Beck P, and O'Brien K (2001): FREE BIG Calculator. Hammer G. (1.1)Graz, Austria, University of Graz.
70. Felsberger E and O'Brien K (2000): Analysis of flight profiles from the MOZAIC database. Hammer G. 1999.
71. Ferrari A, Rancati T, and Sala PR (1997): FLUKA applications in high energy problems: from LHC to ICARUS and atmospheric showers. 165KEK, Tsukuba, Japan. Proceedings of The Third Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments (SARE-3).
72. Fletcher AC, Engholm G, and Englund A (1993): The risk of lung cancer from asbestos among Swedish construction workers: self-reported exposure and a job exposure matrix compared. *Int.J.Epidemiol.* 22 Suppl 2: S29-35.
73. Forastiere F, Sperati A, Cherubini G, Miceli M et al. (1998): Adult myeloid leukaemia, geology, and domestic exposure to radon and gamma radiation: a case control study in central Italy. *Occup Environ Med* 55(2): 106-110.
74. Franklyn JA, Maisonneuve P, Sheppard M, Betteridge J et al. (1999): Cancer incidence and mortality after radioiodine treatment for hyperthyroidism: a population-based cohort study [see comments]. *Lancet* 353(9170): 2111-2115.
75. Fraser P, Carpenter L, Maconochie N, Higgins C et al. (1993): Cancer mortality and morbidity in employees of the United Kingdom Atomic Energy Authority, 1946-86. *Br J Cancer* 67(3): 615-624.
76. Friedberg W (1999): A Computer Program for Calculating Flight Radiation Dose. *The Federal Air Surgeon's Medical Bulletin* 99(1): 9-11.
77. Friedberg W, Faulkner DN, Snyder L, Darden EB, Jr. et al. (1989): Galactic cosmic radiation exposure and associated health risks for air carrier crewmembers. *Aviat.Space.Environ.Med.* 60(11): 1104-1108.
78. Friedberg W, Snyder L, Faulkner DN, Darden EB et al. (1992): Radiation Exposure of Air Carrier Crewmembers II. 1-16
79. Frome EL, Cragle DL, Watkins JP, Wing S et al. (1997): A mortality study of employees of the nuclear industry in Oak Ridge, Tennessee [published erratum appears in *Radiat Res* 1997 Sep;148(3):297-8]. *Radiat Res* 148(1): 64-80.
80. Gilbert ES, Cragle DL, and Wiggs LD (1993): Updated analyses of combined mortality data for workers at the Hanford Site, Oak Ridge National Laboratory, and Rocky Flats Weapons Plant [see comments]. *Radiat Res* 136(3): 408-421.

81. Gilbert ES, Omohundro E, Buchanan JA, and Holter NA (1993): Mortality of workers at the Hanford site: 1945-1986. *Health Phys* 64(6): 577-590.
82. Gilbert ES, Tarone R, Bouville A, and Ron E (1998): Thyroid cancer rates and 131I doses from Nevada atmospheric nuclear bomb tests [see comments]. *J Natl Cancer Inst* 90(21): 1654-1660.
83. Goldberg M, Kromhout H, Guenel P, Fletcher AC et al. (1993): Job exposure matrices in industry. *Int.J.Epidemiol.* 22 Suppl 2: S10-S15.
84. Graeber RC, Lauber JK, Connell LJ, and Gander PH (1986): International aircrew sleep and wakefulness after multiple time zone flights: a cooperative study. *Aviat.Space.Environ Med* 57(12 Pt 2): B3-9.
85. Grayson JK (1996): Radiation exposure, socioeconomic status, and brain tumor risk in the US Air Force: a nested case-control study. *Am.J.Epidemiol.* 143(5): 480-486.
86. Grayson JK and Lyons TJ (1996): Cancer incidence in United States Air Force aircrew, 1975-89. *Aviat.Space.Environ.Med.* 67(2): 101-104.
87. Gribben MA, Weeks JL, and Howe GR (1993): Cancer mortality (1956-1985) among male employees of Atomic Energy of Canada Limited with respect to occupational exposure to low-linear-energy-transfer ionizing radiation. *Radiat Res* (133): 373-380.
88. Griem ML, Kleinerman RA, Boice JDJ, Stovall M et al. (1994): Cancer following radiotherapy for peptic ulcer. *J Natl Cancer Inst* 86(11): 842-849.
89. Gundestrup M and Storm HH (1999): Radiation-induced acute myeloid leukaemia and other cancers in commercial jet cockpit crew: a population-based cohort study. *Lancet* 354(9195): 0-0.
90. Gusev BI, Rosenson RI, and Abylkassimova ZN (1998): The Semipalatinsk nuclear test site: a first analysis of solid cancer incidence (selected sites) due to test-related radiation. *Radiat Environ Biophys* 37(3): 209-214.
91. Haldorsen T, Reitan JB, and Tveten U (2000): Cancer incidence among Norwegian airline pilots. *Scand J Work Environ Health* 26(2): 106-111.
92. Hall P, Berg G, Bjelkengren G, Boice JDJ et al. (1992): Cancer mortality after iodine-131 therapy for hyperthyroidism. *Int J Cancer* 50(6): 886-890.
93. Hall P, Boice JDJ, Berg G, Bjelkengren G et al. (1992): Leukaemia incidence after iodine-131 exposure [see comments]. *Lancet* 340(8810): 1-4.
94. Hall P, Holm LE, Lundell G, Bjelkengren G et al. (1991): Cancer risks in thyroid cancer patients. *Br J Cancer* 64(1): 159-163.
95. Hall P, Mattsson A, and Boice JDJ (1996): Thyroid cancer after diagnostic administration of iodine-131. *Radiat Res* 145(1): 86-92.

96. Hamilton TE, van Belle G, and LoGerfo JP (1987): Thyroid neoplasia in Marshall Islanders exposed to nuclear fallout. *JAMA* 258(5): 629-635.
97. Harding R (1994): Cabin air quality in aircraft [editorial]. *BMJ*. 308(6926): 427-428.
98. Haugli L, Skogstad A, and Hellesoy OH (1994): Health, sleep, and mood perceptions reported by airline crews flying short and long hauls. *Aviat.Space Environ.Med.* 65(1): 27-34.
99. Hawkes AP and Wilkins III JR (1997): Assessing agreement between two job-exposure matrices. *Scand J Work Environ Health* 23: 140-148.
100. Hawkins MM, Wilson LM, Burton HS, Potok MH et al. (1996): Radiotherapy, alkylating agents, and risk of bone cancer after childhood cancer. *J Natl Cancer Inst* 88(5): 270-278.
101. Hawkins MM, Wilson LM, Stovall MA, Marsden HB et al. (1992): Epipodophylotoxins, alkylating agents, and radiation and risk of secondary leukaemia after childhood cancer. *BMJ* 304(6832): 951-958.
102. Hildreth NG, Shore RE, and Dvoretzky PM (1989): The risk of breast cancer after irradiation of the thymus in infancy [see comments]. *N Engl J Med* 321(19): 1281-1284.
103. Hildreth NG, Shore RE, Hempelmann LH, and Rosenstein M (1985): Risk of extrathyroid tumors following radiation treatment in infancy for thymic enlargement. *Radiat Res* 102(3): 378-391.
104. Hille R, Hill P, Bouisset P, Calmet D et al. (1998): Population dose near the Semipalatinsk test site. *Radiat Environ Biophys* 37(3): 143-149.
105. Hoar S (1983): Job exposure matrix methodology. *J.Toxicol.Clin.Toxicol.* 21(1-2): 9-26.
106. Holford TR and Stack C (1995): Study design for epidemiologic studies with measurement error. *Stat.Methods Med.Res.* 4(4): 339-358.
107. Holm LE, Hall P, Wiklund K, Lundell G et al. (1991): Cancer risk after iodine-131 therapy for hyperthyroidism [see comments]. *J Natl Cancer Inst* 83(15): 1072-1077.
108. Holm LE, Wiklund KE, Lundell GE, Bergman NA et al. (1989): Cancer risk in population examined with diagnostic doses of ¹³¹I. *J Natl Cancer Inst* 81(4): 302-306.
109. Howe GR (1995): Lung cancer mortality between 1950 and 1987 after exposure to fractionated moderate-dose-rate ionizing radiation in the Canadian fluoroscopy cohort study and a comparison with lung cancer mortality in the Atomic Bomb survivors study. *Radiat Res* 142(3): 295-304.

110. Howe GR and McLaughlin J (1996): Breast cancer mortality between 1950 and 1987 after exposure to fractionated moderate-dose-rate ionizing radiation in the Canadian fluoroscopy cohort study and a comparison with breast cancer mortality in the atomic bomb survivors study. *Radiat Res* 145(6): 694-707.
111. IARC Study Group on Cancer Risk among Nuclear Industry Workers (1994): Direct estimates of cancer mortality due to low doses of ionising radiation: an international study. IARC Study Group on Cancer Risk among Nuclear Industry Workers [see comments]. *Lancet* 344(8929): 1039-1043.
112. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans (2000): Ionizing Radiation, Part 1: X- and Gamma (γ)-Radiation, and Neutrons. (75)IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans.
113. ICRP (1991): 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60. Oxford, Pergamon Press. ICRP Publications.
114. Inskip PD, Ekblom A, Galanti MR, Grimelius L et al. (1995): Medical diagnostic x rays and thyroid cancer. *J Natl Cancer Inst* 87(21): 1613-1621.
115. Inskip PD, Hartshorne MF, Tekkel M, Rahu M et al. (1997): Thyroid nodularity and cancer among Chernobyl cleanup workers from Estonia. *Radiat Res* 147(2): 225-235.
116. Inskip PD, Kleinerman RA, Stovall M, Cookfair DL et al. (1993): Leukemia, lymphoma, and multiple myeloma after pelvic radiotherapy for benign disease. *Radiat Res* 135(1): 108-124.
117. Inskip PD, Monson RR, Wagoner JK, Stovall M et al. (1990): Cancer mortality following radium treatment for uterine bleeding [published erratum appears in *Radiat Res* 1991 Dec;128(3):326]. *Radiat Res* 123(3): 331-344.
118. Inskip PD, Stovall M, and Flannery JT (1994): Lung cancer risk and radiation dose among women treated for breast cancer [see comments]. *J Natl Cancer Inst* 86(13): 983-988.
119. Irvine D and Davies DM (1992): The mortality of British Airways pilots, 1966-1989: a proportional mortality study. *Aviat.Space.Environ.Med.* 63(4): 276-279.
120. Irvine D and Davies DM (1999): British Airways flightdeck mortality study, 1950-1992. *Aviat.Space.Environ.Med.* 70(6): 548-555.
121. Ivanov VK, Rastopchin EM, Gorsky AI, and Ryvkin VB (1998): Cancer incidence among liquidators of the Chernobyl accident: solid tumors, 1986-1995. *Health Phys* 74(3): 309-315.

122. Ivanov VK, Tsyb AF, Gorsky AI, Maksyutov MA et al. (1997): Leukaemia and thyroid cancer in emergency workers of the Chernobyl accident: estimation of radiation risks (1986-1995). *Radiat Environ Biophys* 36(1): 9-16.
123. Ivanov VK, Tsyb AF, and Konogorov AP (1997): Case-control analysis of leukaemia among Chernobyl accident emergency workers residing in the Russian Federation. *J Radiol Prot* 17: 137-157.
124. Johansson L, Larsson LG, and Damber L (1995): A cohort study with regard to the risk of haematological malignancies in patients treated with x-rays for benign lesions in the locomotor system. II. Estimation of absorbed dose in the red bone marrow. *Acta Oncol* 34(6): 721-726.
125. Johnson JV and Stewart WF (1993): Measuring work organization exposure over the life course with a job-exposure matrix. *Scand.J.Work.Environ.Health* 19(1): 21-28.
126. Kaji M, Tango T, Asukata I, Tajima N et al. (1993): Mortality experience of cockpit crewmembers from Japan Airlines. *Aviat.Space.Environ.Med.* 64(8): 748-750.
127. Kaldor JM, Day NE, Bell J, Clarke EA et al. (1992): Lung cancer following Hodgkin's disease: a case-control study. *Int J Cancer* 52(5): 677-681.
128. Karlsson P, Holmberg E, Lundberg LM, Nordborg C et al. (1997): Intracranial tumors after radium treatment for skin hemangioma during infancy--a cohort and case-control study. *Radiat Res* 148(2): 161-167.
129. Karlsson P, Holmberg E, Lundell M, Mattsson A et al. (1998): Intracranial tumors after exposure to ionizing radiation during infancy: a pooled analysis of two Swedish cohorts of 28,008 infants with skin hemangioma. *Radiat Res* 150(3): 357-364.
130. Karlsson P, Holmberg E, Samuelsson A, Johansson KA et al. (1998): Soft tissue sarcoma after treatment for breast cancer--a Swedish population-based study. *Eur J Cancer* 34(13): 2068-2075.
131. Kauppinen T and Partanen T (1988): Use of plant- and period-specific job-exposure matrices in studies on occupational cancer. *Scand.J.Work.Environ.Health* 14(3): 161-167.
132. Kauppinen TP, Mutanen PO, and Seitsamo JT (1992): Magnitude of misclassification bias when using a job-exposure matrix. *Scand.J.Work.Environ.Health* 18(2): 105-112.
133. Kellerer AM (2000): Risk estimates for radiation-induced cancer - the epidemiological evidence. *Radiat Environ Biophys* 39(1): 17-24.
134. Kelly M, Menzel H-G, Ryan T, and Schnuer K (1999): Cosmic Radiation and Aircrew Exposure - Proceedings of an International Conference, Dublin, Ireland, July 1-3 1998. *Radiation Protection Dosimetry* 86(4)

135. Kerber RA, Till JE, Simon SL, Lyon JL et al. (1993): A cohort study of thyroid disease in relation to fallout from nuclear weapons testing [see comments]. *JAMA* 270(17): 2076-2082.
136. Kido C, Sasaki F, Hirota Y, Kiyosawa K et al. (1999): Cancer mortality of thorostrast patients in Japan: the second series updated 1998. *Radiat Res* 152(6 Suppl): S81-S83.
137. Koshurnikova NA, Bolotnikova MG, Ilyin LA, Keirim-Markus IB et al. (1998): Lung cancer risk due to exposure to incorporated plutonium. *Radiat Res* 149(4): 366-371.
138. Koshurnikova NA, Bysogolov GD, Bolotnikova MG, Khokhryakov VF et al. (1996): Mortality among personnel who worked at the Mayak complex in the first years of its operation. *Health Phys* 71(1): 90-93.
139. Koshurnikova NA, Shilnikova NS, and Okatenko PV (1997): The risk of cancer among nuclear workers at the "Mayak" production association: preliminary results of an epidemiological study. *Boice-JD J. Implications of New Data on Radiation Cancer Risk*(18): 113-122. NCRP Proceedings.
140. Koshurnikova NA, Shilnikova NS, Okatenko PV, Kreslov VV et al. (1999): Characteristics of the cohort of workers at the Mayak nuclear complex. *Radiat Res* 152(4): 352-363.
141. Kossenko MM and Degteva MO (1994): Cancer mortality and radiation risk evaluation for the Techa River population. *Sci Total Environ* 142(1-2): 73-89.
142. Kossenko MM, Degteva MO, Vyushkova OV, Preston DL et al. (1997): Issues in the comparison of risk estimates for the population in the Techa River region and atomic bomb survivors. *Radiat Res* 148(1): 54-63.
143. Kromhout H, Heederik D, Dalderup LM, and Kromhout D (1992): Performance of two general job-exposure matrices in a study of lung cancer morbidity in the Zutphen cohort. *Am.J.Epidemiol.* 136(6): 698-711.
144. Lagarde F and Pershagen G (1997): Re: indoor radon exposure and risk of lung cancer: a nested case- control study in Finland [letter]. *J.Natl.Cancer Inst.* 89(8): 584-585.
145. Lewis BJ, Tume P, Bennett LGI, Pierre M et al. (1999): Cosmic Radiation Exposure on Canadian-Based Commercial Airline Routes. *Radiation Protection Dosimetry* 86(1): 7-24.
146. Lindberg S, Karlsson P, Arvidsson B, Holmberg E et al. (1995): Cancer incidence after radiotherapy for skin haemangioma during infancy. *Acta Oncol* 34(6): 735-740.

147. Lubin JH and Boice-JD J (1997): Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies [see comments]. *J.Natl.Cancer Inst.* 89(1): 49-57.
148. Lubin JH, Boice JDJ, Edling C, Hornung RW et al. (1995): Radon-exposed underground miners and inverse dose-rate (protraction enhancement) effects. *Health Phys* 69(4): 494-500.
149. Lubin JH, Boice JDJ, Edling C, Hornung RW et al. (1995): Lung cancer in radon-exposed miners and estimation of risk from indoor exposure. *J Natl Cancer Inst* 87(11): 817-827.
150. Luce D, Gérin M, Berrino F, Pisani P et al. (1993): Sources of discrepancies between a job exposure matrix and a case by case expert assessment for occupational exposure to formaldehyde and wood-dust. *Int.J.Epidemiol.* 22 Suppl 2: S113-20.
151. Luebeck EG, Heidenreich WF, Hazelton WD, Paretzke HG et al. (1999): Biologically based analysis of the data for the Colorado uranium miners cohort: age, dose and dose-rate effects. *Radiat Res* 152(4): 339-351.
152. Lundell M, Hakulinen T, and Holm LE (1994): Thyroid cancer after radiotherapy for skin hemangioma in infancy. *Radiat Res* 140(3): 334-339.
153. Lundell M and Holm LE (1995): Risk of solid tumors after irradiation in infancy. *Acta Oncol* 34(6): 727-734.
154. Lundell M and Holm LE (1996): Mortality from leukaemia after irradiation in infancy for skin haemangioma. *Radiat Res* 145: 595-601.
155. Lundell M, Mattsson A, Hakulinen T, and Holm LE (1996): Breast cancer after radiotherapy for skin hemangioma in infancy. *Radiat Res* 145(2): 225-230.
156. Lundell M, Mattsson A, Karlsson P, Holmberg E et al. (1999): Breast cancer risk after radiotherapy in infancy: a pooled analysis of two Swedish cohorts of 17,202 infants. *Radiat Res* 151(5): 626-632.
157. Martling U, Mattsson A, Travis LB, Holm LE et al. (1999): Mortality after long-term exposure to radioactive Thorotrast: a forty-year follow-up survey in Sweden. *Radiat Res* 151(3): 293-299.
158. Mattsson A, Hall P, Ruden BI, and Rutqvist LE (1997): Incidence of primary malignancies other than breast cancer among women treated with radiation therapy for benign breast disease. *Radiat Res* 148(2): 152-160.
159. Mattsson A, Ruden BI, Hall P, Wilking N et al. (1993): Radiation-induced breast cancer: long-term follow-up of radiation therapy for benign breast disease [see comments]. *J Natl Cancer Inst* 85(20): 1679-1685.

160. McCartney MA, Chatterjee BF, McCoy EC, Mortimer EA, Jr. et al. (1986): Airplane emissions: a source of mutagenic nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons. *Mutat.Res.* 171(2-3): 99-104.
161. McGeoghegan D and Binks K (1999): The mortality and cancer morbidity experience of employees at the Chapelcross plant of British Nuclear Fuels Ltd, 1955-1995. Thorne M. Proceedings of the 6th International Symposium, Southport '99: 261-264. London, Society fo Radiological Protection.
162. Miller AB, Howe GR, Sherman GJ, Lindsay JP et al. (1989): Mortality from breast cancer after irradiation during fluoroscopic examinations in patients being treated for tuberculosis. *N Engl J Med* 321(19): 1285-1289.
163. Monson RR and MacMahon B (1984): Prenatal x-ray exposure and cancer in children. Boice-JD J and Fraumeni JFJ. *Radiation Carcinogenesis: Epidemiology and Biological Significance*: 97-105. New York, Raven Press.
164. Mori T, Fukutomi K, Kato Y, Hatakeyama S et al. (1999): 1998 results of the first series of follow-up studies on Japanese thorotrast patients and their relationships to an autopsy series. *Radiat Res* 152(6 Suppl): S72-S80.
165. Mori T, Kido C, Fukutomi K, Kato Y et al. (1999): Summary of entire Japanese thorotrast follow-up study: updated 1998. *Radiat Res* 152(6 Suppl): S84-S87.
166. Muirhead CR, Goodill AA, Haylock RG, Vokes J et al. (1999): Occupational radiation exposure and mortality: second analysis of the National Registry for Radiation Workers [see comments]. *J Radiol Prot* 19(1): 3-26.
167. Muirhead CR and Kneale GW (1989): Prenatal irradiation and childhood cancer. *J Radiol Prot* 9: 209-212.
168. Mustafa MG, Hassett CM, Newell GW, and Schrauzer GN (1988): Pulmonary carcinogenic effects of ozone. *Ann.N.Y.Acad.Sci.* 534: 714-723.
169. Nair MK, Nambi KS, Amma NS, Gangadharan P et al. (1999): Population study in the high natural background radiation area in Kerala, India. *Radiat Res* 152(6 Suppl): S145-S148.
170. NCRP (1995): *Radiation Exposure and High-Altitude Flight*. (12)Bethesda, MD, National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP Commentaries.
171. Nekolla EA, Kellerer AM, Kuse-Isingschulte M, Eder E et al. (1999): Malignancies in patients treated with high doses of radium-224. *Radiat Res* 152(6 Suppl): S3-S7.
172. Nekolla EA, Kreisheimer M, Kellerer AM, Kuse-Isingschulte M et al. (2000): Induction of malignant bone tumors in radium-224 patients: risk estimates based on the improved dosimetry. *Radiat Res* 153(1): 93-103.

173. Neuberger J and Allen A (1997): Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies [letter]. *J Natl Cancer Inst* 89(9): 663-664.
174. Nicholas JS, Lackland DT, Dosemeci M, Mohr-LC J et al. (1998): Mortality among US commercial pilots and navigators. *J.Occup.Environ.Med.* 40(11): 980-985.
175. O'Brien K (1978): LUIN, a code for the calculation of cosmic-ray propagation in the atmosphere (update of HASL-275). EML-338. New York, Environmental Measurements Laboratory.
176. O'Brien K, Friedberg W, Sauer HH, and Smart DF (1996): Atmospheric cosmic rays and solar energetic particles at aircraft altitudes. *Environment International* 22(Suppl. 1): S9-S44.
177. Oksanen PJ (1998): Estimated individual annual cosmic radiation doses for flight crews. *Aviat Space Environ Med* 69(7): 621-625.
178. Olsen J (1988): Limitations in the use of job exposure matrices. *Scand.J.Soc.Med.* 16(4): 205-208.
179. Orłowski E, Pohlabein H, Berrino F, Ahrens W et al. (1993): Retrospective assessment of asbestos exposure--II. At the job level: complementarity of job-specific questionnaire and job exposure matrices. *Int.J.Epidemiol.* 22 Suppl 2: S96-105.
180. Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, and Deutsche Lufthansa AG (1997): ACREM Air Crew Radiation Exposure Monitoring. DGXII-NFS-D2.5 Contract FI4P-CT96-0047: 1-37. Seibersdorf, Austria.
181. Pierce DA, Stram DO, and Vaeth M (1990): Allowing for random errors in radiation dose estimates for the atomic bomb survivor data. *Radiat.Res.* 123(3): 275-284.
182. Pierce DA, Stram DO, Vaeth M, and Schafer DW (1992): The errors-in-variables problem: considerations provided by radiation dose-response analyses of the A-bomb survivor data. *JASA* 87(418): 351-359.
183. Pierce DA and Vaeth M (1991): The shape of the cancer mortality dose-response curve for the A-bomb survivors. *Radiat.Res.* 126(1): 36-42.
184. Plato N and Steineck G (1993): Methodology and utility of a job-exposure matrix. *Am.J.Ind.Med.* 23(3): 491-502.
185. Pottern LM, Kaplan MM, Larsen PR, Silva JE et al. (1990): Thyroid nodularity after childhood irradiation for lymphoid hyperplasia: a comparison of questionnaire and clinical findings. *J Clin Epidemiol* 43(5): 449-460.

186. Preston-Martin S, Thomas DC, White SC, and Cohen D (1988): Prior exposure to medical and dental x-rays related to tumors of the parotid gland. *J Natl Cancer Inst* 80(12): 943-949.
187. Preston-Martin S, Thomas DC, Yu MC, and Henderson BE (1989): Diagnostic radiography as a risk factor for chronic myeloid and monocytic leukaemia (CML). *Br J Cancer* 59(4): 639-644.
188. Preston DL, Kusumi S, Tomonaga M, Izumi S et al. (1994): Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III. Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987 [published erratum appears in *Radiat Res* 1994 Jul;139(1):129]. *Radiat Res* 137(2 Suppl): S68-S97.
189. Preston FS (1985): Eight years' experience of Concorde operations: medical aspects. *J.R.Soc.Med.* 78(3): 193-196.
190. Pschyrembel W and C Zink (1987): *Pschyrembel Wörterbuch Radioaktivität Strahlenwirkung Strahlenschutz.* de Gruyter,
191. Pukkala E, Auvinen A, and Wahlberg G (1995): Incidence of cancer among Finnish airline cabin attendants, 1967- 92. *BMJ.* 311(7006): 649-652.
192. Rafnsson V, Hrankelsson J, and Tulinius H (2000): Incidence of cancer among commercial airline pilots. *Occup.Environ.Med.* 2000(57): 175-179.
193. Rahu M, Tekkel M, Veidebaum T, Pukkala E et al. (1997): The Estonian study of Chernobyl cleanup workers: II. Incidence of cancer and mortality. *Radiat Res* 147(5): 653-657.
194. Reeves GK, Cox DR, Darby SC, and Whitley E (1998): Some aspects of measurement error in explanatory variables for continuous and binary regression models. *Stat.Med.* 17(19): 2157-2177.
195. Regulla D and Schraube H (1900): Strahlenexposition des fliegenden Personals in der Zivilluftfahrt. *WoAuchImmer* : 375-380
196. Rinsky RA, Zumwalde RD, Waxweiler RJ, Murray WEJ et al. (1981): Cancer mortality at a Naval Nuclear Shipyard. *Lancet* 1(8214): 231-235.
197. Ritz B, Morgenstern H, Froines J, and Young BB (1999): Effects of exposure to external ionizing radiation on cancer mortality in nuclear workers monitored for radiation at Rocketdyne/Atomics International. *Am J Ind Med* 35(1): 21-31.
198. Robbins J and Adams W (1989): Radiation effects in the Marshall Islands. Nagataki S. *Radiation and the Thyroid.* Tokyo, Excerpta Medica.
199. Robison WL, Bogen KT, and Conrado CL (1997): An updated dose assessment for resettlement options at Bikini Atoll--a U.S. nuclear test site. *Health Phys* 73(1): 100-114.

200. Ron E (1998): Ionizing radiation and cancer risk: evidence from epidemiology. *Radiat Res* 150(5 Suppl): S30-S41.
201. Ron E, Doody MM, Becker DV, Brill AB et al. (1998): Cancer mortality following treatment for adult hyperthyroidism. Cooperative Thyrotoxicosis Therapy Follow-up Study Group [see comments]. *JAMA* 280(4): 347-355.
202. Ron E, Modan B, and Boice JDJ (1988): Mortality after radiotherapy for ringworm of the scalp. *Am J Epidemiol* 127(4): 713-725.
203. Ron E, Modan B, Boice JDJ, Alfandary E et al. (1988): Tumors of the brain and nervous system after radiotherapy in childhood. *N Engl J Med* 319(16): 1033-1039.
204. Ron E, Modan B, Preston D, Alfandary E et al. (1989): Thyroid neoplasia following low-dose radiation in childhood. *Radiat Res* 120(3): 516-531.
205. Ron E, Modan B, Preston D, Alfandary E et al. (1991): Radiation-induced skin carcinomas of the head and neck. *Radiat Res* 125(3): 318-325.
206. Rosner B, Spiegelman D, and Willett WC (1990): Correction of logistic regression relative risk estimates and confidence intervals for measurement error: the case of multiple covariates measured with error. *Am.J.Epidemiol.* 132(4): 734-745.
207. Rosner B, Spiegelman D, and Willett WC (1992): Correction of logistic regression relative risk estimates and confidence intervals for random within-person measurement error. *Am.J.Epidemiol.* 136(11): 1400-1413.
208. Rosner B, Willett WC, and Spiegelman D (1989): Correction of logistic regression relative risk estimates and confidence intervals for systematic within-person measurement error. *Stat.Med.* 8(9): 1051-1069.
209. Saenger EL, Thoma GE, and Tompkins EA (1968): Incidence of leukemia following treatment of hyperthyroidism. Preliminary report of the Cooperative Thyrotoxicosis Therapy Follow-Up Study. *JAMA* 205(12): 855-862.
210. Salisbury DA, Band PR, Threlfall WJ, and Gallagher RP (1991): Mortality among British Columbia pilots. *Aviat.Space.Environ.Med.* 62(4): 351-352.
211. Schneider AB, Ron E, Lubin J, Stovall M et al. (1993): Dose-response relationships for radiation-induced thyroid cancer and thyroid nodules: evidence for the prolonged effects of radiation on the thyroid. *J Clin Endocrinol Metab* 77(2): 362-369.
212. Schneider AB, Shore-Freedman E, Ryo UY, Bekerman C et al. (1985): Radiation-induced tumors of the head and neck following childhood irradiation. Prospective studies. *Medicine (Baltimore)* 64(1): 1-15.
213. Schraube H, Mares V, Roesler S, and Heinrich W (1999): Experimental Verification and Calculation of Aviation Route Doses. *Radiat.Prot.Dosim.* 86(4): 309-315.
214. Schrewe UJ (1999a): ACREM Air Crew Exposure Monitoring - Results from the in-flight measurement program of the PTB: Summary of the Radiation Monitoring

- Data. PTB-6.31-99-1. Braunschweig, Germany, Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Laborbericht.
215. Schrewe UJ (1999b): ACREM Air Crew Exposure Monitoring - Summary of Results from Calibrations and TEPC measurements. PTB-6.31-99-2. Braunschweig, Germany, Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Laborbericht.
 216. Shimizu Y, Kato H, and Schull WJ (1990): Studies of the mortality of A-bomb survivors. 9. Mortality, 1950-1985: Part 2. Cancer mortality based on the recently revised doses (DS86). *Radiat Res* 121(2): 120-141.
 217. Shore RE (1990): Overview of radiation-induced skin cancer in humans. *Int J Radiat Biol* 57(4): 809-827.
 218. Shore RE, Albert RE, Reed M, Harley N et al. (1984): Skin cancer incidence among children irradiated for ringworm of the scalp. *Radiat Res* 100(1): 192-204.
 219. Shore RE, Hildreth N, Woodard E, Dvoretzky P et al. (1986): Breast cancer among women given X-ray therapy for acute postpartum mastitis. *J Natl Cancer Inst* 77(3): 689-696.
 220. Spiegelman D, McDermott A, and Rosner B (1997): Regression calibration method for correcting measurement-error bias in nutritional epidemiology. *Am.J.Clin.Nutr.* 65(4 Suppl): 1179S-1186S.
 221. Spiegelman D, Schneeweiss S, and McDermott A (1997): Measurement error correction for logistic regression models with an "alloyed gold standard". *Am.J.Epidemiol.* 145(2): 184-196.
 222. Spiess H (1995): The Ra-224 study: past, present and future. van Kaick G. 157-163. Singapore, World Scientific. *Health Effects of Internally Deposited Radionuclides: Emphasis on Radiation and Thorium.*
 223. Stebbings JH (1998): Radium and leukemia: is current dogma valid? *Health Phys* 74(4): 486-488.
 224. Stebbings JH, Lucas HF, and Stehney AF (1984): Mortality from cancers of major sites in female radium dial workers. *Am J Ind Med* 5(6): 435-459.
 225. Stehney AF (1995): Survival times of pre-1950 US women radium dial workers. van Kaick G. 149-155. Singapore, World Scientific. *Health Effects of Internally Deposited Radionuclides: Emphasis on Radiation and Thorium.*
 226. Stengel B, Pisani P, Limasset JC, Bouyer J et al. (1993): Retrospective evaluation of occupational exposure to organic solvents: questionnaire and job exposure matrix. *Int.J.Epidemiol.* 22 Suppl 2: S72-82.
 227. Stevens W, Thomas DC, Lyon JL, Till JE et al. (1990): Leukemia in Utah and radioactive fallout from the Nevada test site. A case-control study [published erratum appears in *JAMA* 1991 Jan 23-30;265(4):461]. *JAMA* 264(5): 585-591.

228. Stewart AM, Webb KW, and Hewitt D (1958): A survey of childhood malignancies. *BMJ* 1: 1495-1508.
229. Storm HH, Andersson M, Boice JDJ, Blettner M et al. (1992): Adjuvant radiotherapy and risk of contralateral breast cancer. *J Natl Cancer Inst* 84(16): 1245-1250.
230. Strahlenschutzkommission (1997): Die Ermittlung der durch kosmische Strahlung verursachten Strahlenexposition des fliegenden Personals. Bericht der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm, German Commission on Radiation Protection.
231. Stram DO, Langholz B, Huberman M, and Thomas DC (1999): Correcting for exposure measurement error in a reanalysis of lung cancer mortality for the Colorado Plateau Uranium Miners cohort. *Health Phys* 77(3): 265-275.
232. Strom DJ, Cameron JR, and Cohen BL (1998): The LNT model is appropriate for the estimation of risk from low-level (less than 100 mSv/year) radiation, and low levels of radon in homes should be considered harmful to health. *Med.Phys.* 25(3): 273-278.
233. Stücker I, Bouyer J, Mandereau L, and Hémon D (1993): Retrospective evaluation of the exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: comparative assessments with a job exposure matrix and by experts in industrial hygiene. *Int.J.Epidemiol.* 22 Suppl 2: S106-12.
234. Sun Q, Akiba S, and Zou J (1997): Databases and statistical methods of cohort studies (1979-90) in Yangjiang. *High Levels of Natural Radiation 96: Radiation Dose and Health Effects*: 241-248. Amsterdam, Elsevier. *High Levels of Natural Radiation*. Wei L.
235. Suvanto S, Härmä M, Ilmarinen J, and Partinen M (1993): Effects of 10 h time zone changes on female flight attendants' circadian rhythms of body temperature, alertness, and visual search. *Ergonomics*. 36(6): 613-625.
236. Tao Z-F, Kato H, and Zha Y-R (1997): Study on cancer mortality among the residents in high background radiation area of Yangjiang, China. *High Levels of Natural Radiation 96: Radiation Dose and Health Effects*: 249-254. Amsterdam, Elsevier. *High Levels of Natural Radiation*. Wei L.
237. Tekkel M, Rahu M, Veidebaum T, Hakulinen T et al. (1997): The Estonian study of Chernobyl cleanup workers: I. Design and questionnaire data. *Radiat Res* 147(5): 641-652.
238. Thomas D, Stram D, and Dwyer J (1993): Exposure measurement error: influence on exposure-disease. *Relationships and methods of correction*. *Annu.Rev.Public Health* 14: 69-93.

239. Thompson DE, Mabuchi K, Ron E, Soda M et al. (1994): Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part II: Solid tumors, 1958-1987 [published erratum appears in *Radiat Res* 1994 Jul;139(1):129]. *Radiat Res* 137(2 Suppl): S17-S67.
240. Thurigen D, Spiegelman D, Blettner M, Heuer C et al. (2000): Measurement error correction using validation data - a review of methods and their applicability in case-control studies. *Statistical Methods in Medical Research* 9: 447-474.
241. Travis LB, Curtis RE, Stovall M, Holowaty EJ et al. (1994): Risk of leukemia following treatment for non-Hodgkin's lymphoma. *J Natl Cancer Inst* 86(19): 1450-1457.
242. Travis LB, Weeks J, Curtis RE, Chaffey JT et al. (1996): Leukemia following low-dose total body irradiation and chemotherapy for non-Hodgkin's lymphoma. *J Clin Oncol* 14(2): 565-571.
243. Tucker MA, D'Angio GJ, Boice JDJ, Strong LC et al. (1987): Bone sarcomas linked to radiotherapy and chemotherapy in children. *N Engl J Med* 317(10): 588-593.
244. Tucker MA, Jones PH, Boice JDJ, Robison LL et al. (1991): Therapeutic radiation at a young age is linked to secondary thyroid cancer. The Late Effects Study Group. *Cancer Res* 51(11): 2885-2888.
245. Tucker MA, Meadows AT, Boice JDJ, Stovall M et al. (1987): Leukemia after therapy with alkylating agents for childhood cancer. *J Natl Cancer Inst* 78(3): 459-464.
246. Tveten U (1999): Cosmic radiation and airline pilots. Exposure patterns of Norwegian SAS-pilots 1960 to 1994. Revised Version. IFE/KR/E-99/002: 1-106 Kjeller, Norway, Institute for Energy Technology.
247. UNSCEAR or United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1988): Sources, effects and risks of ionizing radiation. (Sales Number E.88.IX.7) New York, NY 10017, United Nations.
248. UNSCEAR or United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000): Sources and Effects of Ionizing Radiation - Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New York, NY 10017, United Nations.
249. van Kaick G (1995): Extended dosimetry for studies with Ra-224 patients. van Kaick G. 33-38 Singapore, World Scientific. *Health Effects of Internally Deposited Radionuclides: Emphasis on Radiation and Thorium*.
250. van Kaick G, Welsch H, and Leuhrs H (1995): Epidemiological results and dosimetric calculations - an update of the German Thorotrast study. van Kaick G. 171-175 Singapore, World Scientific. *Health Effects of Internally Deposited Radionuclides: Emphasis on Radiation and Thorium*.

251. van Leeuwen FE, Klokman WJ, Stovall M, Hagenbeek A et al. (1995): Roles of radiotherapy and smoking in lung cancer following Hodgkin's disease [see comments]. *J Natl Cancer Inst* 87(20): 1530-1537.
252. Weiss HA, Darby SC, and Doll R (1994): Cancer mortality following X-ray treatment for ankylosing spondylitis. *Int J Cancer* 59(3): 327-338.
253. Weiss HA, Darby SC, Fearn T, and Doll R (1995): Leukemia mortality after X-ray treatment for ankylosing spondylitis. *Radiat Res* 142(1): 1-11.
254. Wick RR, Chmelevsky D, and Gossner W (1995): Current status of the follow-up of radium-224 treated ankylosing spondylitis patients. van Kaick G. 165-169 Singapore, World Scientific. *Health Effects of Internally Deposited Radionuclides: Emphasis on Radiation and Thorium*.
255. Wick RR, Nekolla EA, Gossner W, and Kellerer AM (1999): Late effects in ankylosing spondylitis patients treated with ²²⁴Ra. *Radiat Res* 152(6 Suppl): S8-S11.
256. Wiggs LD, Cox-DeVore CA, Wilkinson GS, and Reyes M (1991): Mortality among workers exposed to external ionizing radiation at a nuclear facility in Ohio. *J Occup Med* 33(5): 632-637.
257. Wilkinson GS, Tietjen GL, Wiggs LD, Galke WA et al. (1987): Mortality among plutonium and other radiation workers at a plutonium weapons facility. *Am J Epidemiol* 125(2): 231-250.
258. Wilson JW (1991): Transport methods and interactions for space radiation. NASA-1257
259. Wilson OJ, Young BF, and Richardson CK (1994): Cosmic radiation doses received by Australian commercial flight crews and the implications of ICRP 60. *Health Phys.* 66(5): 493-502.
260. Wong FL, Boice JDJ, Abramson DH, Tarone RE et al. (1997): Cancer incidence after retinoblastoma. Radiation dose and sarcoma risk [see comments]. *JAMA* 278(15): 1262-1267.
261. Yoshimoto Y, Kato H, and Schull WJ (1988): Risk of cancer among children exposed in utero to A-bomb radiations, 1950-84. *Lancet* 2(8612): 665-669.
262. Zeeb H, Hammer G, and Blettner M (2000): Gesundheit und kosmische Strahlung: Epidemiologische Studien bei Piloten und Kabinenpersonal. *Flug- und Reisemedizin* 7(4): 7-8.
263. Zha Y-R, Zou J-M, and Lin Z-X (1997): Confounding factors in radiation epidemiology and their comparability between the high background radiation areas and control areas in Guangdong, China. *High Levels of Natural Radiation* 96: Radi-

ation Dose and Health Effects: 263-269 Amsterdam, Elsevier. High Levels of Natural Radiation. Wei L.

264. Zhuntova GV, Tokarskaya ZB, and Okladnikova ND (1997): The importance of radiation and non-radiation-factors for the stomach cancer incidence in workers of the atomic plant Mayak. IRPA 9, 1996 International Congress on Radiation Protection, Proceedings(2): 324-327 Vienna, IRPA.

Anhang A – Job-Expositions-Matrix

Die hier aufgeführte Job-Expositions-Matrix ist nach Jahren und Fluglizenzen aufgeschlüsselt. Nicht alle Zellen sind besetzt, denn es wurde nicht in jedem Jahr jeder Flugzeugtyp verwendet.

Datum	Con- vair 340 / 440	Lock heed 1049	Vis- count 814	B707	B727	Car- velle	CC	DC6	B737	DC9	DC 10	B747
1960	0,48	0,57	0,53	3,55								
1961	0,49	0,57	0,56	3,69	2,26	0,47	0,56					
1962	0,49	0,56	0,57	3,67	2,31	0,48	0,58					
1963	0,51	0,55	0,58	3,70	2,39	0,50	0,60					
1964	0,51	0,54	0,59	3,67	2,44	0,51	0,61					
1965	0,51	0,54	0,61	3,61	2,49	0,53	0,62					
1966	0,50	0,52	0,58	3,45	2,40	0,51	0,61	0,3	1,95			
1967	0,48	0,50	0,55	3,26	2,28	0,49	0,58	0,29	1,87			
1968	0,46	0,49	0,52	3,13	2,19	0,48	0,56	0,27	1,81			
1969	0,45	0,48	0,49	3,04	2,12	0,47	0,56	0,27	1,77			
1970			0,48	3,03	2,09			0,27	1,77			
1971			0,52	3,32	2,32			0,29	1,94	2,84	2,26	4,10
1972			0,53	3,41	2,47			0,30	2,03	2,88	2,29	4,22
1973			0,53	3,42	2,57			0,30	2,08	2,88	2,29	4,22
1974			0,52	3,37	2,64			0,29	2,09	2,85	2,27	4,14
1975				3,49	2,80				2,19	2,94	2,31	4,29
1976				3,49	2,80				2,30	2,96	2,39	4,27
1977				3,44	2,76				2,37	2,94	2,46	4,17
1978				3,26	2,65				2,37	2,80	2,46	3,89
1979				3,02	2,48				2,31	2,60	2,41	3,54
1980				2,94	2,43				2,35		2,44	3,41
1981				2,85	2,36				2,29	3,18	2,35	3,27
1982				2,80	2,34				2,27	3,12	2,29	3,19
1983				2,91	2,41				2,37	3,28	2,33	3,32
1984				2,96	2,45				2,42	3,34	2,33	3,37
1985				3,14	2,58				2,59	3,62	2,41	3,62
1986				3,25	2,66				2,69	3,80	2,75	3,78
1987				3,27	2,69				2,73	3,82	3,05	3,81

Da- tum	Con- vair 340 / 440	Lock heed 1049	Vis- count 814	B707	B727	Cara- velle	CC	DC6	B737	DC9	DC 10	B747
1988				3,07	2,52				2,58	3,52	3,07	3,50
1989				2,78	2,27				2,33	3,06	2,89	3,08
1990					2,22				2,31		2,99	3,01
1991					2,22				2,34		3,00	3,03
1992					2,44				2,61		3,41	3,39
1993					2,56				2,78		3,65	3,61
1994					2,59				2,84		3,72	3,67
1995									2,93			3,77
1996									2,98			3,83
1997									2,99			3,85
1998									2,92			3,74
Mit- tel- wert	0,49	0,53	0,54	3,27	2,45	0,49	0,59	0,29	2,37	3,14	2,66	3,68

Da- tum	A300	F_27	HS7	A320	A310	A340	ARJ	B744	B757	CRJ	F50	Dum my
1960												1,99
1961												2,06
1962												2,10
1963												2,16
1964												2,26
1965												2,35
1966												2,34
1967												2,29
1968												2,23
1969												2,30
1970												2,29
1971												2,64
1972												2,79
1973												2,82
1974												2,75
1975												2,86

Da- tum	A300	F_27	HS7	A320	A310	A340	ARJ	B744	B757	CRJ	F50	Dum my
1976	2,58											2,87
1977	2,56											2,88
1978	2,49											2,77
1979	2,36											2,61
1980	2,32											2,58
1981	2,24	0,56	0,51									2,50
1982	2,18	0,55	0,51									2,48
1983	2,23	0,57	0,52									2,57
1984	2,24	0,57	0,53									2,62
1985	2,34	0,63	0,55									2,78
1986	2,46	0,63	0,57	2,56	2,6							2,95
1987	2,54	0,63	0,57	2,59	2,62							3,06
1988	2,45	0,57	0,54	2,42	2,48							2,88
1989	2,30	0,55	0,50	2,18	2,26							2,60
1990	2,33			2,13	2,23							2,57
1991	2,34			2,20	2,40	3,35	2,45	2,69	2,15	2,66	0,53	2,56
1992	2,52			2,48	2,83	3,80	2,67	2,93	2,25	2,94	0,58	2,84
1993	2,63			2,66	3,20	4,08	2,79	3,07	2,31	3,11	0,60	3,02
1994	2,67			2,76	3,49	4,15	2,82	3,11	2,32	3,15	0,61	3,11
1995	2,72			2,87	3,81	4,27	2,86	3,17	2,33	3,22	0,62	3,22
1996	2,76			2,92	3,89	4,37	2,91	3,21	2,35	3,27	0,63	3,22
1997	2,76			2,93	3,90	4,39	2,92	3,22	2,35	3,28	0,63	3,15
1998	2,71			2,86	3,79	4,24	2,85	3,15	2,33	3,20	0,61	3,15
Mit- tel- wert	2,47	0,58	0,53	2,58	3,04	4,08	2,78	3,07	2,30	3,10	0,60	2,65

Anhang B – Gruppierung der Flugzeugmuster mit ähnlichen Flugeigenschaften

Diese Tabelle führt die Gruppierung von Flugzeugtypen mit ähnlichen Flugeigenschaften „in-flight performance“ auf.

Mustergruppen

Mustergruppe	Kurze Bezeichnung	Lange Bezeichnung
A300	310	Airbus A310-200/A310-300
A300	313	Airbus A310-300 Intercont.
A300	314	Airbus A310-300 Continental
A300	AB3	Airbus A300-600
A300	AB6	Airbus A300-600 Continental
A300	ABA	Airbus A300-600 Intercont.
A340	340	Airbus A340
B707	707	Boeing 707 Jet Intercontinental
B707	B 707	Boeing 707 Jet Intercontinental
B707	B 707 C	Boeing Supercargo Jet
B727	727	Boeing 727 Europa Jet
B727	B 720	Boeing Jet 720
B727	B 720 B	Boeing Jet 720 B
B727	B 727	Europa Jet Boeing 727
B727	B 727 C	Boeing 727 Supercargo Jet
B737	320	Airbus A320
B737	321	Airbus A321-100
B737	737	Boeing 737
B737	767	Boeing 767
B737	A319	AIRBUS 319
B737	B 737	Boeing 737 City Jet
B737	B 737 C	Boeing 737 Supercargo Jet
B737	D9S	McDonnell Douglas DC9
B737	DC 9	(McDonnell) Douglas DC 9
B744	744	Boeing 747-400

Musterguppe	Kurze Bezeichnung	Lange Bezeichnung
B747	747	Boeing 747-200
B747	74M	Boeing 747-200 Mixed Jet
B747	B 747	Boeing Jet 747
B747	B 747 F	Boeing 747 Cargo Jet
DC10	D10	McDonnell Douglas DC10
DC10	DC 10	McDonnell Douglas DC 10
JET	ARJ	Avro Aerospace Avroliner RJ85
JET	CRJ	Canadair Regionaljet
JET	DC8	MCDONNELL DOUGLAS 8
JET	FKF	Fokker 2? Friendship/Fellowship
JET	HP-137	Handley Page 137 Jetstream
JET	YAK 40	Yak 40
PROP	BAC	British Aircraft Corp. 1-11
PROP	Carav	Sud Aviation Caravelle
PROP	CC	Curtiss Commando
PROP	Convair 340	Convair 340
PROP	DC 6	Douglas DC 6
PROP	F-27	Fokker 27 Friendship
PROP	F50	Fokker 50
PROP	HS7	Hawker-Siddeley 748
PROP	Metropolitan	Convair 440 Metropolitan
PROP	N 262	Nord Aviation 262
PROP	Super Star	Lockheed Super Star
PROP	Super-G	Lockheed Super-G-Constellation
PROP	Super-H	Lockheed Super-H-Constellation
PROP	v814	Vickers Viscount 814
PROP	Viking	Vickers Viking

Anhang C – Flughöhenprofile des Expertenkomitees

In der folgenden werden die von dem Computerprogramm CARI (neben Start- und Zielflughafen sowie Datum und Dauer des Fluges) benötigten Angaben aufgeführt: Dauer des Steig- und Sinkflugs in Minuten („Ascent“, „Descent“), Anzahl Flughöhen (max. 4), Flughöhen (Einheit: 100 FüÙe, „Level1-4“) und die Verweildauer auf diesen Flughöhen als Anteil der Gesamtflugdauer ohne Steig- und Sinkflug. Hier ein Beispiel:

Beispiel eines Fluges auf B747, der 5:20 (= 320 Minuten) dauert

Mustergruppe	B747	
Flugdauer über x Stunden	5	Denn der Flug dauert über 5 Stunden, aber weniger als 6
Ascent	20	Dauer des Steigflugs: 20 Minuten
Descent	25	Dauer des Sinkflugs: 25 Minuten
Anzahl Level	2	2 Flughöhen werden angefliegen
Level1	340	Erste Flughöhe: $340 \times 100 = 34000$ Fuß
Duration1	0,6	60% der Zeit (ohne Steig- und Sinkflug) wird auf dieser Höhe verbracht, also $0,6 \times (320 - 20 - 25) = 165$ Minuten
Level2	380	Zweite Flughöhe: $380 \times 100 = 38000$ Fuß
Duration2	0,4	40% der Zeit wird hier verbracht, also 110 Minuten
Level3		
Duration3		
Level4		
Duration4		

Flughöhenprofile des Expertenkomitees

Muster-Gruppe	Flugdauer über Stunden	Ascent	Descent	Anzahl Level	Level1	Durati-on1	Level2	Durati-on2	Level3	Durati-on3	Level4	Durati-on4
B707	0	15	20	1	310	1,00						
B707	1	20	25	1	350	1,00						
B707	2	20	25	1	350	1,00						
B707	3	20	25	1	350	1,00						
B707	4	20	25	2	320	0,33	360	0,67				
B707	5	20	25	2	320	0,33	360	0,67				
B707	6	20	25	3	300	0,25	340	0,50	360	0,25		
B707	7	20	25	3	300	0,25	340	0,50	360	0,25		
B707	8	20	25	3	300	0,25	340	0,50	360	0,25		
B707	9	20	25	3	300	0,25	340	0,50	360	0,25		
B707	10	20	25	3	300	0,25	340	0,50	360	0,25		
B707	11	20	25	3	300	0,25	340	0,50	360	0,25		
B707	12	20	25	3	300	0,25	340	0,50	360	0,25		
B707	13	20	25	3	300	0,25	340	0,50	360	0,25		
B707	14	20	25	3	300	0,25	340	0,50	360	0,25		
B707	15	20	25	3	300	0,25	340	0,50	360	0,25		
B727	0	10	15	1	250	1,00						
B727	1	15	20	1	350	1,00						
B727	2	20	25	2	340	0,50	380	0,50				
B727	3	20	25	2	340	0,50	380	0,50				
B727	4	20	25	2	340	0,50	380	0,50				
B727	5	20	25	2	340	0,50	380	0,50				
B727	6	20	25	2	340	0,50	380	0,50				
B727	7	20	25	2	340	0,50	380	0,50				
B727	8	20	25	2	340	0,50	380	0,50				
B727	9	20	25	2	340	0,50	380	0,50				
B727	10	20	25	2	340	0,50	380	0,50				

Muster-Gruppe	Flugdauer über Stunden	Ascent	Descent	Anzahl Level	Level1	Durati-on1	Level2	Durati-on2	Level3	Durati-on3	Level4	Durati-on4
B727	11	20	25	2	340	0,50	380	0,50				
B727	12	20	25	2	340	0,50	380	0,50				
B727	13	20	25	2	340	0,50	380	0,50				
B727	14	20	25	2	340	0,50	380	0,50				
B727	15	20	25	2	340	0,50	380	0,50				
B737	0	10	15	1	250	1,00						
B737	1	15	20	1	350	1,00						
B737	2	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
B737	3	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
B737	4	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
B737	5	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
B737	6	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
B737	7	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
B737	8	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
B737	9	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
B737	10	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
B737	11	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
B737	12	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
B737	13	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
B737	14	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
B737	15	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
B747	0	15	25	1	360	1,00						
B747	1	15	25	1	360	1,00						
B747	2	20	25	2	340	0,60	380	0,40				
B747	3	20	25	2	340	0,60	380	0,40				
B747	4	20	25	2	340	0,60	380	0,40				
B747	5	20	25	2	340	0,60	380	0,40				
B747	6	20	25	3	300	0,25	340	0,50	380	0,25		

Muster-Gruppe	Flugdauer über Stunden	Ascent	Descent	Anzahl Level	Level1	Durati-on1	Level2	Durati-on2	Level3	Durati-on3	Level4	Durati-on4
B747	7	20	25	3	300	0,25	340	0,50	380	0,25		
B747	8	20	25	3	300	0,25	340	0,50	380	0,25		
B747	9	20	25	3	300	0,25	340	0,50	380	0,25		
B747	10	20	25	3	300	0,25	340	0,50	380	0,25		
B747	11	20	25	3	300	0,25	340	0,50	380	0,25		
B747	12	20	25	3	300	0,25	340	0,50	380	0,25		
B747	13	20	25	3	300	0,25	340	0,50	380	0,25		
B747	14	20	25	3	300	0,25	340	0,50	380	0,25		
B747	15	20	25	3	300	0,25	340	0,50	380	0,25		
B744	0	15	25	1	360	1,00						
B744	1	15	25	1	360	1,00						
B744	2	20	25	2	340	0,60	380	0,40				
B744	3	20	25	2	340	0,60	380	0,40				
B744	4	20	25	2	340	0,60	380	0,40				
B744	5	20	25	2	340	0,60	380	0,40				
B744	6	20	25	3	320	0,25	340	0,50	380	0,25		
B744	7	20	25	3	320	0,25	340	0,50	380	0,25		
B744	8	20	25	3	320	0,25	340	0,50	380	0,25		
B744	9	20	25	3	320	0,25	340	0,50	380	0,25		
B744	10	20	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
B744	11	20	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
B744	12	20	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
B744	13	20	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
B744	14	20	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
B744	15	20	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
A300	0	10	15	1	250	1,00						
A300	1	15	20	1	350	1,00						
A300	2	20	25	1	360	1,00						

Muster-Gruppe	Flugdauer über Stunden	Ascent	Descent	Anzahl Level	Level1	Durati-on1	Level2	Durati-on2	Level3	Durati-on3	Level4	Durati-on4
A300	3	20	25	1	360	1,00						
A300	4	20	25	1	360	1,00						
A300	5	20	25	1	360	1,00						
A300	6	20	25	2	320	0,30	360	0,70				
A300	7	20	25	2	320	0,30	360	0,70				
A300	8	20	25	2	320	0,30	360	0,70				
A300	9	20	25	2	320	0,30	360	0,70				
A300	10	20	25	2	320	0,30	360	0,70				
A300	11	20	25	2	320	0,30	360	0,70				
A300	12	20	25	2	320	0,30	360	0,70				
A300	13	20	25	2	320	0,30	360	0,70				
A300	14	20	25	2	320	0,30	360	0,70				
A300	15	20	25	2	320	0,30	360	0,70				
A340	0	20	25	1	310	1,00						
A340	1	20	25	1	360	1,00						
A340	2	30	25	2	340	0,60	380	0,40				
A340	3	30	25	2	340	0,60	380	0,40				
A340	4	30	25	2	340	0,60	380	0,40				
A340	5	30	25	2	340	0,60	380	0,40				
A340	6	30	25	3	320	0,25	340	0,50	380	0,25		
A340	7	30	25	3	320	0,25	340	0,50	380	0,25		
A340	8	30	25	3	320	0,25	340	0,50	380	0,25		
A340	9	30	25	3	320	0,25	340	0,50	380	0,25		
A340	10	30	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
A340	11	30	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
A340	12	30	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
A340	13	30	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
A340	14	30	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22

Muster-Gruppe	Flugdauer über Stunden	Ascent	Descent	Anzahl Level	Level1	Durati-on1	Level2	Durati-on2	Level3	Durati-on3	Level4	Durati-on4
A340	15	30	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
DC10	0	15	25	1	340	1,00						
DC10	1	15	25	1	340	1,00						
DC10	2	20	25	2	320	0,60	360	0,40				
DC10	3	20	25	2	320	0,60	360	0,40				
DC10	4	20	25	2	320	0,60	360	0,40				
DC10	5	20	25	2	320	0,60	360	0,40				
DC10	6	20	25	3	300	0,25	320	0,50	360	0,25		
DC10	7	20	25	3	300	0,25	320	0,50	360	0,25		
DC10	8	20	25	3	300	0,25	320	0,50	360	0,25		
DC10	9	20	25	3	300	0,25	320	0,50	360	0,25		
DC10	10	20	25	3	300	0,25	320	0,50	360	0,25		
DC10	11	20	25	3	300	0,25	320	0,50	360	0,25		
DC10	12	20	25	3	300	0,25	320	0,50	360	0,25		
DC10	13	20	25	3	300	0,25	320	0,50	360	0,25		
DC10	14	20	25	3	300	0,25	320	0,50	360	0,25		
DC10	15	20	25	3	300	0,25	320	0,50	360	0,25		
PROP	0	15	5	1	160	1,00						
PROP	1	20	10	1	200	1,00						
PROP	2	20	10	1	200	1,00						
PROP	3	25	10	1	210	1,00						
PROP	4	25	10	1	210	1,00						
PROP	5	25	10	1	210	1,00						
PROP	6	25	10	1	210	1,00						
PROP	7	25	10	1	210	1,00						
PROP	8	25	10	1	210	1,00						
PROP	9	25	10	1	210	1,00						
PROP	10	25	10	1	210	1,00						

Muster-Gruppe	Flugdauer über Stunden	Ascent	Descent	Anzahl Level	Level1	Durati-on1	Level2	Durati-on2	Level3	Durati-on3	Level4	Durati-on4
PROP	11	25	10	1	210	1,00						
PROP	12	25	10	1	210	1,00						
PROP	13	25	10	1	210	1,00						
PROP	14	25	10	1	210	1,00						
PROP	15	25	10	1	210	1,00						
PROP	16	25	10	1	210	1,00						
JET	0	10	15	1	250	1,00						
JET	1	15	20	1	350	1,00						
JET	2	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
JET	3	15	25	2	320	0,50	360	0,50				
JET	4	20	25	2	340	0,60	380	0,40				
JET	5	20	25	2	340	0,60	380	0,40				
JET	6	20	25	3	320	0,25	340	0,50	380	0,25		
JET	7	20	25	3	320	0,25	340	0,50	380	0,25		
JET	8	20	25	3	320	0,25	340	0,50	380	0,25		
JET	9	20	25	3	320	0,25	340	0,50	380	0,25		
JET	10	20	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
JET	11	20	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
JET	12	20	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
JET	13	20	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
JET	14	20	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22
JET	15	20	25	4	290	0,10	320	0,22	340	0,45	380	0,22