

Aus der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie
- Plastische Operationen

der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Medizinische Aspekte des betrieblichen Strahlenschutzes in Bezug auf kosmische
Strahlung

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der
Zahnmedizin
der Universitätsmedizin
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von

Klara Elsa Johanne Klöble
aus Bad Dürkheim

Mainz, 2024

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Hansjörg Schild

1. Gutachter:

Prof. Dr. med. dent. Ralf Schulze

2. Gutachter:

Prof. Dr. med. dent. Thomas Gerhard Wolf

Tag der Promotion:

07. April 2025

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

TABELLENVERZEICHNIS

1. PROBLEMSTELLUNG	1
2. ZIEL DER DISSERTATION	3
3. LITERATURRECHERCHE	5
3.1 STRAHLUNGSEXPOSITION AUF FLUGHÖHEN	5
3.1.1 <i>Strahlungsfeld auf Flughöhen</i>	5
3.1.2 <i>Weltraumwetter</i>	8
3.1.3 <i>Solare Teilchenereignisse</i>	9
3.1.4 <i>Häufigkeit und Relevanz</i>	10
3.1.5 <i>Höhe der Expositionen</i>	12
3.1.6 <i>Warnsysteme</i>	12
3.1.7 <i>S-Skala</i>	13
3.1.8 <i>D-Skala</i>	15
3.1.9 <i>Dosiserfassung</i>	17
3.2 STRAHLENMEDIZINISCHER HINTERGRUND	19
3.2.1 <i>Jährliche Exposition</i>	19
3.2.2 <i>Radon</i>	19
3.2.3 <i>Medizinische Exposition</i>	20
3.2.4 <i>Nukleare Unfälle und Forschung</i>	20
3.2.5 <i>Kosmische Strahlung am Erdboden und terrestrische Strahlung</i>	21
3.2.6 <i>Strahlenbelastung des fliegenden Personals</i>	21
3.2.7 <i>Strahlenwirkung auf biologische Gewebe</i>	22
3.2.8 <i>Phasen der Strahlenwirkung</i>	22
3.2.9 <i>Deterministische und stochastische Schäden</i>	23
3.2.10 <i>Direkte und indirekte Strahlungswirkung</i>	25
3.2.11 <i>Krebsentstehung</i>	26
3.2.12 <i>Wie gefährlich ist ionisierende Strahlung?</i>	27
3.2.13 <i>Krebsmortalität des fliegenden Personals</i>	27
3.2.14 <i>Ultraviolette Strahlung</i>	28
3.2.15 <i>Katarakte</i>	29
3.2.16 <i>Teratologie</i>	30
3.3 RECHTLICHER KONTEXT	32
3.3.1 <i>International Commission on Radiological Protection</i>	32
3.3.2 <i>Gewebe-Wichtungsfaktoren</i>	33
3.3.3 <i>Strahlungs-Wichtungsfaktoren</i>	34
3.3.4 <i>International Civil Aviation Organization</i>	34
3.3.5 <i>Rahmengesetzgebung der Europäischen Union</i>	35
3.3.6 <i>Strahlenschutzgesetz und Strahlenschutzverordnung</i>	35
3.4 FLUGBETRIEBLICHE HINTERGRÜNDE	38
3.4.1 <i>Flugdurchführung</i>	38
3.4.2 <i>Informationssysteme</i>	40
4. MATERIAL UND METHODEN	42
4.1 SYSTEMATISCHE LITERATURRECHERCHE	42
4.1.1 <i>Fragestellung</i>	42
4.1.2 <i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA)</i>	43
4.1.3 <i>Datenbanken</i>	45
4.1.4 <i>Einschlusskriterien</i>	45

Inhaltsverzeichnis

4.1.5 Ausschlusskriterien	47
4.1.6 Suchbegriffe	48
4.1.7 Datenextraktion	48
4.1.8 Datenauswertung und Darstellung	49
4.2 AUSWERTUNG DER GROUND LEVEL ENHANCEMENTS	50
4.2.1 Anstiegszeit	50
4.2.2 Halbwertsbreite	51
4.2.3 Anzahl der untersuchten GLE	52
4.2.4 Python	52
4.2.5 DATENAUSWERTUNG	52
5. ERGEBNISSE	56
5.1 LITERATURRECHERCHE	56
<i>Fragestellung 1: Wie hoch ist die Exposition des ungeborenen Kindes während des Fliegens?</i>	56
<i>Fragestellung 2: Welche Auswirkungen hat ionisierende Strahlung auf Embryo und Fetus?</i>	62
5.2 UNTERSUCHUNG VERSCHIEDENER GROUND LEVEL ENHANCEMENTS (GLE)	66
5.2.1 Auswertung	69
5.2.2 Abweichungen	70
6. DISKUSSION	71
6.1 METHODIK	71
6.1.1 Literaturrecherche	71
6.1.2 Untersuchung der Ground Level Enhancements	72
6.2 MÖGLICHE GRENZWERTÜBERSCHREITUNG	72
6.3 EXPOSITION DES UNGEBORENEN	73
6.4 AUSWIRKUNGEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER DOSIS	74
6.5 ZEITPROFIL VERGANGENER GROUND LEVEL ENHANCEMENTS	75
6.6 DIE ANPASSUNG DER FLUGDURCHFÜHRUNG AM BEISPIEL VON VULKANISCHER ASCHE	77
6.7 HANDLUNGSOPTIONEN	79
6.8 OFFENE FRAGEN	82
7. ZUSAMMENFASSUNG	85
8. ANHANG	87
8.1 DOSISBEGRIFFE	87
8.1.1 Linearer Energietransfer	87
8.1.2 Messgrößen	88
9. LITERATURVERZEICHNIS	91
10. LEBENS LAUF	102

Abkürzungsverzeichnis

ACARS	Aircraft Communications Addressing and Reporting System
AIP	Aeronautical Information Publication
ALARA	As Low As Reasonable Achievable
CME	Coronal Mass Ejection
e ^{-aq}	Elektron
EURATOM	Europäische Atomgemeinschaft
eV	Elektronenvolt
FAA	Federal Aviation Administration
FL	Flight Level
GLE	Ground Level Enhancement
Gy	Gray
HF	High Frequency
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICRP	International Commission on Radiological Protection
INC	Increase
ISS	International Space Station
LET	Linear Energy Transfere
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOTAM	Notice to Airmen
OH	Hydroxidion
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
SAA	South Atlantic Anomaly
SPE	Solar Particle Event
StSchG	Strahlenschutzgesetz
StSchV	Strahlenschutzverordnung
UV	Ultraviolet
VHF	Very High Frequency
ZNS	Zentrales Nervensystem

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: STRAHLUNGSFELD (MODIFIZIERT NACH MEIER ET AL., 2020)	6
ABBILDUNG 2: SOLAR FLARE (QUELLE: NASA (23))	10
ABBILDUNG 3: ANSTIEGSZEIT (MODIFIZIERT NACH (96))	50
ABBILDUNG 4: HALBWERTSBREITE (MODIFIZIERT NACH (98))	51
ABBILDUNG 5: DATENEXTRAKTION 1	58
ABBILDUNG 6: DATENEXTRAKTION 2	63
ABBILDUNG 7: KORRELATION ZWISCHEN ANSTIEGSZEIT UND HALBWERTSBREITE DER UNTERSUCHTEN GLES	69
ABBILDUNG 8: ANSTIEGSZEIT UND HALBWERTSBREITE DER GLES	70
ABBILDUNG 9: ABLÄUFE IM FALL EINES ERHÖHTEN STRAHLUNGSBEITRAGS IN FLUGHÖHEN	78
ABBILDUNG 10: ANPASSUNGEN DER FLUGDURCHFÜHRUNG	82
ABBILDUNG 11: HANDLUNGSMÖGLICHKEITEN FÜR DEN FALL EINER EXPOSITION	83

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: S-SKALA (MODIFIZIERT NACH (33))	14
TABELLE 2: D-SKALA (MODIFIZIERT NACH (7))	16
TABELLE 3: VERSCHIEDENE EXPOSITIONSSZENARIEN (MODIFIZIERT NACH (50))	22
TABELLE 4: GEWEBE-WICHTUNGSFAKTOREN (MODIFIZIERT NACH (77))	33
TABELLE 5: STRAHLUNGS-WICHTUNGSFAKTOREN (MODIFIZIERT NACH (77))	34
TABELLE 6: DATENEXPLORATION 1	56
TABELLE 7: EXPOSITION DES UNGEBORENEN	60
TABELLE 8: DATENEXPLORATION 2	62
TABELLE 9: AUSWIRKUNGEN VON STRAHLUNG AUF UNGEBORENES LEBEN	65
TABELLE 12: LOW- UND HIGH-LET STRAHLUNG (MODIFIZIERT NACH (77))	88

1. Problemstellung

Fliegendes Personal ist auf Reiseflughöhen einem erhöhten Beitrag kosmischer Strahlung ausgesetzt. Diese setzt sich aus galaktisch kosmischer und solarer kosmischer Strahlung zusammen (1). Bisherige Untersuchungen haben ergeben, dass fliegendes Personal zusätzlich zur Hintergrundexposition im Durchschnitt ungefähr zwei Millisievert pro Jahr durch beruflich bedingte Strahlung ausgesetzt ist (2).

In der aktuellen Fassung des Strahlenschutzgesetzes sind Grenzwerte für beruflich exponierte Personen festgelegt. Im normalen Flugbetrieb sind die gesetzlich vorgegebenen Grenzwerte bisher noch nicht erreicht worden (3). Allerdings ist nicht auszuschließen, dass es nach jetzigem Stand der Wissenschaft durch Veränderungen der Komponenten des interplanetaren und interstellaren Mediums, wie zum Beispiel durch Weltraumwetterereignisse, zu einer relevant erhöhten Strahlenexposition kommen kann (1). Insbesondere ist auch nicht auszuschließen, dass es schon bei einem einzigen Flug zu einer Grenzwertüberschreitung kommen kann (4). Besonders hervorzuheben sind hierbei solare Teilchenereignisse, die zu erhöhten Expositionen auf Flughöhen führen.

Bereits vergangene Weltraumwetterereignisse geben Hinweise darauf, dass der im deutschen Strahlenschutzgesetz (StrlSchG, § 78, Abs. 4) festgelegte Grenzwert für die Organäquivalentdosis von 2 mSv pro Monat für die Gebärmutter bereits bei einem solaren Teilchenereignis überschritten werden kann (4). So bildet der gesetzliche Kontext die Grundlage dafür, dass ein Umgang mit Dosisüberschreitungen ermöglicht werden muss.

Das galaktisch kosmische Strahlungsfeld auf Flughöhen wird durch den elfjährigen Sonnenzyklus moduliert, der durch solare Maxima und Minima gekennzeichnet ist. Zum Verfassungsdatum dieser Dissertation befinden wir uns am Ende eines solaren Minimums. Solare Minima sind durch einen erhöhten Beitrag kosmischer Strahlung gekennzeichnet. Während der solaren Maxima verhält sich der Strahlungsbeitrag gegensätzlich. Dieser resultiert in einer geringeren Exposition auf Flughöhen und somit in einer geringeren Strahlenbelastung für fliegendes Personal und Passagiere. Auffällig ist allerdings, dass während eines solaren Maximums vermehrt solare Teilchenereignisse auftreten (5).

Es ist ratsam für den Fall eines solaren Teilchenereignisses mit erhöhten Expositionen auf Flughöhen Handlungsoptionen für eine eventuelle Dosisüberschreitung zur Verfügung zu haben. Um Handlungsoptionen zu erarbeiten, ist es wichtig, die Entstehung des Strahlungsfelds auf Flughöhen und des Weltraumwetters zu betrachten. Vor allem ist die Ermittlung von Informationen zum aktuellen Weltraumwetter als essenziell zu betrachten. Daneben spielen auch flugbetriebliche Abläufe eine große Rolle, um vor allem Informationswege zwischen der Flugzeugbesatzung und der Flugverkehrszentrale zu schaffen.

2. Ziel der Dissertation

Ziel der Arbeit ist es, allen beteiligten Parteien, wie den Flugbetrieben der Fluggesellschaften, den gesetzlichen Behörden und dem involvierten ärztlichen Personal, eine Grundlage zur Ermittlung von Handlungsoptionen zu schaffen.

Im Rahmen von Experteninterviews mit Vertretern des Luftfahrtbundesamtes und des Bundesamtes für Strahlenschutz fällt auf, dass alle beteiligten Parteien um die Notwendigkeit von Handlungsoptionen wissen, es aber noch keine festgelegten Verfahren zum Umgang mit Grenzwertüberschreitungen durch solare Teilchenereignisse gibt (6).

Zunächst werden zur Erarbeitung von Handlungsoptionen für die zivile Luftfahrt relevante Grundlagen des Strahlungsfeldes auf Flughöhen sowie die damit zusammenhängenden Sachverhalte in Bezug auf das Weltraumwetter dargestellt.

Im weiteren Verlauf wird die Frage beantwortet, wie sich Strahlung auf menschliches Gewebe auswirkt. In der vorliegenden Arbeit ist besonders die Strahlenwirkung auf ungeborenes Leben von besonderem Interesse. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie die Exposition von ungeborenem Leben ermittelt oder auch gemessen werden kann, da dieses besonders vulnerabel in Bezug auf Strahlenexpositionen ist. Um eine Einschätzung zu gewinnen, wird eine systematische Literaturrecherche in Bezug auf die zu erwartende Exposition durch Höhenstrahlung auf ungeborenes Leben durchgeführt. Auch wird die Frage beantwortet, ab welchen Expositionen mit Auswirkungen auf Embryonen beziehungsweise Foeten zu rechnen ist.

Hierfür werden folgende Fragestellungen formuliert:

Fragestellung 1: Wie hoch ist die Exposition des ungeborenen Kindes während des Fliegens?

Fragestellung 2: Welche Auswirkungen hat ionisierende Strahlung auf Embryo und Fetus?

Um Handlungsoptionen zu erarbeiten, muss auch die Relevanz von erhöhten Expositionen eingeschätzt werden. Daher werden bereits vergangene Weltraumwetterereignisse untersucht, um Hinweise zu erlangen, wie oft es zu Weltraumwetterereignissen kommt und wie hoch die Expositionen dabei ausfallen. Weltraumwetterereignisse gehen nicht zwingend mit erhöhten Expositionen auf Flughöhen einher. Beobachtungen haben gezeigt, dass bei Auftreten eines Ground Level Enhancements (GLE) auch

höhere Strahlenbelastungen auf Flughöhen zu erwarten sind. Ground Level Enhancements sind auf dem Erdboden gemessene erhöhte Expositionen, die durch besonders starke Weltraumwetterereignisse ausgelöst werden. In Zusammenhang mit einem Ground Level Enhancement ist eine erhöhte Exposition auf Flughöhen wahrscheinlicher (7).

Es wird untersucht, ob der zeitliche Verlauf vergangener Ground Level Enhancements Hinweise auf den erwartbaren Verlauf zukünftiger GLEs ermöglicht. Durch Kenntnisse über den wahrscheinlichen Verlauf eines GLEs können schnellstmöglich Anpassungen im Flugverkehr geplant und umgesetzt werden. Hierfür werden die Profile von vergangenen GLEs in Bezug auf den prozentualen Strahlungsanstieg ausgewertet. Es wird die H1 Hypothese definiert, die besagt, dass die Anstiegszeit eines GLEs mit dem zeitlichen Verlauf eines GLEs korreliert.

In der Diskussion werden die Ergebnisse in den flugbetrieblichen Hintergrund eingeordnet. Das dient als Grundlage, um auf Weltraumwetterereignisse in der Zukunft besser reagieren zu können, vor allem auch vor dem Hintergrund, ungeborenes Leben besser schützen zu können, das noch etliche Jahrzehnte an Lebenszeit erwartet.

3. Literaturrecherche

Die Literaturrecherche wird in den folgenden Unterkapiteln dargestellt. Für die Erarbeitung von möglichen Handlungsoptionen ist die Zusammenschau aller beteiligten Komponenten und Einflussfaktoren notwendig.

3.1 Strahlungsexposition auf Flughöhen

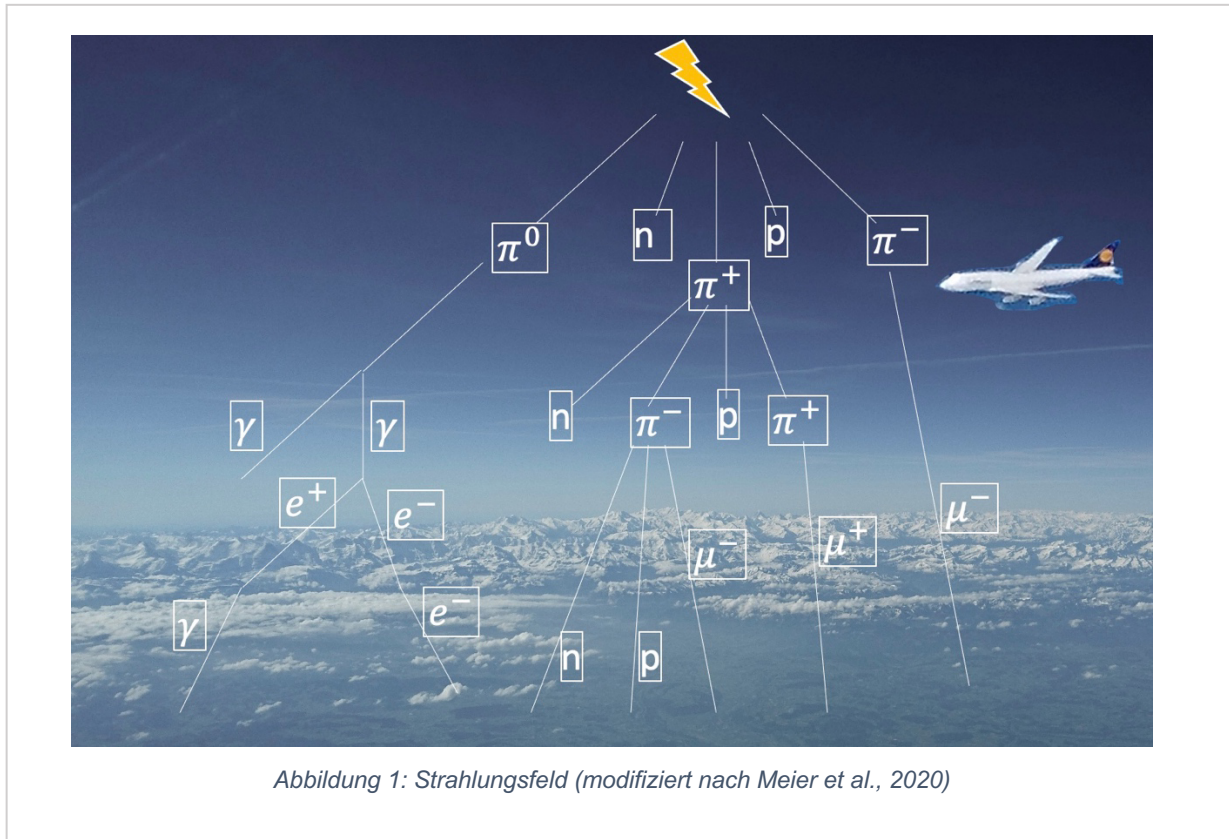
Die Strahlungsexposition auf Flughöhen unterscheidet sich von der Exposition am Erdboden oder im interplanetaren Raum. In diesem Kapitel werden die Entstehung sowie die Eigenschaften des Strahlenfelds auf Flughöhen vorgestellt.

3.1.1 Strahlungsfeld auf Flughöhen

Das Strahlungsfeld auf Flughöhen (Abbildung 1) setzt sich aus galaktisch kosmischen und solaren kosmischen Komponenten zusammen. Den größten Beitrag zur Strahlung auf Flughöhen hat die galaktisch kosmische Strahlung. Sie ist hauptverantwortlich für die schwankenden Expositionen während solarer Maxima und Minima (3). Galaktisch kosmische Strahlung hat ihren Ursprung außerhalb unseres Sonnensystems (8). Es wird vermutet, dass sie aus Supernovae stammt. Diese entstehen, wenn der nukleare Brennstoff eines massereichen Sterns aufgebraucht ist und dieser explodiert. Dabei wird innerhalb kürzester Zeit eine große Menge Energie in Form von Strahlung freigesetzt. Obwohl diese Strahlung meist Lichtjahre von unserer Erde entfernt ist, gelangt sie doch in unsere Nähe und interagiert mit dem interplanetaren Magnetfeld, welches sich zwischen Sonne und Erde befindet (9). Nicht alle Komponenten der galaktisch kosmischen Strahlung tragen zu der auf Flughöhen relevante Strahlung bei. Lediglich hochenergetische Teilchen mit Energien von 100 MeV/Nukleus bis 1 TeV/Nukleus sind energiereich genug, um einen Beitrag zum Strahlungsfeld auf Flughöhen zu leisten. Der Einfluss dieser Teilchen hängt auch von der Beschaffenheit der Erdatmosphäre und des Erdmagnetfelds ab (3).

Die auf die Erde einwirkende Strahlung besteht größtenteils aus Protonen, α -Partikeln, Elektronen, Positronen und anderen Schwerionen (8). Sie bilden die Primärstrahlung, welche wiederum mit Sauerstoff- und Stickstoffionen in der Erdatmosphäre reagieren, teilweise absorbiert, abgebremst oder abgelenkt werden und so ein sekundäres

Strahlungsfeld erzeugen (3). Einen 30%tigen Beitrag leisten hier Heliumkerne. Für die Exposition in Flughöhen zu 60-80 % verantwortlich sind Protonen und Neutronen. Ein kleinerer Beitrag entsteht durch Positronen, Elektronen, Gamma-Strahlung und Myonen (3).



Das primäre Strahlungsfeld wird durch mehrere Abschirmungseffekte teilweise abgelenkt. Diese bestehen aus dem Sonnenwind, dem interplanetaren Magnetfeld, dem Magnetfeld der Erde und der oberen Erdatmosphäre selbst (7). Der Abschirmungseffekt der Erdatmosphäre nimmt mit der Zunahme der Luftteilchendichte zum Meeresspiegel hin zu und verhält sich so antiproportional zur Strahlungsintensität. Dennoch erreichen einige Komponenten der ionisierenden Strahlung auch die Erdoberfläche. Größtenteils handelt es sich hierbei um Protonen, Neutronen und Elektronen (3). Flugzeuge bewegen sich meistens in Höhen von 10 bis 13 km über dem Meeresspiegel. Hier ist die Luftteilchendichte geringer. So ist von einem höheren Beitrag ionisierender Strahlung in Flughöhen auszugehen, da es weniger Reaktionspartner gibt, die mit den Strahlungskomponenten interagieren können und so ihre Energie abgeben (10).

Neben der galaktisch kosmischen Strahlung kann auch die solare kosmische Strahlung einen Expositionsbeitrag leisten. Die solare kosmische Strahlung kann durch mehrere Mechanismen von der Sonne freigesetzt werden. Sie spielt meist in Zusammenhang mit Weltraumwetterereignissen eine relevante Rolle für die Strahlung auf Flughöhen.

Als eine weitere Strahlungsquelle werden relativistische energetische Teilchen diskutiert, welche dem Van Allen Gürtel entspringen. Dieser Strahlungsgürtel ist ein Teil des Erdmagnetfelds, welches Strahlung aus dem Weltall einfängt und diese dadurch von der Erde größtenteils abschirmt (11).

Kosmische Strahlung ist isotrop. Das bedeutet, dass sie nicht nur punktuell oder nur aus einer bestimmten Richtung auf die Erde trifft. Im Gegenteil: kosmische Strahlung wirkt aus allen Raumrichtungen auf die Materie. Wie bereits erwähnt wird kosmische Strahlung durch mehrere Komponenten moduliert. Vor allem das interplanetare Magnetfeld spielt hier eine große Rolle. Im Rahmen von Weltraumwetterereignissen ist diese Isotropie von besonderer Bedeutung, da auch von der Sonne abgewandte Teile der Erde von erhöhten Expositionen betroffen sein können (3).

Dennoch dringt die Strahlung nicht überall gleich intensiv in die Erdatmosphäre ein. Ursächlich hierfür sind Abschirmungsmechanismen, die nicht überall gleich stark wirken. Durchschnittlich beträgt die Strahlenexposition auf Meeresspiegelhöhe ungefähr $0,06 \mu\text{Sv}$ pro Stunde. In einer Höhe von 35 000 Fuß, was einer durchschnittlichen Reiseflughöhe einer Boing 747 entspricht, sind es schon $6 \mu\text{Sv}$ pro Stunde. In 60 000 Fuß, wie beispielsweise der Reiseflughöhe einer Concorde, ist die Exposition dementsprechend noch höher (12). Die höchste Exposition befindet sich in einer Höhe von 20 bis 30 km im Regener-Pfotzer-Maximum (13). Selbstverständlich bezieht sich diese Höhe nicht auf eine in der zivilen Luftfahrt relevante Höhe. Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei Angaben zur Exposition pro Stunde um Durchschnittswerte. Die Strahlenexposition ist nicht allein von der Höhe abhängig. Auch der Längen- und Breitengradefekt spielen eine große Rolle.

Das Magnetfeld der Erde lenkt Strahlung, die in Äquatorregionen auf die Erde trifft, entlang der Längengrade zu den magnetischen Polen hin ab. Somit ist die Exposition an den Polen am höchsten und nimmt in Richtung des magnetischen Äquators ab (8). Näherungsweise kann davon ausgegangen werden, dass die Exposition in gleicher Höhe an den Polen etwa doppelt so hoch im Vergleich zur gleichen Höhe am Äquator

ist. Dieser Breitengradeneffekt wird geomagnetische Abschneidesteifigkeit genannt (engl.: geomagnetic cutoff-rigidity). Er wirkt auf Teilchen, deren Steifigkeit geringer ist als die vertikale Abschneidesteifigkeit des Erdmagnetfelds. Als Steifigkeit wird der Quotient aus Geschwindigkeit eines geladenen Teilchens dividiert durch dessen Ladung definiert (14,15).

In der Nähe der Küste Brasiliens wird eine Besonderheit in Bezug auf das Erdmagnetfeld beobachtet. Hier folgt das Magnetfeld nicht der Erdachse, sondern reicht relativ nah an die Erdoberfläche heran. Dieses Phänomen wird als Südatlantische Anomalie bezeichnet (engl. South Atlantic Anomaly, SAA). Obwohl sich dieser Bereich äquatornah und damit polfern befindet, wird vermutet, dass hier die Expositionen auf Grund der geringeren Wirkung der Abschirmmechanismen durch das Erdmagnetfeld erhöht sind. Messungen haben ergeben, dass es bisher keinen Anhalt für eine erhöhte Exposition auf Flughöhen im Bereich der Südatlantischen Anomalie gibt. Es bleibt allerdings offen, welche Effekte solare Teilchenereignisse auf die Exposition in dieser Region haben können (16).

3.1.2 Weltraumwetter

Die Sonne stellt für unsere Erde eine wichtige Energiequelle dar. Neben Photonen, die wir als das Sonnenlicht wahrnehmen, wird auch Energie anderer Wellenlängen emittiert. Ein Teil dieser Energie trägt zum Strahlungsfeld auf der Erde sowie auch auf Flughöhen bei. Dieses Strahlungsfeld wird unter anderem in Abhängigkeit des Sonnenzyklus moduliert. Es lässt sich der 11-jährige Schwabe-Zyklus erkennen, in dem die Sonnenaktivität und somit auch die Menge emittierter Energie zu- und abnimmt (17).

Dieser Zyklus unterliegt allerdings keiner strengen Regelmäßigkeit, sondern einem näherungsweise angenommenen Rhythmus. Beispielsweise nahm die Sonnenaktivität im Jahr 2008/2009 nicht wie zu erwarten zu, sondern stieg erst im Jahr 2011 wieder an (18). Die beiden letzten solaren Minima wurden 2009 und 2020 beobachtet (3,19). Während eines Minimums ist die Exposition durch galaktisch kosmische Strahlung höher, da der Sonnenwind schwächer ist und die Strahlung weniger effektiv abgelenkt wird. Die Sonnenaktivität hängt stark mit der Anzahl der Sonnenflecken zusammen. Während eines solaren Maximums können im Vergleich zu einem solaren Minimum mehr Sonnenflecken gezählt werden (20). Die Anzahl der Sonnenflecken hat Einfluss

auf den Relativen Sonnenflecken Index (RSI), welcher die Phasen des Sonnenzyklus abgrenzt (20).

Während der solaren Maxima ist zwar die Exposition durch galaktisch kosmische Strahlung geringer, allerdings ist hier das Auftreten eines solaren Teilchenereignisses wahrscheinlicher (5,8).

3.1.3 Solare Teilchenereignisse

Solare Teilchenereignisse (engl.: Solar Particle Events (SPE)) kommen vor, wenn im Vergleich zu ruhigen Weltraumwetterverhältnissen deutlich mehr geladene Teilchen von der Sonne ausgeworfen werden. Diese Ereignisse gehen von Orten wie der Sonnenkorona mit hoher magnetischer Feldstärke aus. Die Feldlinien des Sonnenmagnetfelds trennen die geladenen Teilchen, wie Protonen, Elektronen und geladene Schwereionen, vom übrigen Weltraum. Werden diese Feldlinien kurzzeitig während eines solaren Teilchenereignisses umorganisiert, kann ein großer Teil geladener Teilchen innerhalb kurzer Zeit bis zur Erde gelangen. Während eines solaren Zyklus treten circa 50 solare Teilchenereignisse auf (8). Welche Auswirkungen diese SPEs für die Erde haben, hängt von der Intensität der Sonneneruption ab.

Es gibt verschiedene Mechanismen, die zu einem SPE führen. Im Bereich der Sonnenflecken können magnetische Rekonnektionen zu explosionsartigen Strahlungsauswürfen führen. Diese Eruptionen werden auf Grund ihrer immensen Größe als coronare Massenejektion bezeichnet (CME). Große CMEs sind gekennzeichnet durch Massenauswürfe von einigen Tonnen solaren Materials, welches mit Geschwindigkeiten zwischen 250 und 3000 km/s von der Sonnenatmosphäre entsendet wird (21). Überschreitet die Geschwindigkeit der Auswürfe die der solaren Atmosphäre, kommt es zum Ausstoß einer Plasmawolke, die zu Schockfronten führen kann. Diese Schockfronten können hochenergetische Teilchen sekundär generieren, die dann mit der Erdatmosphäre interagieren und zu erhöhten Strahlungsexpositionen auf Flughöhen führen (3).

Eine wichtige Rolle spielen hier Protonen, die binnen eines halben Tages die Erde erreichen können. Langsamere CMEs benötigen mehrere Tage, bis sie die Erdatmosphäre erreichen. CMEs können daher zu einer mehrtägigen erhöhten Strahlungsintensität auf Flughöhen führen. Die Rekonnektionen sind häufig in den Regionen der

Sonnenflecken zu beobachten. Daher ist es auch nachvollziehbar, dass Sonnenstürme vor allem in Zeiten mit hoher Sonnenfleckenanzahl entstehen (20).

Die ausgestoßenen geladenen Teilchen werden auch in Richtung der Sonne selbst ausgestoßen und treffen diese. Dadurch wird Bremsstrahlung in Form von Röntgenstrahlung frei, die als Flare bezeichnet wird. Dieses Flare breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Während die Protonen im Rahmen eines CME etwa einen Tag benötigen, um die Erde zu erreichen, braucht ein Flare nur ungefähr acht Minuten und kann somit auch ein erstes Anzeichen für ein SPE sein (22).

Ein SPE kann auch ohne vorausgehende Flares entstehen. Umgekehrt können allerdings auch Flares ohne größere Plasmawolke mit Auswirkungen auf die Erde entstehen. Die solaren Flares (Abbildung 2) sind dann meist von kurzer Dauer, etwa im Bereich von Stunden, und sind durch energieärmere Teilchenflüsse gekennzeichnet (8).

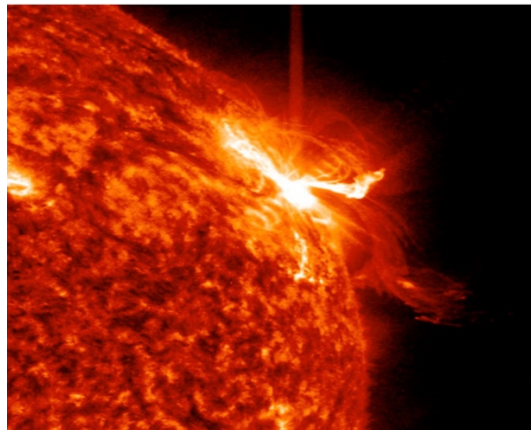


Abbildung 2: Solar Flare (Quelle: NASA (23))

3.1.4 Häufigkeit und Relevanz

Um eine Einschätzung der Häufigkeit und damit der Relevanz des Auftretens von Weltraumwetterereignissen vornehmen zu können, muss betrachtet werden, wie häufig diese auftreten. Jedoch ist nicht allein das Auftreten von Weltraumwetterereignissen ausschlaggebend für die Evaluation der Relevanz. Wie schon zuvor erwähnt, wird die kosmische Strahlung durch mehrere Mechanismen von der Erde abgeschirmt. Es ist davon auszugehen, dass erst Teilchen mit Energien von > 500 MeV durch die Abschirmmechanismen dringen können (7). Diese Teilchen treten auf der Erde in

Wechselwirkung mit anderen Teilchen, wodurch weitere Strahlungsfelder entstehen. Besonders sekundär generierte Neutronen spielen eine große Rolle für das Strahlungsfeld auf Flughöhen (24). Auf der Erdoberfläche werden sie mit Neutronenmonitoren beobachtet.

Neutronen machen einen großen Teil des sekundären Strahlungsfeldes aus und können aufgrund ihres Strahlungs-Wichtungsfaktors in Abhängigkeit ihrer Energie zusammen mit Protonen maßgeblich zur Exposition beitragen (25). An vielen Orten auf der Erde sind Neutronenmonitore aktiv, um besonders genau die Verteilung der eintreffenden Strahlung und ihre Anisotropie beobachten zu können. Unter Anisotropie wird in diesem Fall die Verteilung der eintreffenden Strahlung auf der Erdoberfläche verstanden. Können vermehrt eintreffende Neutronen durch die Neutronenmonitore gemessen werden, ist von einem Ground Level Enhancement (GLE) auszugehen.

Definiert werden Ground Level Enhancements als eine nahezu zeitgleich auftretende statistisch signifikant erhöhte Neutronenzahl, die durch zwei verschiedene Neutronenmonitore gemessen wird. Zusätzlich kann eine korrelierende Erhöhung des Protonenflusses durch Erdsatelliten gemessen werden (26). Bei statistisch nicht signifikanten Neutronenzahlerhöhungen wird von sub-GLEs ausgegangen (26).

Ground Level Enhancements sind wichtig für die Einschätzung der Exposition auf Flughöhen. Erhöhte Teilchenflüsse auf dem Erdboden führen auch zu erhöhten Teilchenflüssen auf Flughöhen (7). Das Auftreten von Ground Level Enhancements wird seit etwa 60 Jahren durch Neutronenmonitore betrachtet (19). Neutronenmonitore werden von mehreren Standorten auf der Erde aus betrieben. Einer der Neutronenmonitore wird durch die finnische Universität in Oulu betrieben. Daten zu vergangenen GLEs können über eine öffentliche Datenbank eingesehen werden (19).

Es kann von näherungsweise sieben bis zehn GLEs pro solarem Zyklus ausgegangen werden (27, 5). Das letzte GLE wurde am 28.10.2021 (GLE 73) beobachtet (19). Es wurde allerdings ein nur sechsprozentiger Zuwachs am Höhepunkt des GLE zur durchschnittlichen Hintergrunddosis gemessen (19). Seit Aufzeichnung der Strahlung 1942 durch Neutronenmonitore wurden 72 Ground Level Enhancements gezählt. Dabei trugen nur wenige GLEs zu einer relevant erhöhten Exposition auf Flughöhen bei. Der Neutronenmonitor der Universität Oulu in Finnland konnte seit Beginn der dortigen Aufzeichnungen Teilchenflüsse von fünf GLEs messen, deren Intensität zu einer mehr als 80-prozentigen Zunahme an ihren jeweiligen Höhepunkten beitrug. Das GLE mit

der höchsten Neutronenzählrate durch die Universität Oulu war das GLE 69 mit einer Zunahme von 269 %. Vier GLEs wurden als milde Ereignisse beobachtet (19).

3.1.5 Höhe der Expositionen

Neben der Häufigkeit des Auftretens ist die Höhe der Exposition durch Sonnenstürme besonders aus der Sicht des Strahlenschutzes interessant. Die durchschnittliche Dosis eines Flugs von Paris nach New York beträgt $60 \mu\text{Sv/h}$. Das stärkste GLE seit Beginn der Aufzeichnungen fand am 23.02.1956 (GLE 5) statt. Hier kam es zu errechneten Expositionen um den Faktor fünf bis 30 auf Transatlantikrouten (28). Lantos et. al errechneten eine Äquivalentdosis von 1,75 mSv für einen Flug von Paris nach Washington D.C. während des GLE 5. Errechnet wurden außerdem Dosiserhöhungen um bis zu 4554 % während dieses GLEs (29). Auch andere der frühen GLEs führten zu erhöhten Expositionen auf Flughöhen. Die GLEs 1 bis 4 trugen mit 600 bis 2000 % ebenfalls zu relevanten Dosiserhöhung auf Flughöhen bei (30).

Dennoch beeinflussen die meisten GLEs der letzten Jahrzehnte die Exposition des fliegenden Personals nur in geringem Maß, da die Ereignisse meistens mit geringen Strahlenexpositionen in Flughöhen auftraten oder nur von kurzer Dauer waren. Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass in Zukunft GLEs auftreten, die dem GLE 5 ähneln, sodass Grenzwertüberschreitungen auftreten können (31). Hierbei ist es vor allem möglich, dass es schon während eines einzigen Fluges zu einer Grenzwertüberschreitung kommen kann. Es muss auch erwähnt werden, dass nicht nur ein einziges GLE eine Grenzwertüberschreitung hervorrufen kann. Mehrere GLEs mit kurzen Abständen können in ihrer Summe auch zu einer erhöhten Exposition und damit zur Grenzwertüberschreitung führen.

3.1.6 Warnsysteme

Es ist für die Flugzeugbesatzung von großem Interesse, dass erhöhte Expositionen auf Flughöhen rechtzeitig erkannt werden. Der Space Weather Prediction Center der US-amerikanischen National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) stellt ein für die Nutzer kostenloses Warnsystem bereit (32). Dieses Warnsystem basiert auf Messungen durch erdnahe Satelliten wie den GOES-Satelliten und Raumsonden wie

den SoHO, STEREO und SDO. Die Daten geben in erster Linie Aufschluss über die derzeitige Sonnenaktivität und das emittierte Strahlungsfeld. Auf Grundlage dieser Daten werden verschiedene Warnstufen durch die NOAA veröffentlicht.

3.1.7 S-Skala

Erhöhte Beiträge solarer Strahlung werden durch die S-Skala der NOAA klassifiziert. Die S-Skala umfasst fünf Stufen (Tabelle 1). Unter moderaten Weltraumwetterverhältnissen misst der GOES-Satellit einen Hintergrundlevel von 0,1 pfu. pfu ist die Einheit für den Protonenfluss. Sie setzt sich aus der Anzahl der Protonen $\times \text{cm}^2 \times \text{s}^{-1} \times \text{sr}^{-1}$ zusammen. 10 pfu entsprechen einem S1 Alarm auf der S-Skala. 100 pfu einem S2 und so weiter (7).

Ab einer Stufe S3 haben die meisten Fluggesellschaften eine Warnstufe. So werden ab S3 Flugrouten angepasst, Flughöhen gegebenenfalls verringert und Flugzeiten geändert. Hervorzuheben ist allerdings, dass es bereits zu Fehlalarmen kam. Ein bekanntes Beispiel hierfür sind die „Halloween Storms“ im Oktober 2003. Laut der NOAA handelte es sich hierbei um ein solares Teilchenereignis, welches sogar zeitweise die Stufe S4 erreichte. Da die Schwelle für einen Handlungsbedarf bei einigen Fluggesellschaften bereits bei einem S3 überschritten wird, passten diese Fluggesellschaften ihre Flugdurchführungen an die jeweiligen vorgesehenen Handlungen an. Rückwirkend betrachtet, kam es beim GLE 65 (den "Halloween Storms") zu einer kaum relevanten Erhöhung des Strahlungsbeitrags in Flughöhen (7). Nur 5 Prozent der durch den GOES-Satelliten gemessenen solaren kosmischen Strahlung werden auch von einem Neutronenmonitor am Erdboden registriert. Das deutet auf einen sehr starken Abschirmmechanismus durch die Magnetosphäre und die Erdatmosphäre hin. In Reiseflughöhen wurde eine ungefähr 30 Prozent höhere Strahlenbelastung während des GLE 65 gemessen (7).

Die S-Skala ist damit keineswegs überflüssig oder fehlerhaft. Gerade im Hinblick auf Raumfahrzeuge oder sogar bemannte Raumfahrtmissionen ist die S-Skala essenziell für eine sichere Einschätzung der solaren Strahlenbelastung. Da die S-Skala allerdings zu falscher Einschätzung führen kann, was die Strahlenbelastung in Reiseflughöhen angeht, wurde ein neuer Index eingeführt (Tabelle 2) (7).

3. Literaturrecherche

Tabelle 1: S-Skala (modifiziert nach (33))

Skala	Bedeutung	Teilchenfluss ≥ 10 MeV	Effekt
S1	minor	10	Geringer Effekt auf HF-Radio in Polarregionen
S2	moderate	10^2	Möglicher Effekt auf HF-Radio und Navigation in Polarregionen
S3	strong	10^3	Mögliche erhöhte Exposition in sehr hohen Flughöhen
S4	severe	10^4	Großer Effekt auf HF-Radio und starke Exposition der Besatzung bei sehr hohen Flughöhen
S5	extreme	10^5	Wahrscheinlicher Zusammenbruch des HF-Radios und Navigationssystems in Polarouten, sehr starke Exposition der Besatzung in hohen Flughöhen

3.1.8 D-Skala

Der D-Index ermöglicht eine Einschätzung der Strahlenbelastung auf Flughöhen und wird auf der D-Skala in verschiedene Stufen eingeteilt (Tabelle 2). Durch die Erfassung der Neutronendaten durch die Neutronenmonitore kann ein Ground Level Enhancement erfasst werden. Durch die gewonnenen Daten ist es möglich, die Exposition auf Flughöhen zu ermitteln. Dosisrechnungsprogramme, wie PANDOCA, sind in der Lage, die Daten der Neutronenmonitore auf Flughöhen zu übertragen (7).

Auf Flughöhen ist keine erhöhte Exposition zu erwarten, wenn nicht auch ein korrelierendes Ground Level Enhancement am Boden gemessen wird. Die durch die erdnahen Satelliten gemessene solare Strahlung hat nur bei hohen keV Werten einen relevanten Einfluss auf die Strahlung in Flughöhen. Die Erdatmosphäre schirmt, wie bereits zuvor erwähnt, einen Großteil der Strahlung ab. Aus diesem Grund sind nur sehr hochenergetische Teilchen in der Lage, einen Einfluss auf die Exposition zu haben (7).

Der D-Index berücksichtigt daher auch höhere Schwellendosen in Bezug auf die jeweiligen Level. Neutronenmonitore messen Neutronenstrahlung ab 1 GeV. Deshalb ist davon auszugehen, dass niedrigere Energielevel an Strahlung keinen signifikanten Einfluss auf Flughöhen haben. Die Bereitstellung der Informationen durch den D Index ist für jeden beliebigen Ort auf der Erde möglich. Aus den lokalen D_L -Indices lässt sich auch der globale D_G -Index ermitteln. Es ist außerdem möglich, anhand der Flugroute das Risiko für einzelne Flüge zu erfassen. Somit ist der D_F -Index eine gute Möglichkeit für Fluggesellschaften, ihren Flugbetrieb nur dann an solare Teilchenereignisse anzupassen, wenn auch tatsächlich mit einer erhöhten Exposition auf den betroffenen Flügen zu rechnen ist (7).

3. Literaturrecherche

Tabelle 2: D-Skala (modifiziert nach (7))

Skala	Bedeutung	Dosisratenintervall ($\mu\text{Sv/h}$)	Effekt
D0	quiet	$\dot{E}_{sol} < 5$	Natürliche Schwankungen des Strahlungsfelds
D1	nominal	$5 \leq \dot{E}_{sol} < 10$	Leichte Schwankungen des Strahlungsfelds bei FL400* in Polregionen
D2	minor	$10 \leq \dot{E}_{sol} < 20$	Schwankungen des Strahlungsfelds bei FL400* - FL600* in Polregionen
D3	moderate	$20 \leq \dot{E}_{sol} < 40$	Dosisrate auf der ISS**, Strahlungswarnung durch die FAA***
D4	strong	$40 \leq \dot{E}_{sol} < 80$	Dosisrate während eines Außeneinsatzes auf der ISS**
D5	severe	$80 \leq \dot{E}_{sol} < 160$	Mögliche FAA*** Grenzwertüberschreitung ($500 \mu\text{Sv}$) bei Schwangeren

*FL: Flight Level

**ISS: International Space Station

***FAA: Federal Aviation Administration (US Behörde)

3.1.9 Dosiserfassung

Deutsche Fluggesellschaften sind gesetzlich verpflichtet, die Strahlenbelastung ihres fliegenden Personals zu ermitteln und den zuständigen Behörden mitzuteilen (34). Für diese Zwecke wurden computergestützte Berechnungsprogramme zur Ermittlung der Expositionen entwickelt. Mittlerweile gibt es hier mehrere Programme, wie zum Beispiel CARI-7A (35), NAIRAS (36), SIEVERT (37) und PANDOCA (2).

PANDOCA steht für Professional Aviation Dose Calculator und wird hier im Besonderen vorgestellt, da die meisten deutschen Airlines auf Grundlage dieses Programms die jeweilige Strahlungsbelastung ihres fliegenden Personals dem zuständigen Luftfahrt-Bundesamt mitteilen (2).

Dosisrechnungsprogramme wie PANDOCA nutzen physikalische Modelle, die als Berechnungsgrundlage der jeweiligen Programme genutzt werden. Mit Hilfe dieser Modelle wird die Dosis unter Berücksichtigung der Flugroute, der Flughöhe, des Breitengrades und der jeweiligen Dauer, die an einer Position verbracht wurde, berechnet. Außerdem wird die Anzahl der Sonnenflecken zur Einschätzung der Sonnenaktivität inkludiert. Ein weiterer wichtiger Parameter für die Berechnung der Strahlenbelastung wird durch Einbezug einer Monte Carlo Simulation zum Teilchentransport innerhalb der Atmosphäre gewährleistet. So können das Strahlungsfeld und die damit verbundene Energie der Teilchen berücksichtigt werden (2).

Auch Fluggäste können unter www.sievert-system.org ihre individuelle Strahlendosis ermitteln. Bisher gibt es keine gesetzlichen Regularien in Deutschland in Bezug auf die Exposition der Fluggäste durch Höhenstrahlung. Die in der Luft verbrachte Zeit von Vielfliegern kann allerdings durchaus vergleichbar mit der des fliegenden Personals sein (34, 38).

Es stellt sich die Frage, weshalb eine indirekte Berechnung der Dosis notwendig ist. Medizinisches Personal, das einer beruflichen Strahlenbelastung ausgesetzt ist, trägt zur Überwachung der Exposition ein Dosimeter, welches in regelmäßigen Abständen ausgewertet wird. Weshalb kann die Dosis fliegenden Personals nicht auch auf diese Weise erfasst werden? Hierfür lohnt es sich, das Strahlungsfeld auf Flughöhen zu betrachten. Es fällt auf, dass die Strahlenbelastung vor allem durch Neutronen und Protonen verursacht wird (3). Dosimeter, die im medizinischen Bereich normalerweise verwendet werden, sind nicht ausreichend sensitiv für Neutronenstrahlung. Daher

würde es zu einer Verfälschung der Messungen kommen. Eine weitere Idee wäre, das fliegende Personal mit einer Art Bleischürze auszustatten. Auch das wäre wenig hilfreich, da die Exposition, wie bereits erwähnt, isotrop ist. Sie trifft also aus allen Raumrichtungen auf die Materie. Das könnte durch eine Bleischürze nur unzureichend abgefangen werden und würde außerdem einen zusätzlichen erheblichen Gewichtungsfaktor bedeuten (39).

3.2 Strahlenmedizinischer Hintergrund

Die Exposition der Bevölkerung hat verschiedene Ursachen. Auch ist keine homogene Exposition nachzuweisen. Einige Gründe für die Exposition mit Strahlung und deren Auswirkung auf Organismen werden in diesem Kapitel vorgestellt.

3.2.1 Jährliche Exposition

Alle Lebewesen auf der Erde sind einem größeren oder kleineren Beitrag von Strahlung ausgesetzt. Diese Exposition setzt sich aus natürlichen und künstlich erzeugten Komponenten zusammen. Je nach Aufenthaltsort variiert die Exposition. So ist die Strahlenbelastung durch kosmische Strahlung am Erdboden in Gebirgs- und Höhenlagen höher als in Meeresspiegellhöhe. Die jährliche Hintergrundexposition beträgt ungefähr zwei Millisievert pro Jahr in Deutschland (40).

Das Gas Radon hat hier den größten Anteil. Die Strahlung aus nuklearen Unfällen und Experimenten, die medizinische Exposition und die Strahlung durch terrestrische und kosmische Strahlung sind ebenfalls ursächlich für die Hintergrundexposition. Der medizinischen Strahlenexposition wird eine Sonderstellung zuteil, da nicht jeder Mensch gleich stark exponiert wird. Beispielsweise hat nicht jeder Patient den gleichen Bedarf an radiologischer Diagnostik.

3.2.2 Radon

Das Edelgas Radon trägt zum größten Teil zur Hintergrundexposition bei (41). Bisher sind in Deutschland vor allem im Schwarzwald Radonquellen bekannt. Durch aktuelle Messungen werden immer mehr Radonquellen detektiert und in Kartensysteme eingepflegt (42). Eine erhöhte Exposition ist mit einem erhöhten Risiko assoziiert, an Lungenkrebs zu erkranken. Besonders in geschlossenen Räumen, die durch Radonquellen kontaminiert sind, werden erhöhte Krebserkrankungsraten beobachtet (42). Die jährliche Inhalation von Radon verursacht bei der durchschnittlichen Bevölkerung eine Dosis von ungefähr 1,1 mSv pro Jahr und hat damit den größten Anteil an der jährlichen Hintergrundexposition (40). Kontrovers diskutiert wird ein therapeutischer Nutzen durch geringe Strahlungsdosen im Rahmen einer Radoninhalationstherapie (41).

3.2.3 Medizinische Exposition

Die meisten Menschen werden zusätzlich zu natürlichen Strahlungsquellen auch künstlicher Strahlung ausgesetzt. So tragen besonders Röntgenaufnahmen zur Exposition bei. Vor allem dreidimensionale Aufnahmen, wie beispielsweise eine Computertomographie, haben einen signifikanten Beitrag zur jährlichen Dosis. Laut dem Bundesamt für Strahlenschutz haben Röntgenaufnahmen und andere medizinische Strahlungsexpositionen einen Beitrag von durchschnittlich 1,6 mSv pro Jahr (40,43).

Da die Röntgendiagnostik weit verbreitet ist und sogar zunimmt, erhöht sich der Beitrag zur jährlichen Exposition stetig. Auch sind viele moderne Therapien mit einer röntgenologischen Diagnostik und Überwachung verbunden. Besonders in der Prävention und Krebstherapie wird auf die dreidimensionale Röntgendiagnostik zurückgegriffen. Die Zahnmedizin hat mit 40 % den größten Anteil an Röntgendiagnostik in der Medizin, allerdings ist die Exposition auf Grund der geringen Größe der Aufnahmen geringer (40).

Auch medizinisches Personal, welches in strahlenmedizinischen Einrichtungen arbeitet, fällt in den Bereich der beruflich exponierten Personen. Hier ist die Dosisüberwachung vor allem durch TLD Dosimeter gewährleistet, die in regelmäßigen Abständen ausgelesen werden (40).

3.2.4 Nukleare Unfälle und Forschung

Zu den künstlichen Strahlungsquellen gehören auch nukleare Vorkommnisse wie zum Beispiel der Unfall 1986 in Tschernobyl. Die damals freigesetzte Strahlung ist fortwährend präsent und trägt zur jährlichen Hintergrundexposition bei (44). Allerdings ist die Exposition gering und wird durch das Bundesamt für Strahlenschutz mit 0,009 mSv pro Jahr angegeben (45).

Auch atomare Unfälle jüngerer Zeit tragen weltweit zu einer erhöhten Strahlenbelastung bei. Die Auswirkungen des Unfalls in Fukushima 2011 sind global messbar, bewegen sich allerdings in sehr geringen Dosisbereichen (46).

Einen weiteren Beitrag künstlicher Strahlung haben Kernwaffenversuche. Besonders in Zeiten des Kalten Krieges, aber auch zur heutigen Zeit, wird die globale Hintergrundexposition durch Raketentests und Testungen nuklearer Waffen erhöht (47). Ihr Beitrag beläuft sich auf 0,1 mSv pro Jahr (45).

3.2.5 Kosmische Strahlung am Erdboden und terrestrische Strahlung

Nicht nur auf Flughöhen ist der Dosisbeitrag durch kosmische Strahlung erhöht. So ist die Exposition durch kosmische Strahlung auch in den Gebirgslagen im Vergleich zum Meeresspiegel erhöht. Auf der Zugspitze sind Wanderer beispielsweise einem viermal höheren Strahlungsbeitrag ausgesetzt im Vergleich zur Meeresspiegellhöhe (43,45).

Die terrestrische Strahlung wird durch radioaktive Stoffe in Gesteinsschichten und Baumaterialien verursacht. Auch hier variiert die Exposition in Zusammenhang mit dem jeweiligen Aufenthaltsort. Das Bundesamt für Strahlenschutz gibt einen Beitrag von 0,7 mSv pro Jahr durch kosmische und terrestrische Strahlung am Erdboden an (43).

Wie bereits erwähnt, ist im Bereich der Küste Brasiliens eine engere Lagebeziehung zwischen Erdoberfläche und Erdatmosphäre zu beobachten. Nun wäre davon auszugehen, dass in diesem Bereich auch eine erhöhte Strahlenexposition zu messen ist. Untersuchungen haben ergeben, dass zwar eine erhöhte Exposition am Erdboden zu messen ist, diese jedoch nicht in Flughöhen gemessen wird. Dieses Phänomen beruht auf der Tatsache, dass der Küstensand radioaktives Gestein enthält, welches einen leicht erhöhten Strahlungsbeitrag leistet (48).

3.2.6 Strahlenbelastung des fliegenden Personals

Fliegendes Personal ist vor allem einem Beitrag natürlich vorkommender kosmischer Strahlung ausgesetzt. Besonders hoch exponiert ist fliegendes Personal, welches auf Langstrecken in Polnähe eingesetzt wird. Von Deutschland aus wird vor allem bei Zielen wie Nordamerika oder Japan polnah geflogen. Fliegendes Personal, welches ausschließlich auf Kurz- und Mittelstrecken eingesetzt wird, ist einer geringeren Strahlungsintensität ausgesetzt (49).

In Deutschland und auch in einigen anderen Ländern werden die Dosiswerte jedes einzelnen fliegenden Beschäftigten erfasst und dokumentiert. Zahlreiche Institutionen sind an der Erfassung der Strahlendosis beteiligt (3).

Die Abhängigkeit der Exposition von Flugdauer- und route lässt sich gut anhand eines Vergleichs zwischen effektiver Dosis einer Röntgenaufnahme und beispielhafter Flugrouten veranschaulichen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Verschiedene Expositionsszenarien (modifiziert nach (50))

Expositionsszenario	Geschätzte individuelle Dosis (mSv)
Flug New York – London – New York	0,1
Mammographie (Dosis für die Brust)	3
Natürliche Hintergrunddosis	3 /Jahr
Computertomographie des Abdomens beim Kind	25
Exposition auf der Internationalen Raumstation	170 /Jahr

3.2.7 Strahlenwirkung auf biologische Gewebe

Trifft Strahlung auf biologische Gewebe, können verschiedene Effekte beobachtet werden. Das Ausmaß dieser Effekte hängt von verschiedenen Parametern ab. Die in Flughöhen relevante Strahlung gehört zur Gruppe der ionisierenden Strahlung (3). Das Auftreffen von ionisierender Strahlung auf biologische Gewebe kann mit einem Energietransfer verbunden sein. Nicht jede Art von Auftreffen ist gleich intensiv und verhält sich nicht gleich in Bezug auf die erwartbaren Auswirkungen. Relevant sind vor allem die Teilchenart und die Energie, mit der sie auf das jeweilige Gewebe trifft. Auch ist nicht jedes Gewebe gleichermaßen empfindlich gegenüber der eintreffenden Energie.

3.2.8 Phasen der Strahlenwirkung

Die Wirkung von Strahlung lässt sich in verschiedene Phasen gliedern, die sich in ihrer Dauer und Auswirkung unterscheiden. Es werden die physikalische Phase, die physikalisch-chemische, die molekulare und die biologische Phase unterschieden (51,52).

Besonders schnell zeigt die physikalische Phase ihre Wirkung. Binnen 10^{-12} bis 10^{-18} Sekunden wird Energie absorbiert und es kommt zur Anregung oder Ionisation des getroffenen Teilchens. Ein Teil der deponierten Energie wird als Wärme frei (51).

Auch die physikalisch-chemische Phase läuft sehr schnell ab und kann schon nach 10^{-6} Sekunden beobachtet werden. Hierbei kommt es vor allem zur Radikalbildung. Besonders Primärradikale wie OH^\bullet , H^\bullet , e^-_{aq} und Peroxide werden freigesetzt und reagieren mit neuen Bindungspartnern. Auch kann es zur Bildung von Bioradikalen kommen. Radikale verursachen durch ihre Freisetzung vor allem einen indirekten Schaden, da sie ihre Energie weitergeben (51).

Die molekulare oder biochemische Phase läuft innerhalb weniger Sekunden oder Minuten ab. Dabei kommt es zu Veränderungen der Biomoleküle. Vor allem betroffen sind die DNA und Zellmembranen. Als Reaktionen werden hier vor allem Oxidationen, Reduktionen und Hydroxylierungen beobachtet (51).

Als letzte Phase oder auch als zeitintensivste Phase wird die biologische Phase definiert. Hierbei kann es auf subzellulärer Ebene zu Doppelstrangbrüchen der DNA kommen, die Erbgut- oder Stoffwechseleränderungen zur Folge haben können. Auf zellulärer Ebene zeigen sich Strahlungsschäden in Form von Erbgutveränderungen, akuten und chronischen Organschäden und Missbildungen bis hin zum Zelltod. Eine besondere Folge durch die Erbgutveränderung kann die Entstehung von Krebs sein. Biologische Schäden auf zellulärer und subzellulärer Ebene treten in Zeiträumen von Minuten bis Jahren auf. Sie unterliegen somit keinem eingeschränkten zeitlichen Muster (51).

3.2.9 Deterministische und stochastische Schäden

Ein Aspekt zur Einschätzung der Wirkung von Strahlung ist die Unterscheidung von deterministischen Schäden und stochastischen Schäden. Während deterministische Schäden einer direkten Dosis-Wirkungs-Beziehung unterliegen, folgen stochastische Schäden dem Zufallsprinzip.

Deterministische Schäden treten unmittelbar nach der Exposition durch Strahlung auf (52). Hierbei kommt es zum Untergang von Zellen. Besonders wichtig für die Zuordnung der Schäden zu den deterministischen Schäden ist die Korrelation der spürbaren beziehungsweise messbaren Auswirkungen mit einer Schwellendosis (53). In der Literatur findet sich Evidenz für eine Schwellendosis ab 500 mSv beim Erwachsenen und beim ungeborenen Kind zwischen 50 und 100 mSv (54). Ein Beispiel für deterministische Strahlenschäden ist der Sonnenbrand. Die eintreffende UV-Strahlung auf die

Haut führt zu einem Zelluntergang mit einer Entzündungsreaktion der Haut. Hierbei ist die Dosis-Wirkungsbeziehung besonders leicht nachzuvollziehen. Umso länger das Sonnenbad andauert und umso höher die Strahlungsintensität ist, desto stärker wird der Sonnenbrand. Weitere deterministische Strahlungswirkungen sind Haarausfall, Unfruchtbarkeit sowie die akute Strahlenkrankheit (55). Besonders im Hinblick auf onkologische Patienten, die einer Radiochemotherapie ausgesetzt wurden, sind diese Strahlenwirkungen deutlich zu beobachten.

Stochastische Strahlungsschäden treten zufällig und ohne Schwellendosis auf. Sie sind nicht unmittelbar nach der Exposition spürbar. Sie sind besonders relevant für den betrieblichen Strahlenschutz und somit auch für die zivile Luftfahrt. Zu stochastischen Strahlenschäden kann es schon bei geringen Dosen kommen. Allerdings korreliert die Wahrscheinlichkeit, dass ein stochastischer Effekt auftritt, mit der Höhe der Exposition. Bei höheren Expositionen ist auch die Wahrscheinlichkeit höher, dass ein Effekt auftritt (56). Wenn Stammzellen oder Keimzellen durch Strahlung beschädigt werden, wird der verursachte Schaden an die Tochtergeneration weitergegeben oder die Zellen sterben, ohne sich zu teilen. Körpereigene Korrekturmechanismen sind in der Lage, zelluläre Schäden zu erkennen und den programmierten Zelltod einzuleiten. Sind die Korrekturmechanismen selbst von Schäden betroffen, ist eine fehlerhafte Zellvermehrung wahrscheinlicher (57). Vor dem Hintergrund, dass stochastische Schäden vor allem in sich teilenden Zellen relevant sind, kann beobachtet werden, dass von diesen Schäden vor allem in der Entwicklung befindliche Organismen betroffen sind. Darüber hinaus sind stochastische Schäden auch mit der Entwicklung von Krebserkrankungen korreliert (52). Die Strahlenschutzkommission hat bereits Expositionen unter 100 mSv als relevant eingestuft (49). Auch die International Commission of Radiological Protection (ICRP) empfiehlt die Anwendung der Linear Non Threshold Theory in Bezug auf stochastische Strahlenschäden (58). Beispiele für stochastische Schäden sind vererbare Effekte, Leukämien und andere Krebserkrankungen.

3.2.10 Direkte und indirekte Strahlungswirkung

Strahlung kann direkte und indirekte Auswirkungen haben. So kann ein geladenes Teilchen direkt auf ein Molekül treffen und mit seiner Energie dessen Struktur verändern. Wird zum Beispiel ein Wassermolekül getroffen, können freie Radikale entstehen. Es kommt zur Radiolyse des Wassers. Durch Radiolyse kann es auch zur Bildung von Ionen und Peroxiden kommen. Diese Stoffe sind sehr reaktiv und reagieren schnell mit einem neuen Bindungspartner. Wenn diese Stoffe weiter reagieren und so zum Beispiel zur Oxidation von Biomolekülen führen, wird das als indirekte Strahlungswirkung bezeichnet (56, 59).

Besonders durch Bremsstrahlung kann es zu indirekten Auswirkungen durch Strahlung kommen. Bremsstrahlung entsteht durch den Aufprall von Strahlung auf die Hüllenelektronen anderer Teilchen. Dabei wird die Strahlung abgebremst und Energie frei, welche wiederum mit anderen Anteilen der Materie interagieren kann (56). Die Wechselwirkung von Strahlung und Materie ist unselektiv. Das heißt, sie wird nicht automatisch zu einem bestimmten Ziel gelenkt (52). Bei sich teilenden Zellen ist der Ort, der durch Strahlung moduliert wird, essenziell. So zeigt sich auf Zellebene ein größerer Schaden, wenn der Zellkern mit der DNA getroffen wird. Im Vergleich dazu ist der Schaden eher reparabel, wenn andere Organellen getroffen werden. Besonders interessant ist auch, dass nicht die Dosis ausschlaggebend ist, mit der einzelne Organellen bestrahlt werden. Zellkerne, die nur mit einer geringen Dosis bestrahlt werden, haben trotzdem einen größeren Schaden für den Organismus zur Folge als höhere Dosen, die auf die übrigen Zellorganellen gerichtet werden (52).

In den meisten Fällen kommt es durch Regulationsmechanismen zum selbstinduzierten Zelltod, der Apoptose. Wenn nur wenige Zellen eines Zellverbands betroffen sind, bleibt deren Untergang für den Organismus ohne größere Folgen. Der Vorgang der Apoptose ist physiologisch und kommt immer wieder im Organismus vor. Sie bildet einen natürlichen Schutz vor Fehlbildungen und daraus resultierenden Fehlfunktionen. Sind allerdings viele Zellen eines Organs oder ganze Organismen betroffen, hat der Untergang größere Folgen. Es kommt nicht nur zur Apoptose, sondern auch zur Nekrose. Die Nekrose geht mit einer Entzündungsreaktion einher und kann sogar eine Sepsis zur Folge haben. Ein Absterben vieler Zellen eines Organs bedeutet, dass dessen Funktion eingeschränkt bis eingestellt wird. Für den Organismus kann das letale Auswirkungen haben (52).

3.2.11 Krebsentstehung

Abgesehen vom selbstinduzierten Zelltod kann es auch zur Entartung von Zellen kommen. Die Krebsentstehung, auch Karzinogenese, folgt einer Mehrschritt-Hypothese. Zu Beginn wird durch einen äußeren Einfluss, zum Beispiel durch Strahlung, ein DNA-Schaden initiiert. Darauf folgt eine Promotion, bei der der Defekt weitergegeben wird. Die anschließende Progression beinhaltet die Weitervermehrung von entarteten Zellen. Schlussendlich kommt es zur Entstehung eines Tumors (60).

DNA-Schädigungen entstehen durch Veränderungen der Protoonkogene, der Tumorsuppressorgene und der apoptoseregulierenden Gene. Protoonkogene sind für die Zellteilung und Zelldifferenzierung verantwortlich. Sie regulieren die Teilungsrates der Zellen, indem sie für Proteine kodieren, die den Zellzyklus modulieren. Kommt es nun zur Schädigung dieser Protoonkogene, entstehen Onkogene. So kommt es zu einer vermehrten Expressierung von Wachstumsfaktoren und Signalproteinen. Diese führen zu einem übersteigerten Wachstumsreiz und somit zum Tumorwachstum (60).

Tumorsuppressorgene hingegen sind Antionkogene und schränken die Proliferation der Zelle ein. Entstehen Schäden in diesen Genen, kann ihre Überwachungs- und Modulierungsfunktion verloren gehen. Das bekannteste Tumorsuppressorgen des Menschen ist das Gen p53. Dieses Gen wird auch Wächter des Genoms genannt und hat eine Schlüsselfunktion in Bezug auf die Überprüfung eines Zellgenoms nach der Zellteilung. Wird ein Genomschaden durch p53 erkannt, wird die Apoptose der Zelle eingeleitet. Bei bis zu 50 Prozent der Tumoren kann eine Fehlfunktion des p53 nachgewiesen werden (61).

Auch Apoptose-regulierende Gene tragen, wenn sie beschädigt werden, zur Bildung von malignen Tumoren bei. Apoptose-regulierende Gene sorgen für eine bestimmte Lebenszeit einer Zelle. Ist die Zelle alt, wird sie durch die Apoptose eliminiert. Entartet nun das Gen für diesen natürlichen Mechanismus, wird die Zelle nicht mehr auf natürliche Weise aussortiert und proliferiert weiter (62).

Für die Exposition mit niedrigen Strahlendosen steht nicht in erster Linie die DNA-Schädigung im Vordergrund. Im Bereich der Niedrig-LET-Strahlung sind vor allem modulierende Faktoren ausschlaggebend, die den Zellzyklus mitregulieren und so auch Einfluss auf die Zellteilung haben (3). In Bezug auf das fliegende Personal, welches

verhältnismäßig niedrigen Expositionen ausgesetzt ist, sind diese zellzyklusmodulierenden Faktoren relevant für das Lebenszeitrisko, an Krebs zu erkranken (3).

3.2.12 Wie gefährlich ist ionisierende Strahlung?

Krebserkrankungen sind vielfältig und ihre Entstehung kann durch zahlreiche Faktoren beeinflusst werden. Es ist allgemein bekannt, dass ionisierende Strahlung einen Beitrag zur Karzinogenese leistet. Ab welcher Dosis eine Zelle Schaden nimmt und es zur Entartung kommt, ist eine bisher nicht befriedigend geklärte Frage (63).

Wie bereits zuvor beschrieben, gehören Schäden, die zu Krebserkrankungen führen, zu den stochastischen Strahlenschäden. Das bedeutet, dass es keine definierte Schwellendosis für diese Art von Strahlungsschäden gibt. Diese Art von Schäden folgt der Linear-Non-Threshold-Theorie (58).

Es gibt zahlreiche Studien, die die Auswirkungen ionisierender Strahlung auf den Menschen untersuchen (64, 65). Besonders beruflich exponierte Personengruppen sind von Interesse in zahlreichen Studien. Diese Studien beschäftigen sich nicht nur mit der Krebsrate, sondern auch mit teratologischen Strahlungsfolgen und systemischen Auswirkungen auf biologische Organismen.

Um die Auswirkungen von Niedrig-LET-Strahlung, beziehungsweise stochastischer Strahlungswirkung mit statistischer Signifikanz einschätzen zu können, wären sehr große Kohorten an Probanden notwendig. Beispielsweise wäre für die Einschätzung der Strahlenwirkung mit einer Energie von 100 mSv eine Kohorte von 50 000 Probanden notwendig (50). Da die Exposition auf Flughöhen erwartungsgemäß weitaus niedriger ausfällt, wären unwahrscheinlich große Kohorten vonnöten. Dennoch lassen sich Anhaltspunkte aus den vorhandenen Studien beobachten.

3.2.13 Krebsmortalität des fliegenden Personals

Die Krebsrate des fliegenden Personals ist grundsätzlich nicht erhöht im Vergleich mit der Allgemeinbevölkerung (3). Es konnten in manchen Studien sogar verringerte Krebsraten in Bezug auf manche Krebserkrankungen festgestellt werden (3).

Auffällig ist allerdings die Inzidenzrate für maligne Melanome, für die in einigen Studien eine erhöhte Rate festgestellt wurde. Da maligne Melanome vor allem mit einer erhöhten UV-Strahlungsbelastung assoziiert sind (66), wurden einige Messungen an Bord

von Flugzeugen durchgeführt, um eine Einschätzung hinsichtlich der UV-Exposition während des Fliegens zu erlangen (67). Weitere Risikofaktoren für die Entstehung von malignen Melanomen sind ein heller Hauttyp und häufiges Sonnenbaden (66). Weitere Informationen sind im Kapitel 3.2.14 „Ultraviolette Strahlung“ zu finden.

In Bezug auf andere Krebserkrankungen wird der Healthy Worker Effekt diskutiert, welcher in Korrelation mit der geringen allgemeinen Krebsrate für fliegendes Personal steht (68). Dieser Effekt steht in Zusammenhang mit einer grundsätzlich hohen Arbeitszufriedenheit unter fliegendem Personal, welche auch mit einer geringeren Erkrankungsrate assoziiert ist (68).

Unzureichend geklärt ist die Rolle ionisierender und damit auch kosmischer Strahlung in Bezug auf Gehirntumore und weitere Hautkrebsarten neben malignen Melanomen (3). Nicht alle Formen von Krebs haben die gleichen Risikofaktoren, die ihre Entstehung begünstigen. So sind auch nicht alle Krebsarten mit Strahlung assoziiert. Tumore der Schilddrüse sowie Mamma- und Prostatakarzinome sind typische Tumore, die durch Strahlung entstehen können (60).

Zirkadiane Rhythmusunterbrechungen im Rahmen von Schichtarbeit und das Durchfliegen vieler Zeitzonen werden als potenzieller Risikofaktor diskutiert. Ausreichende Studien zu diesem Thema stehen derzeit noch aus (3).

3.2.14 Ultraviolette Strahlung

Neben kosmischer Strahlung gehört auch die UV-Strahlung zum Spektrum in Flughöhen. Ihre Intensität ist analog zur kosmischen Strahlung ebenfalls abhängig von der Höhe und vom Breitengrad (67). UV-Strahlung hat eine Wellenlänge von 100 nm bis 400 nm und wird in drei Subtypen untergliedert. Die Typen UV-A (400-315 nm), UV-B (315-280 nm) und UV-C (280-100 nm) werden in den meisten Studien zur UV-Strahlung untersucht. Die Wellenlänge hat Einfluss auf die Eindringtiefe der Strahlung. UV-Strahlung mit geringerer Energie hat besonders viel Einfluss auf die Entstehung maligner Melanome. Da UV-C-Strahlung von der Erdatmosphäre größtenteils abgeschirmt wird, korreliert UV-B-Strahlung am stärksten mit der Inzidenz maligner Melanome (69).

In einigen Studien zur Untersuchung der Krebserkrankungen bei fliegendem Personal wurde auch die Prävalenz maligner Melanome untersucht. In einer Meta-Analyse zu

diesem Thema wurde aus einem Pool von 19 Studien mit 266431 Probanden ein Inzidenzverhältnis von 2,21 für fliegendes Personal gefunden. Das bedeutet, dass 2,21-mal mehr Menschen mit einer fliegerischen Tätigkeit an einem malignen Melanom erkranken im Vergleich zu Menschen der Normalbevölkerung (70). In einer Vergleichsstudie, in der fliegendes Personal mit Bodenpersonal (Air Traffic Controllern) verglichen wurde, konnte bei beiden Gruppen eine im Vergleich zur Gesamtbevölkerung erhöhte Rate an Hautkrebs festgestellt werden. Allerdings wurde zwischen den beiden Gruppen kein Unterschied festgestellt (68).

In einer Studie zu Hautkrebserkrankungen bei Atombombenüberlebenden konnte bisher keine Evidenz dafür gefunden werden, dass ionisierende Strahlung in direktem Zusammenhang mit malignen Melanomen steht (71,72).

Wie kommt es nun zu der erhöhten Rate an malignen Melanomerkrankungen in der Gruppe fliegenden Personals? Um diese Frage zu beantworten, wurden Messungen von UV-Strahlungen innerhalb von Flugzeugen im Reiseflug durchgeführt. In der Kabine wird im Normalfall vernachlässigbar wenig UV-Strahlung gemessen. Im Cockpit, welches durch seine großen Fenster der meisten Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist, wurde in manchen Fällen eine leichte UV-Einstrahlung gemessen, welche in direktem Zusammenhang mit den verbauten Cockpitfenstern stand (73).

Obwohl der Einfluss der UV-Strahlung nicht vernachlässigt werden darf, weisen einige Faktoren auf andere Ursachen für eine höhere Erkrankungsrate für Hautkrebs hin. Derzeit wird vor allem häufiges Sonnenbaden an Orten mit hoher Sonneneinstrahlung, verbunden mit einem hellen Hauttyp, als Grund für eine erhöhte Melanomrate diskutiert (66). Auch zirkadiane Rhythmusunterbrechungen und eine damit verbundene Störung des Melatoninhaushalts stehen im Verdacht, zur Karzinogenese beizutragen (74).

3.2.15 Katarakte

Die Entstehung von Katarakten wird im Strahlenschutz sehr häufig diskutiert und auch in einigen Studien untersucht. Katarakte sind durch die Trübung der Augenlinse charakterisiert (75). Aus diesem Grund wurde durch die ICRP ein Dosisgrenzwert für beruflich exponierte Personen von 150 mSv/Jahr festgelegt.

Statistisch gesehen entwickeln besonders Menschen im hohen Alter Katarakte. So kann angenommen werden, dass durch das Aufsummieren von Schäden es zur schlussendlichen Krankheit kommt (76).

Im Strahlenschutz werden Katarakte zu den deterministischen Schäden gezählt. So unterliegt die Bildung von Katarakten einer Schwellendosis, die bei ungefähr 500 mSv angenommen wird (77). In der zivilen Luftfahrt wird dieser Schwellenwert im Normalfall nicht erreicht, dennoch gibt es Untersuchungen, ob die berufliche Strahlendosis im Laufe des Arbeitslebens zu einer erhöhten Inzidenz an Katarakten führt (78, 79). Bisherige Untersuchungen wurden in ihrer Aussagekraft durch unzureichendes Studiendesign, wie zum Beispiel die gewählte Populationsgröße, stark eingeschränkt (80). Repräsentative Ergebnisse stehen derzeit noch aus.

3.2.16 Teratologie

Der Begriff Teratologie beschreibt das Auftreten abnormaler Veränderungen in sich entwickelnden Organismen (81). Die Strahlung in Flughöhen gehört zu den exogenen Teratogenen. Das heißt, sie wirkt durch äußere Einflüsse auf den Organismus (81).

Strahlung ist in der Lage, Schäden in Organismen zu induzieren, die sich unter anderem in der Entstehung von Krebserkrankungen und Fehlbildungen äußern. In der Entwicklung befindliche Organismen reagieren deutlich sensibler auf Strahlung, so auch auf die Auswirkungen kosmischer Strahlung. Dieses Phänomen lässt sich durch den großen Anteil sich teilender und differenzierender Zellen erklären. Somit haben ungeborene Kinder ein deutlich erhöhtes Risiko für Fehlbildungen im Vergleich zu Erwachsenen (82, 83).

Teratogene Schäden werden zu den stochastischen Schäden gezählt und folgen gemäß der Linear-Non-Threshold Theorie keiner Schwellendosis (49). So ist nicht auszuschließen, dass bereits bei geringen Strahlungsdosen, wie in Flughöhen, Schäden auftreten können (49).

Es ist nachvollziehbar, dass es aus ethischen Gründen keine Versuche an Schwangeren und deren ungeborenen Kindern in Bezug auf Strahlungsschäden gibt. Oftmals wird auf Case Reports, Studien mit Atombombenüberlebenden und Tiermodelle zurückgegriffen, um eine Einschätzung der Strahlenwirkung auf in der Entwicklung befindliche Organismen zu untersuchen.

In Tierversuchen mit Mausembryonen wurden teratogene Schäden nach Exposition mit einer Dosis mit einer ungefähren Energie von 6 MeV ab 0,25 Gy mit Röntgenstrahlung und 0,12 Gy schneller Neutronen gefunden. Tödliche Effekte für den

Mäuseembryo wurden in dieser Versuchsreihe allerdings bereits schon ab 0,2 Gy Niedrig-LET-Strahlung beobachtet (57). In Studien konnte für den Menschen Evidenz für Strahlungsschäden bei Langzeitexpositionen zwischen 50 mSv und 100 mSv und akuten Expositionen zwischen 10 mSv und 50 mSv gefunden werden (50).

Teratogene Auswirkungen auf Embryonen folgen in den meisten Fällen einer „Alles-oder-Nichts“-Regel. So kommt es eher zum Tod des Ungeborenen als zu Missbildungen, da Schäden detektiert, aber nicht repariert werden (57). Dieses Phänomen trifft vor allem für die Präimplantationsphase zu, in der sich der Embryo noch nicht in der Gebärmutterwand eingenistet hat. Nach Implantation in die Gebärmutterwand ist der Embryo besonders sensitiv gegenüber Strahlung. Es kann zu Gehirnschäden, Wachstumsschäden und Missbildungen kommen (3). Besonders während der Organentwicklung, welche bereits acht Tage nach Konzeption beginnt, können neurologische Fehlbildungen und Fehlbildungen der Augen bei Expositionen mit 50 mGy beobachtet werden. In der Fetalphase korrelieren Organschäden mit einer Dosis von 300 mGy (3).

Im normalen Flugbetrieb wird das fliegende Personal keinen solch hohen Expositionen ausgesetzt. Dennoch gehören teratologische Schäden zu den stochastischen Schäden und sind daher auch ohne Schwellendosis möglich. Aus diesem Grund wurde für gebärfähige Frauen des fliegenden Personals ein Grenzwert eingeführt, der ungeborenes Leben schützen soll (siehe auch Kapitel 3.3 „Rechtlicher Kontext“) (49).

3.3 Rechtlicher Kontext

Der rechtliche Kontext in Deutschland in Bezug auf den betrieblichen Strahlenschutz beruht auf wissenschaftlich begründeten Empfehlungen, die von internationalen Expertengremien veröffentlicht werden. Diese werden regelmäßig aktualisiert und an neue Erkenntnisse angepasst.

3.3.1 International Commission on Radiological Protection

Die International Commission on Radiological Protection (ICRP) gibt Empfehlungen zur Umsetzung verschiedener Strahlenschutzmaßnahmen, wie zum Beispiel zu Grenzwerten (77). Die ICRP beschreibt sich als eine unabhängige, international tätige non-profit-Organisation, die sich für den Schutz der Bevölkerung vor ionisierender Strahlungsschäden einsetzt (84). Sie besteht aus verschiedenen Expertengruppen, die sich mit den Themen Medizin, Dosis, Effekte und Anwendung beschäftigen (84). Für die zivile Luftfahrt relevant sind vor allem die Empfehlungen der ICRP 60 von 1990 und der ICRP 103 von 2007 (77,85). In der ICRP 60 wurde empfohlen, Personen, die durch kosmische Strahlung exponiert werden, als beruflich exponiert einzugruppieren. Ausgenommen von dieser Empfehlung sind Flugreisende und Vielflieger (85).

3.3.2 Gewebe-Wichtungsfaktoren

Wie bereits in vorherigen Kapiteln erwähnt, reagieren nicht alle Gewebe des menschlichen Körpers gleich sensitiv auf Strahlung. So wurden durch die ICRP Gewebe-Wichtungsfaktoren ermittelt, die die Empfindlichkeit verschiedener Organe gegenüber Strahlenexpositionen abbilden (Tabelle 4).

Tabelle 4: Gewebe-Wichtungsfaktoren (modifiziert nach (77))

Organ, Gewebe	Wichtungsfaktor
Keimdrüsen	0,04
Rotes Knochenmark	0,12
Dickdarm	0,12
Lunge	0,12
Magen	0,12
Blase	0,04
Brust	0,12
Leber	0,04
Speiseröhre	0,04
Schilddrüse	0,04
Haut	0,01
Knochenoberfläche	0,01
Speicheldrüsen	0,01
Übrige Organe, Gewebe	0,01
Gesamtsumme	1

3.3.3 Strahlungs-Wichtungsfaktoren

Die Art der Strahlung ist ebenfalls wichtig, um den jeweiligen Einfluss einer Exposition abschätzen zu können. In Tabelle 5 sind die von der ICRP empfohlenen Strahlungs-Wichtungsfaktoren dargestellt.

Tabelle 5: Strahlungs-Wichtungsfaktoren (modifiziert nach (77))

Strahlungsart	Wichtungsfaktor
Photonen und Gammastrahlung	1
Elektronen und Myonen	1
Neutronen	energieabhängig
Protonen und Pionen	2
Alphateilchen, Schwerionen, Spaltfragmente	20

3.3.4 International Civil Aviation Organization

Die International Civil Aviation Organization (ICAO) ist eine 1944 gegründete Organisation mit aktuell 193 Mitgliedsstaaten. Ihren Mitgliedstaaten liefert die ICAO aktualisierte Erkenntnisse in Bezug auf den Flugbetrieb auf internationaler Ebene (86). Dabei beschreibt sich die ICAO als Organisation, die Standardisierungsvorschläge veröffentlicht, aber hauptsächlich eine beratende Funktion für ihre Mitgliedsstaaten ausübt (86). In ihrer Veröffentlichung von 2018 beschreibt die ICAO die Notwendigkeit, auf eventuelle Auswirkungen durch solare Teilchenereignisse vorbereitet zu sein (87).

3.3.5 Rahmengesetzgebung der Europäischen Union

Die Gesetzgebung auf europäischer Ebene beruht auf der 1957 gegründeten Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM). Durch die EURATOM werden europaweite Richtlinien veröffentlicht, die dann auf die jeweilige Bundesebene überführt werden (88).

In der aktuellen Richtlinie 2013/59/EURATOM wird auf den Umgang mit kosmischer Strahlung in der zivilen Luftfahrt eingegangen (89).

3.3.6 Strahlenschutzgesetz und Strahlenschutzverordnung

Die Anwendung der EURATOM Richtlinien erfolgt auf Bundesebene durch die Überführung in das deutsche Strahlenschutzgesetz und die Strahlenschutzverordnung (34). Im Strahlenschutzgesetz sind Grenzwerte festgelegt. Die Strahlenschutzverordnung bezieht sich auf die Zuteilung der jeweiligen Zuständigkeit der beteiligten Instanzen (34).

Im Folgenden werden verschiedene Grenzwerte vorgestellt, die dem Strahlenschutzgesetz wörtlich entnommen sind.

§ 5 (7) Beruflich exponiert

„§ 5 (7) beruflich exponierte Person: Eine Person, die Expositionen aus Tätigkeiten erhalten kann, die

1. eine effektive Dosis im Kalenderjahr überschreitet
 2. eine Organ-Äquivalentdosis für die Augenlinse von 15 Millisievert überschreitet
- oder
3. eine Organ-Äquivalentdosis für die Haut, gemittelt über jede beliebige Hautfläche von 1 Quadratzentimeter, unabhängig von der exponierten Fläche, von 50 Millisievert im Kalenderjahr überschreitet (34).

§ 78 Grenzwerte für beruflich exponierte Personen

(1) Der Grenzwert der effektiven Dosis beträgt für beruflich exponierte Personen 20 Millisievert im Kalenderjahr. Die zuständige Behörde kann im Einzelfall für ein einzelnes Jahr eine effektive Dosis von 50 Millisievert zulassen, wobei in fünf aufeinander folgenden Jahren insgesamt 100 Millisievert nicht überschritten werden dürfen.

(2) Der Grenzwert der Organ-Äquivalentdosis beträgt für beruflich exponierte Personen

1. für die Augenlinse 20 Millisievert im Kalenderjahr,
2. für die Haut, gemittelt über jede beliebige Hautfläche von einem Quadratzentimeter, unabhängig von der exponierten Fläche, (lokale Hautdosis) 500 Millisievert im Kalenderjahr und
3. für die Hände, die Unterarme, die Füße und Knöchel jeweils 500 Millisievert im Kalenderjahr.

Für die Organ-Äquivalentdosis der Augenlinse gilt Absatz 1 Satz 2 entsprechend.

(3) Für beruflich exponierte Personen unter 18 Jahren beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis 1 Millisievert im Kalenderjahr. Der Grenzwert der Organ-Äquivalentdosis beträgt

1. für die Augenlinse 15 Millisievert im Kalenderjahr,
2. für die lokale Hautdosis 50 Millisievert im Kalenderjahr,
3. für die Hände, die Unterarme, die Füße und Knöchel jeweils 50 Millisievert im Kalenderjahr.

Abweichend davon kann die zuständige Behörde für Auszubildende und Studierende im Alter zwischen 16 und 18 Jahren einen Grenzwert von 6 Millisievert im Kalenderjahr für die effektive Dosis und jeweils 150 Millisievert im Kalenderjahr für die Organ-Äquivalentdosis der Haut, der Hände, der Unterarme, der Füße und Knöchel zulassen, wenn dies zur Erreichung des Ausbildungszieles notwendig ist.

(4) Bei gebärfähigen Frauen beträgt der Grenzwert für die Organ-Äquivalentdosis der Gebärmutter 2 Millisievert im Monat. Für ein ungeborenes Kind, das auf Grund der Beschäftigung der Mutter einer Exposition ausgesetzt ist, beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis vom Zeitpunkt der Mitteilung über die Schwangerschaft bis zu deren Ende 1 Millisievert.

(5) Die Befugnis der zuständigen Behörde nach der Rechtsverordnung nach § 79 Absatz 1 Satz 2 Nummer 1 unter außergewöhnlichen, im Einzelfall zu beurteilenden Umständen, zur Durchführung notwendiger spezifischer Arbeitsvorgänge Expositionen zuzulassen, die von den Grenzwerten der Absätze 1 und 2 und Absatz 4 Satz 1 abweichen, bleibt unberührt.“

(wörtlich zitiert aus (34))

3.4 Flugbetriebliche Hintergründe

Für die Durchführung eines Fluges stehen der Flugzeugbesatzung verschiedene Informationen zur Verfügung. Hierbei spielen vor allem Wetterverhältnisse, Flugrouten und die technischen Eigenschaften des verwendeten Flugzeuges eine große Rolle. Weitere große Faktoren sind die Beladung, die Passagierzahl und die Berechnung der Treibstoffmenge. Diese Informationen werden durch verschiedene Instanzen zusammengetragen und in einen Kontext gebracht.

3.4.1 Flugdurchführung

Wichtig für die Flugdurchführung ist die enge Zusammenarbeit der beteiligten Parteien. Ohne eine präzise und möglichst direkte Informationsweitergabe wäre die reibungslose Flugdurchführung nicht möglich.

Cockpitpersonal

Das Cockpitpersonal, bestehend aus zwei bis drei Piloten, ist für die praktische Umsetzung der zuvor zusammengetragenen Informationen und Arbeitsanweisungen zuständig. Sie bringen Flugzeug, Passagiere und/oder die Fracht an das Ziel.

Fluglotsen

Für die Koordination und Überwachung des Flugverkehrs sind Fluglotsen zuständig. Sie sind entweder für verschiedene Lufträume verantwortlich oder für die Koordination des Flugverkehrs im direkten Umfeld und an den jeweiligen Flughäfen.

Dispatcher

Im Gegensatz zu Fluglotsen haben Dispatcher von der Flugbetriebsseite der jeweiligen Airline einen Einfluss auf die Flugdurchführung vom Boden aus. Flugrouten folgen nicht immer standardmäßig vorgegebenen Wegen. Zum Beispiel können Wetterverhältnisse Anpassungen der Flugrouten notwendig machen. Auch kann die Cockpitbesatzung im Zweifelsfall Kontakt zu Dispatchern aufnehmen und in Zusammenarbeit eine möglichst optimale Anpassung der Route entwickeln.

Flugroute

Für die Flugdurchführung essenziell ist die Planung der Flugroute. Es gibt verschiedene Kriterien, anhand derer die Route festgelegt wird. Diese Kriterien werden für Kurzstreckenflüge und für Langstreckenflüge abweichend definiert. Auf internationalen Langstreckenflügen ist die Flugrichtung nach Osten oder nach Westen relevant. Zur Überquerung des Atlantiks wurden die North Atlantik Flight Tracks entwickelt. Sie entstanden aus einer gemeinsamen Entwicklung verschiedener internationaler Luftverkehrssicherungen. Diese Flighttracks sind vergleichbar mit einem Straßennetz, welches von Europa nach Nordamerika reicht (90). Ist ein Track für eine bestimmte Abflugposition nicht verfügbar, können sogenannte Random Tracks verwendet werden. So ist es möglich, dass ein Flugzeug sich zwar an den Flighttracks orientiert, aber auch von ihnen abweicht. Hierbei ist nicht nur die Wahl des jeweiligen Tracks entscheidend, sondern vor allem auch flugzeugspezifische und international gültige Abstands- und Höhenregelungen spielen eine Rolle. Zum Beispiel ist auf internationaler Ebene geregelt, dass ein Flugzeug zu einem anderen Flugzeug einen bestimmten Abstand halten muss, welcher nicht nur von der horizontalen Distanz, sondern auch von der vertikalen Distanz abgängig ist. Im Bereich der Flight Tracks wird beispielsweise ein seitlicher Mindestabstand von 46 km (23 NM) vorgeschrieben (90). Diese Abstände variieren im Bereich von Flughäfen. Im Luftraum von New York ist beispielsweise das Flugverkehrsaufkommen so groß, dass die Abstände nicht eingehalten werden können. Daher werden zusätzliche Navigations- und Kommunikationssysteme erforderlich. Die meisten Flüge von Osten nach Westen starten am Vormittag. Gegenläufig starten Flüge von Westen nach Osten gegen Abend. Aus diesem Grund kommt es zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen während dieser Stoßzeiten. Grund dafür sind Nachtflugbestimmungen und die Nutzung günstiger Anschlussflugzeiten (90).

Auf internationalen Flügen nach Osten werden die Routen nicht entsprechend den Flugrouten nach Westen geplant. Hier werden individuellere Routen gewählt, die in Berücksichtigung politischer Situationen Lufträume meiden oder größere Gebirgsketten wie den Himalaya an günstigen Stellen überqueren.

Für die Flugdurchführung in Abhängigkeit der Route ist die Berechnung der benötigten Treibstoffmenge eine notwendige Flugvorbereitung. Es wird nicht nur die Treibstoffmenge für die Bewältigung der jeweiligen Strecke festgelegt. Wichtige weitere Parameter, die in die Bestimmung der Treibstoffmenge einfließen, sind außerdem Wetterverhältnisse, das Flugverkehrsaufkommen und die Entfernung zu Ausweichflughäfen.

Neben den reinen Streckenparametern fließt in die Berechnung der benötigten Treibstoffmenge auch die Beladung des Flugzeuges ein. Es ist nur logisch, dass ein voll beladener Airbus A380 deutlich mehr Treibstoff benötigt im Vergleich zu einem nur zur Hälfte beladenen A340.

3.4.2 Informationssysteme

Die International Civil Aviation Organisation (ICAO) verlangt den Einbau verschiedener Informationssysteme in Verkehrsflugzeugen. Neben verschiedenen Funkmöglichkeiten bestehen auch Einbauten, die den schriftlichen Datenaustausch möglich machen. Funkmöglichkeiten basieren vor allen auf VHF-Funk (very high frequency) und HF-Funk (high frequency). Schriftliche Mitteilungen können über das Aircraft Communications and Reporting System (ACARS) übermittelt werden.

Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS)

Das Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS) ist ein in den 1970er Jahren entwickeltes Informationssystem, welches heute in fast jedem in der zivilen Luftfahrt genutzten Flugzeug eingebaut ist. ACARS ermöglicht den Datenaustausch sowohl zwischen Flugzeugen untereinander sowie die Kommunikation mit den Bodenstationen.

Zur Kommunikation wird hauptsächlich der VHF-Datenfunk (very high frequency -Datenfunk) verwendet. In Regionen, in denen der VHF-Datenfunk nicht verfügbar ist, wie zum Beispiel über dem Atlantik oder der Arktis, wird über den teureren Satellitenfunk (SATCOM) und über HF-Funk kommuniziert.

Neben der aktiven Kommunikation durch die Flugzeugbesatzung und die Bodenstationen senden die meisten Kommunikationssysteme automatisch über ACARS in regelmäßigen Zeitabständen Informationen zu Fluggeschwindigkeit, Flughöhe und der geplanten Flugrichtung an die Bodenstationen. Sogar das Anlassen und Abstellen der Triebwerke an der Parkposition kann den Flugbetrieben der jeweiligen Fluggesellschaften automatisch über ACARS übermittelt werden. Neben der Fluggesellschaft werden auch Informationen zum technischen Zustand des Flugzeugs über ACARS an die Hersteller der Flugzeuge übermittelt und tragen somit zum Qualitätsmanagement bei.

Notice To Airmen NOTAM (NOTAM)

Vor Beginn eines Fluges wird der Besatzung ein Briefingpaket zur Verfügung gestellt, welches Informationen zum aktuellen Wetter, der Flugroute und den streckenspezifischen Besonderheiten enthält. Teil dieses Pakets sind auch die relevanten Notices to Airmen (NOTAMs). Sie geben Informationen zu dauerhaft bestehenden Streckenbesonderheiten und auch zu kurzfristigen Änderungen. Beispielsweise wäre die kurzzeitige Schließung einer Landebahn am Zielflughafen eine kurzfristige Änderung, die den Piloten über eine NOTAM zur Verfügung gestellt wird (91). Langfristige Besonderheiten könnten beispielsweise VHF-Funkausfälle (very high frequency-Funkausfälle) über der Arktis sein, die dort über längere Zeiträume bestehen. NOTAMs werden aus den Aeronautical Information Publications (AIP) zusammengestellt. Besteht eine Besonderheit länger als drei Monate, wird sie in die AIP aufgenommen. Besteht eine Besonderheit kürzer als drei Monate, wird sie nur in den NOTAMs beschrieben (91).

Die Notice to Airmen wurden ursprünglich in der Seefahrt genutzt und nannten sich dort Notice to Mariners. Sie halfen den Seefahrern auf hoher See zu navigieren und bekannten Hindernissen auszuweichen. Besondere Formen der NOTAMs existieren im Falle von Vogelschlägen, Schneefall und Ereignissen mit vulkanischer Asche (91). In Deutschland werden die NOTAMs durch die Deutsche Flugsicherung zusammengetragen und den Fluggesellschaften zur Verfügung gestellt. Informationen zu Start, Reiseflug, Ausweichflughäfen und Zielflughafen sind Teil dieser NOTAMs (91).

4. Material und Methoden

Für den Umgang mit erhöhten Strahlenexpositionen durch solare Teilchenereignisse sind zur Entwicklung von Handlungsoptionen nicht alle beteiligten Aspekte ausreichend untersucht. Einen Beitrag hierfür soll diese Arbeit leisten.

Es werden eingangs zwei Fragestellungen mit Hilfe von Literaturrecherchen beantwortet. Es wird so ein Bezug auf die medizinischen Auswirkungen von Strahlung auf menschliches Gewebe hergestellt.

Anschließend wird der Verlauf verschiedener Ground Level Enhancements untersucht, um eine mögliche Vorhersagbarkeit des Verlaufs erhöhter Strahlungsbeiträge zu ermöglichen.

4.1 Systematische Literaturrecherche

Um die Problemstellung zu bearbeiten, sollen zunächst mit Hilfe einer systematischen Literaturrecherche konkrete Fragen beantwortet werden.

4.1.1 Fragestellung

Fragestellung 1: Wie hoch ist die Exposition des ungeborenen Kindes während des Fliegens?

Für die Entwicklung geeigneter Schutzmaßnahmen ist es notwendig, die Höhe der Strahlenexposition eines Ungeborenen zu erfassen. Auch kann so ein eventueller schützender Einfluss des mütterlichen Gewebes evaluiert werden. Außerdem können mögliche Annahmen in Bezug auf die Exposition von Ungeborenen für den Fall erhöhter Strahlungsbeiträge durch Sonnenstürme erhoben werden.

Fragestellung 2: Welche Auswirkungen hat ionisierende Strahlung auf Embryo und Fetus?

Neben der Höhe der erwartbaren Exposition des Ungeborenen ist die Art und Weise der Auswirkung von Interesse. Die Fragestellung ist definiert worden, um die unterschiedlichen Auswirkungen in Abhängigkeit von der Relevanz der Dosis festzustellen.

4.1.2 Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA)

Die Beantwortung der Fragestellungen wird durch eine Literaturrecherche in Anlehnung an vorgegebene Kriterien durchgeführt. Dafür hat sich die Orientierung am Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) Schema als geeignet erwiesen (92).

Anhand der PRISMA-Richtlinien können systematische Literaturrecherchen durchgeführt werden. Die PRISMA-Richtlinien umfassen mehrere Elemente, die in einem systematischen Review oder einer Metaanalyse berichtet werden sollten. Inhalte des PRISMA Schemas sind:

1. Fragestellung: Die Formulierung einer präzisen Fragestellung für die systematische Literaturrecherche steht am Anfang der Recherche.
2. Festlegung von Einschluss- und Ausschlusskriterien: Anschließend folgt die Festlegung von Kriterien, um relevante Studien zu identifizieren und irrelevante Studien auszuschließen.
3. Systematische Suche: Die Durchführung einer systematischen Suche nach relevanten Studien in verschiedenen Datenbanken, einschließlich Pubmed/Medline und der Cochrane Library, erfolgt im nächsten Schritt. Wichtig hierbei sind die Dokumentation der Suchstrategie und die Dokumentation der Anzahl der gefundenen Studien.
4. Titel- und Abstract-Screening: Das Durchsuchen der Titel und Abstracts aller gefundenen Studien ist notwendig, um irrelevante Studien auszuschließen. Für eine vollständige Suche erfolgt auch die Dokumentation des Grunds, weshalb eine Studie ausgeschlossen wurde.
5. Volltext-Screening: Das Screening des Volltexts der verbleibenden Studien erfolgt im letzten Schritt des Screening-Prozesses, um zu entscheiden, ob die Einschlusskriterien erfüllt werden können. Auch hier ist die Dokumentation im Falle eines Ausschlusses Teil des Screenings.
6. Datenextraktion: Die Extraktion relevanter Informationen aus den eingeschlossenen Studien, einschließlich Studienmerkmalen, Teilnehmermerkmalen, Interventionsmerkmalen und Ergebnissen erfolgt in der Datenextraktion.

7. Qualitätsbewertung: Die Qualitätsbewertung der eingeschlossenen Studien anhand von Bewertungsinstrumenten wie dem Cochrane Risk of Bias Tool (93), sofern auf die Studie anwendbar, wird anschließend durchgeführt.
8. Datenanalyse: Die Durchführung der Datenanalyse, um die Ergebnisse der eingeschlossenen Studien zusammenzufassen, erfolgt mit Hilfe einer tabellarischen Darstellung.

4.1.3 Datenbanken

Im durchgeführten Review wurden die Datenbanken der Cochrane Library, Web of Science und Pubmed/Medline durchsucht. Mit einer Handsuche wurde anschließend Google Scholar zur Detektion weiterer relevanter Quellen genutzt.

4.1.4 Einschlusskriterien

Fragestellung 1: Wie hoch ist die Exposition des ungeborenen Kindes während des Fliegens?

Um die Fragestellung zu beantworten, wurden Einschlusskriterien definiert, anhand derer die Quellen auf Relevanz überprüft wurden. Als relevant gelten Quellen, deren Inhalt sich grundsätzlich auf die Strahlungsexposition in Flughöhen bezieht oder auf diese übertragbar ist. Die untersuchten Strahlungsarten müssen auf das Strahlungsspektrum in Flughöhen Einfluss haben. Als nächstes Kriterium wurde untersucht, ob die gefundenen Daten Aufschluss über die Exposition ungeborenen Lebens geben oder auf dieses übertragbar sind. In einigen Quellen wird die Uterusdosis der Mutter auf die Dosis für das ungeborene Kind übertragen. Hierbei handelt es sich um eine näherungsweise Annahme (94,95). Im letzten Schritt wurde untersucht, ob aus den untersuchten Daten eine Dosis für das ungeborene Leben zu extrahieren ist. Da Neutronenstrahlung einen großen Einfluss auf die Exposition in Flughöhen hat (3), sind Studien, die sich auf die Dosis durch Neutronenstrahlung beziehen, von besonders großem Interesse.

1. Bezieht sich die Exposition auf Flughöhen?
2. Werden in Flughöhen relevante Strahlungsarten untersucht?
3. Bezieht sich die Exposition auf ungeborenes Leben?
4. Wird eine Dosis angegeben?

Fragestellung 2: Welche Auswirkungen hat ionisierende Strahlung auf Embryo und Fetus?

Für die zweite Fragestellung wurden eigene Einschlusskriterien definiert. Auch hier werden die Quellen dahingehend untersucht, ob sich die untersuchte Exposition auf die Exposition in Flughöhen bezieht oder übertragen lässt. Um die gefundenen Quellen der zahlreichen Untersuchungen in Bezug auf die generellen Gesundheitsrisiken für fliegendes Personal abzugrenzen, wurden die Publikationen auf die Relevanz für die Exposition von gebärfähigen Frauen untersucht. Auch wurden Studien eingeschlossen, die sich mit der Exposition von ungeborenem Leben beschäftigen. Von Interesse für die Beantwortung der Fragestellung 2 sind Studien zu teratogenen Effekten durch ionisierende Strahlung. Sind die zuvor genannten Kriterien erfüllt, wird untersucht, ob aus den Daten Schwellenwerte ablesbar sind. Strahlenschäden sind in niedrigen Dosisbereichen vor allem stochastische Effekte ohne Schwellendosis, dennoch ist eine Korrelation zwischen Dosis und Effekt ein untersuchenswertes Kriterium. Auch hier ist in Bezug auf die Dosis besonders die Dosis durch Neutronenstrahlung von Interesse.

1. Bezieht sich die Exposition auf Flughöhen?
2. Kann die Studie auf die Exposition in Flughöhen übertragen werden?
3. Bezieht sich die Auswirkung auf die Exposition von Schwangeren?
4. Bezieht sich die Auswirkung auf die Exposition eines ungeborenen Kindes (Embryo/Fetus)?
5. Bezieht sich die Auswirkung auf teratogene Effekte?
6. Werden die Auswirkungen von Neutronenstrahlung erfasst?
7. Ab welcher Dosis wird ein Effekt vermutet?

4.1.5 Ausschlusskriterien

Fragestellung 1: Wie hoch ist die Exposition des ungeborenen Kindes während des Fliegens?

Ausgeschlossen wurden, gemäß den PRISMA-Kriterien, Systematic Reviews und Meta-Analysen, da diese Studien Sekundärdaten bereitstellen und keine direkte Untersuchung der Exponierten wiedergeben. Es wurden außerdem Publikationen ausgeschlossen, die sich nicht mit der Exposition durch für in Flughöhen relevante Strahlung beschäftigen.

1. Systematic Reviews und Meta-Analysen
2. In Flughöhen irrelevante Strahlungsarten

Fragestellung 2: Welche Auswirkungen hat ionisierende Strahlung auf Embryo und Fetus?

In den Ausschlusskriterien für die zweite Fragestellung wurde analog zu denen der ersten Fragestellung der Ausschluss von Systematic Reviews und Meta-Analysen definiert. Auch stammen viele Annahmen zur Wirkung von ionisierender Strahlung auf menschliche Embryonen und Foeten aus Beobachtungen, die in Tierversuchen erhoben wurden. Das gibt zwar einen näherungsweisen Hinweis auf die Effekte, die auch in menschlichen Geweben zu erwarten sind, dennoch sind vor allem die anatomischen Gegebenheiten abweichend. Daher wurden für die durchgeführte Untersuchung Studien, die sich mit Tierversuchen beschäftigen, ausgeschlossen. Aus ethisch nachvollziehbaren Gründen gibt es wenige klinische Studien zur Auswirkung von Strahlung auf ungeborenes Leben. Die meisten vorhandenen Daten stammen aus Tierversuchen, Überlebenden der Atombombenabwürfe und Fallstudien. Da Fallstudien keinen ausreichenden Hinweis auf die generell zu erwartende Wirkung auf menschliches Gewebe liefern, wurden auch diese Studien nicht in die finale Datenextraktion aufgenommen.

1. Systematic Review
2. Tierversuche
3. Case Reports

4.1.6 Suchbegriffe

Die Festlegung der verwendeten Suchbegriffe wurde mit Hilfe von MeSH Terms, Schlüsselwörtern und Synonymen schrittweise verfeinert. Zu Beginn wurden viele verschiedene Begriffe mit den gängigen Operatoren wie „AND“, „OR“ und „NOT“ probeweise kombiniert und Beispielsuchen angelegt. Als Zielgröße wurden für die erste Fragestellung 200 Treffer definiert und für die zweite Fragestellung 2000 Treffer. Die Zielgrößen resultieren aus der erwartungsgemäßen Frequenz, mit der die Themen, auf die sich die Fragestellung bezieht, bereits durch andere Forschungsgruppen untersucht wurden. Wurden zu viele oder zu wenige Treffer gefunden, wurde die Suche angepasst. Schlussendlich wurde eine weit aufgestellte Suchstrategie mit den im Folgenden beschriebenen Suchbegriffen durchgeführt. Die Suchbegriffe wurden durch den Operator „AND“ verknüpft.

Suchbegriffe Fragestellung 1

„Radiation“, „Aviation“, „Dose“, „Pregnant“

Die Suchbegriffe wurden trunkiert, um die Suche noch breiter aufzustellen. So wurde nach den Begriffen „Radiat*“, „Aviat*“, „Dose“ und „Preg*“ gesucht.

Suchbegriffe Fragestellung 2

„Radiation“, „Crew“, „Dose“

Auch hier wurden die Suchbegriffe trunkiert. So wurde nach den Begriffen „Radiat*“, „Crew*“ und „Dose“ gesucht.

4.1.7 Datenextraktion

Die gefundenen Quellen wurden durch ein Screening des Titels in eine relevante und eine nicht relevante Gruppe unterteilt. Danach folgte das Screening des Abstracts. Auch hier wurden die Quellen in eine relevante und nicht relevante Gruppe unterteilt. Aus der relevanten Gruppe wurden die Quellen durch das Volltextscreening erneut untersucht. Aus relevanten Quellen wurden die für die Fragestellung interessanten Daten extrahiert. Die Unterteilung folgte anhand der vorher definierten Einschluss- und Ausschlusskriterien (Kapitel 4.1.6 „Suchbegriffe“).

4.1.8 Datenauswertung und Darstellung

In den Suchfenstern der verwendeten Datenbanken ist es möglich, die Suchverläufe zu speichern. Auch können die gefundenen Treffer mit Hilfe eines Exportwerkzeugs beispielsweise in eine CSV-Datei konvertiert werden und auf diesem Weg in einer Excel Tabelle aufgelistet werden. Auch die Beantwortung der oben genannten Fragestellungen wurde auf diese Weise dokumentiert.

Die Dokumentation der Suche erfolgte mit Hilfe von Flussdiagrammen, um die einzelnen Auswahlsschritte möglichst nachvollziehbar darstellen zu können. Hierbei wurde das PRISMA Schema als Vorlage genutzt. Die Einschluss- und Ausschlusskriterien wurden in dieser Arbeit im entsprechenden Auswahlsschritt hinzugefügt. Das heißt, die in den Excel-Tabellen aufgelisteten Quellen wurden entsprechend der jeweiligen Auswahlstufe gescreent und das Ergebnis dokumentiert. Auf diese Weise entstand eine nachvollziehbare Auswahl der jeweiligen relevanten Quellen. Im letzten Auswahlsschritt wurden die gefundenen Dosisdaten aufgelistet und in Kombination mit den eingeschlossenen Studien tabellarisch dargestellt.

Das Cochrane Risk of Bias Tool (93) konnte auf die meisten gefundenen Studien nur eingeschränkt angewendet werden, da es sich bei den relevanten Studien nicht um Untersuchungen klassischer medizinischer Fragestellungen handelt. Für eine Orientierung hinsichtlich der Bewertung des Studiendesigns und der Art der Dosiserfassung konnte in Anlehnung an das Cochrane Risk of Bias Tool durchgeführt werden.

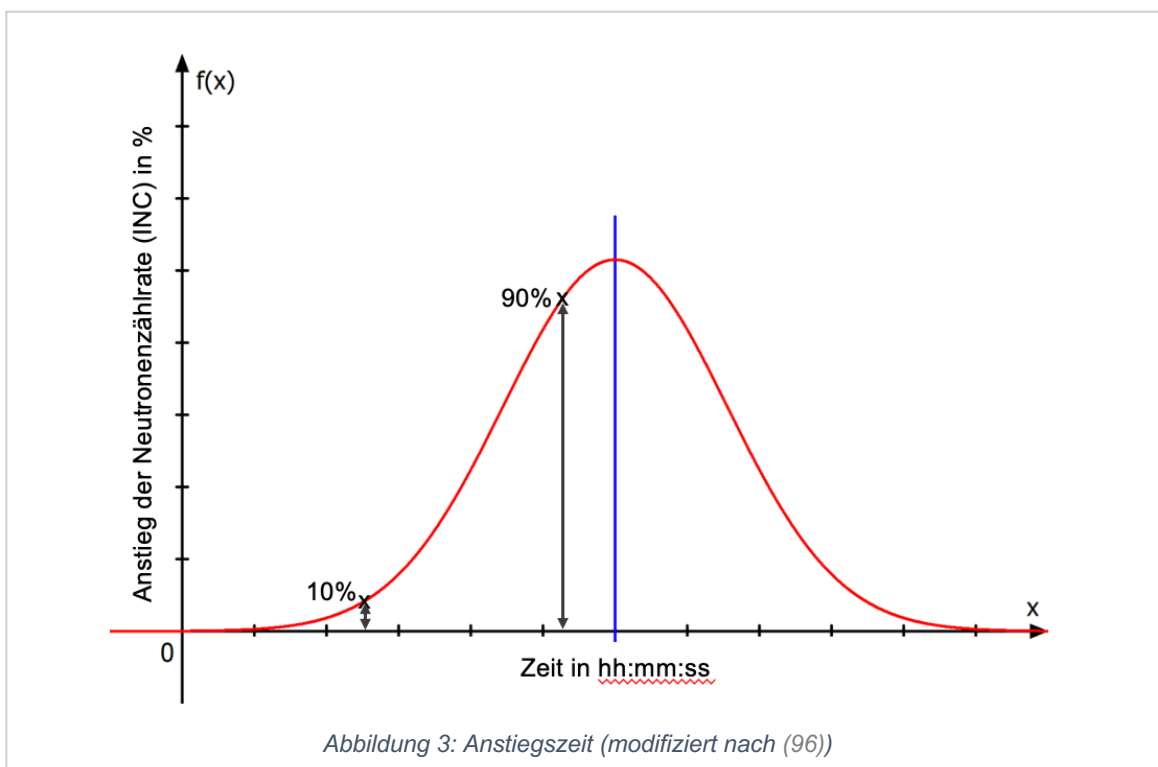
4.2 Auswertung der Ground Level Enhancements

Um bereits vergangene Ground Level Enhancements hinsichtlich ihres Verlaufs untersuchen zu können, wurden Daten des Neutronenmonitors der finnischen Universität Oulu ausgewertet (19). Die Auswertung wurde im Hinblick auf die Anstiegsteilheit und Halbwertsbreite durchgeführt.

4.2.1 Anstiegszeit

Als Anstiegszeit (Abbildung 3) wurde die gemessene Zeit festgelegt, in der die gemessene Exposition von 10 % auf 90 % in Bezug auf die Hintergrunddosis ansteigt. Dieser Bereich wurde gewählt, um eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Ereignissen herstellen zu können und die Intervalle des Anstiegs der Ground Level Enhancements miteinander vergleichen zu können. Als rechnerische Herangehensweise wurde die Zeit $d(t)$ ins Verhältnis zum prozentualen Anstieg der Neutronenzahl $d(N)$ gesetzt. Als Einheit gilt Prozent pro Zeit (96).

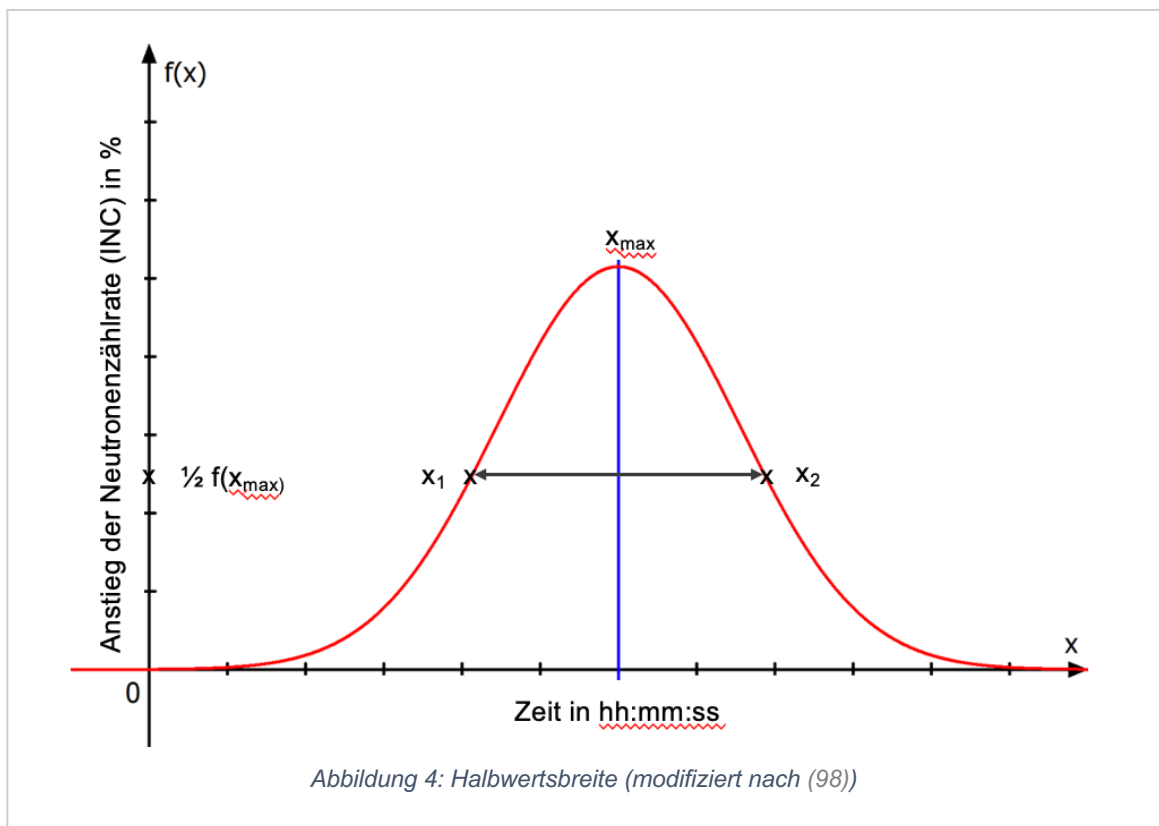
$$D(I) = \frac{d(N)}{d(t)} \quad (96)$$



4.2.2 Halbwertsbreite

Um die Länge der Ground Level Enhancements zu vergleichen, wurde die Halbwertsbreite der relevanten Ereignisse ermittelt. Die Halbwertsbreite (Abbildung 4) wird im Englischen auch „Full Width at Half Maximum“ oder in Abhängigkeit von der Zeit „Full Duration at Half Maximum“ genannt (97). Für die Berechnung sind drei Zeitpunkte im Verlauf des Ground Level Enhancements notwendig. Zuerst wird der Höhepunkt der Exposition (f_{max}) ermittelt. Darauf folgt die Berechnung des ersten Zeitpunktes (x_1), bei dem die Hälfte von x_{max} erreicht wurde. Für die Berechnung der Halbwertsbreite wird der zweite Zeitpunkt (x_2) benötigt, an dem der Neutronenstrahlungszuwachs wieder auf die Hälfte von x_{max} abgesunken ist. Die Differenz zwischen x_1 und x_2 liefert schlussendlich die Halbwertsbreite (98).

$$(x_{1,2}) = \frac{1}{2} f(x_{max}) \quad (98)$$



4.2.3 Anzahl der untersuchten GLE

Die Universität Oulu in Finnland betreibt einen Neutronenmonitor und stellt die gemessenen Daten frei zu Verfügung. Auch wird eine Einschätzung hinsichtlich der Stärke der Ground Level Enhancements in „moderate“ und „severe“ gegeben. Seit der Datenaufzeichnung durch den Neutronenmonitor wurden neun der Ground Level Enhancements als „moderate“ oder „severe“ eingestuft (19). Für die Auswertung wurden 31 Ground Level Enhancements untersucht.

4.2.4 Python

Für eine schnellere und präzisere Auswertung der Neutronendaten vergangener GLEs wurde ein Skript in Python geschrieben. Python ist eine universelle, interpretierte Programmiersprache, die ursprünglich in den späten 1980er Jahren von Guido van Rossum entwickelt wurde. Python zeichnet sich durch eine Vielfalt von Anwendungen aus, wie beispielsweise die hier verwendete Datenanalyse und wissenschaftliche Berechnung. Python greift auf eine große Standardbibliothek zu, die eine Vielzahl von Funktionen und Modulen für die Entwicklung der passenden Codes bereitstellt. Zusätzlich gibt es Drittanbieter-Module, die optional hinzugefügt werden können (99).

4.2.5 Datenauswertung

Die Neutronenmessdaten vergangener GLEs der Universität Oulu stellen die auszuwertenden Daten dar. Für die Berechnung der Anstiegszeit und der Halbwertsbreite wurde ein Python Skript geschrieben. Die Eigenschaften des verwendeten Skripts werden im Folgenden erklärt.

Bevor die Daten durch das Skript bearbeitet werden konnten, wurden die Daten von einer TXT Datei in eine CSV Datei exportiert. Auch wurden im ersten Schritt die für die Untersuchung relevanten Daten des Neutronenmonitors in Oulu extrahiert. Es wurden Zeiträume und der Anstieg der Neutronenzahl in Bezug auf die Hintergrunddosis als relevant definiert. Der Datensatz der Universität Oulu liefert verschiedene Zeitintervalle. Während ruhiger Zeiträume in Bezug auf Ground Level Enhancements wird ein größeres Zeitintervall angegeben. Für relevante Dosisänderungen hingegen wird ein kürzeres Zeitintervall gewählt. Die längeren Intervalle während ruhiger Zeiträume sind

für die Ermittlung des Ausgangswerts relevant. Die kürzeren Intervalle sind für die Berechnung der Anstiegszeit und der Halbwertsbreite von Interesse.

Zu Beginn liest das für die Berechnung verwendete Skript CSV-Dateien ein. Es ist für die Funktion von Python notwendig, erforderliche Bibliotheken zu importieren, darunter Pandas, Matplotlib, NumPy und Plotly Express. Erforderliche Bibliotheken sind Funktionen, die für die Datenanalyse gebraucht werden. Anschließend werden notwendige Begriffe definiert. Wie zum Beispiel die Funktion `getTimeDelta`, die verwendet wird, um den Zeitunterschied zwischen zwei Zeitpunkten zu berechnen.

Darauffolgend wird der Pfad angegeben, in dem die CSV-Dateien gespeichert sind, und die Dateien werden gelesen. Im Rahmen einer Begriffsdefinition wurde auch die im CSV-Datensatz enthaltene Spalte, die den Neutronenanstieg in Prozent angibt „INC%“ in „INC“ und die Daten in numerische Werte konvertiert, da das Skript sonst nicht lesbar ist.

Da die Daten des Neutronenmonitors in verschiedenen Zeitintervallen angegeben werden, muss definiert werden, welches Intervall durch das Skript gelesen werden soll. Während ruhiger Weltraumwetterereignisse wird in Intervallen von 3600 Sekunden gemessen. Wird ein Anstieg in Bezug zur Hintergrunddosis detektiert, wird das Intervall auf 300 Sekunden verkürzt. Dieser Zeitraum wird durch das Skript untersucht. Als Ausgangswert wird der Mittelwert der Daten der 3600 Sekunden-Intervalle ermittelt. Dieser Ausgangswert dient als „Nullpunkt“. Im Skript wird entsprechend der Begriff „Normal_Zeit“ erstellt, der angibt, ob der Zeitpunkt innerhalb der normalen Phase liegt (3600 Sekunden nach Beginn der Messung). Der Mittelwert von INC wird für die normale Phase berechnet.

Für die Berechnung der Anstiegszeit, werden die Werte p_{10} und p_{90} berechnet. Das sind die Werte bei denen 10% und 90% des Maximalwerts erreicht sind. Da die Daten des Neutronenmonitors immer in Zeitintervallen angegeben werden, werden die Punkte p_{10} und p_{90} näherungsweise bestimmt. Somit sucht das Skript für jedes Teil-Dataframe den Zeitpunkt, an dem der Wert von INC am nächsten zu p_{10} und p_{90} liegt.

Für die Halbwertsbreite berechnet das Skript den Zeitpunkt, an dem der Wert von INC am nächsten zur Hälfte des Maximums von INC liegt. Das Skript erzeugt dafür zuerst zwei Teil-Dataframes. Eines für die Anstiegsphase und eines für die Abfallphase. Die Anstiegszeit und die Halbwertsbreite werden berechnet, indem die Zeitdifferenz zwischen diesen Zeitpunkten mit der `getTimeDelta`-Funktion berechnet wird.

Schließlich werden die Messwerte ausgegeben, darunter die Zeitpunkte p10 und p90, die Anstiegszeit und die Halbwertsbreite. Die Anstiegszeit und die Halbwertsbreite werden in einer Liste `result_list` gespeichert.

Für die Dateninterpretation werden die H1 und H0 Hypothesen aufgestellt. Als H1 gilt je kürzer die Anstiegszeit, umso kürzer die Halbwertsbreite und je länger die Anstiegszeit, umso länger ist die Halbwertsbreite. Entsprechend gilt als H0 Hypothese, dass eine kurze Anstiegszeit keine kürzere Halbwertszeit zur Folge hat und eine lange Anstiegszeit keine lange Halbwertszeit bedeutet.

Um die Korrektheit der Hypothesen zu untersuchen, wurde der Korrelationskoeffizient r_{xy} verwendet. Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Hierbei bedeuten Werte nahe -1, dass eine negative Korrelation anzunehmen ist. Werte nahe 1 bedeuten hingegen eine positive Korrelation. Für die hier aufgestellten Fragestellungen wird eine positive Korrelation in Bezug auf die H1 Hypothese angenommen. Eine Korrelation kann sowohl stark wie schwach sein oder nicht vorliegen. Werte zwischen 0,50 und 1 bedeuten eine positive Korrelation. Werte zwischen -0,10 und 0,10 bedeuten eine geringe bis keine Korrelation (100).

Der Korrelationskoeffizient r_{xy} wird mit Hilfe der nachstehenden Formel berechnet (100).

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x \times s_y}$$

s_{xy} = Kovarianz der Variablen x und y

s_x = Standardabweichung der Variablen x

s_y = Standardabweichung der Variablen y

x = Anstiegszeit

y = Halbwertsbreite

Um zu verifizieren, dass die Annahme der H1 Hypothese nicht zufällig ist, wird der p-Wert berechnet und mit dem Signifikanzniveau verglichen.

Das Signifikanzniveau wird für diese Studie auf 0,05 festgelegt und entspricht einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %. Liegt der berechnete p-Wert unter dem Signifikanzniveau wird die H1 Hypothese angenommen und die H0 Hypothese verworfen (100). In dieser Arbeit wird die Berechnung der Korrelation r_{xy} mit Hilfe des Befehls `dataframe.result.corr` in Python umgesetzt. Die Berechnung des p-Werts erfolgt ebenfalls mit Hilfe des entsprechenden Befehls in Python.

5. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Literaturrecherche sowie die jeweilige Datenextraktion der beiden untersuchten Fragestellungen sowie die Untersuchung der Ground Level Enhancements sind im Folgenden beschrieben.

5.1 Literaturrecherche

Die Beantwortung der beiden Forschungsfragen wurde in Anlehnung an das PRISMA Schema durchgeführt.

Fragestellung 1: Wie hoch ist die Exposition des ungeborenen Kindes während des Fliegens?

Datenexploration 1

Die Exploration der Daten (Tabelle 6) wurde durch die systematische Suche nach relevanten Quellen in den gängigen wissenschaftlichen Datenbanken Pubmed/Medline, Web of Science und der Cochrane Library durchgeführt. Die jeweiligen Dokumentationen der Suche sind in Tabelle 6 dargestellt. Mit den festgelegten trunkierten Suchbegriffen wurden in der Datenbank Medline 195 Treffer gefunden. Die Suche in der Cochrane Library ergab drei Treffer und die Recherche in der Web of Science Datenbank ergab fünf Treffer.

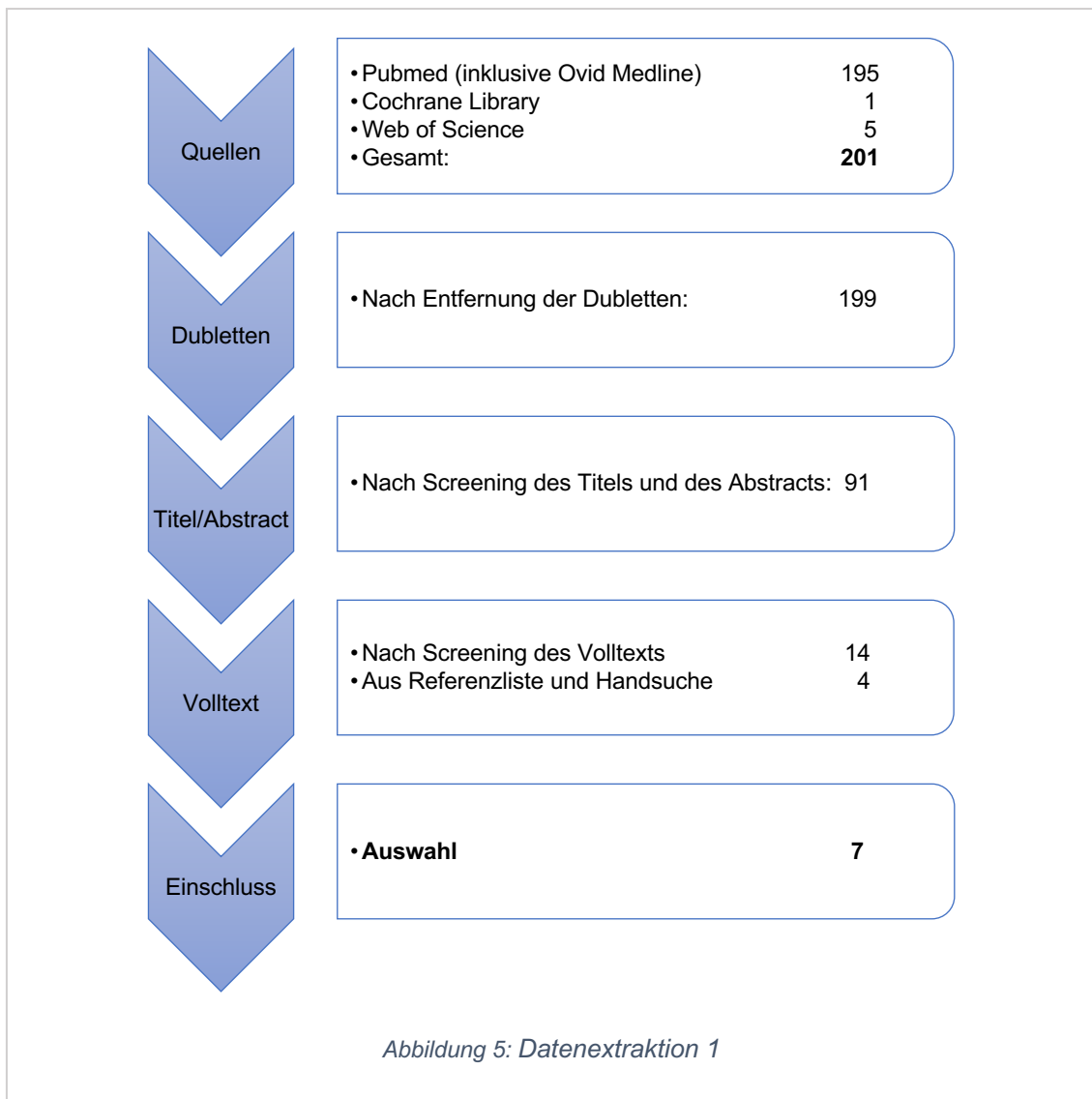
Tabelle 6: Datenexploration 1

Datenbank	Letzte Suche	Treffer
Pubmed/Medline	24.02.2024	195
Cochrane Library	26.02.2024	3
Web of Science	26.02.2024	5

Datenextraktion 1

Nachdem die potenziell relevanten Quellen identifiziert und exportiert worden waren, fand die Extraktion der Daten in Anlehnung an die in den PRISMA Guidelines beschriebenen Schritte statt (Abbildung 5). Aus allen Datenbanken wurden insgesamt 204 möglicherweise relevante Quellen dokumentiert. Nach Entfernung der Dubletten verblieben noch 129 Quellen. Durch die Überprüfung des Titels und des Abstracts wurden 91 Quellen in die Stufe der Volltextüberprüfung aufgenommen. Neben den durch die Datenbanken gefundenen Quellen wurden die Referenzlisten der Quellen der Volltextüberprüfung untersucht, um weitere noch nicht gefundene Quellen in die Überprüfung einzuschließen. Hierbei fanden sich weitere vier Quellen, die für den Schritt der Datenextraktion relevant erschienen. Zusätzlich wurde mit Hilfe einer Handsuche die Datenbank Google Scholar durchsucht. Hier fand sich keine weitere, nicht bereits detektierte Quelle. Im letzten Schritt konnten die Daten der 18 Quellen, die durch die Volltextsuche und die Suche in den Referenzlisten gefunden wurden, mit Hilfe der genannten Einschlusskriterien überprüft werden. So trafen die Einschlusskriterien auf sieben Quellen zu (Abbildung 5).

5. Ergebnisse



Ergebnisse

Aus den sieben Studien, die mit Hilfe der Literaturrecherche identifiziert wurden, konnten für die vorliegende Fragestellung folgende Ergebnisse ermittelt werden: In der Studie von Chen et al. (2004) wurde berechnet, dass die Exposition mit Neutronenstrahlung $1,97 \mu\text{Sv/h}$ im Durchschnitt während Langstreckenflügen beträgt (101). Die Dosis ist nicht nur von den äußeren Gegebenheiten wie der Flugdauer und -route abhängig (94), sondern auch von der Größe des ungeborenen Kindes. Daher wurden in der Studie von Chen et al. Berechnungen der Dosis für verschiedene Wachstumsstadien durchgeführt. Für Neutronenstrahlung beträgt die Dosis im 2. Schwangerschaftsmonat 21 pGy/cm^2 , im 3. Monat 23 pGy/cm^2 , im 6. Monat 20 pGy/cm^2 und im 9. Monat $17,2 \text{ pGy/cm}^2$ (102). Da neben der Neutronenstrahlung die Protonenstrahlung einen großen Einfluss auf die Exposition hat (3), wurden auch Untersuchungen zur Exposition mit Protonenstrahlung berücksichtigt. Hier wurden Dosen für den 3. Monat mit $2,94 \text{ pGy/cm}^2$, den 6. Monat mit $24,4 \text{ pGy/cm}^2$ und den 9. Monat mit 51 pGy/cm^2 berechnet (103). Eine Monte Carlo Simulation zur Bestimmung der Strahlenexposition mit Photonen berechnet eine fetale Dosis von $4,2^{-3} \text{ J/kg}$ aus bei einer isotropen Bestrahlung des mütterlichen Körpers mit einer Photonenenergie von 1 MeV (104).

In Bezug auf die grundsätzliche Strahlenexposition mit kosmischer Strahlung des ungeborenen Kindes in Flughöhen unterscheiden sich die Daten zweier Quellen. Die Studie von Chen und Mares führte die Berechnung mit dem Dosisrechnungsprogramm EPCARD durch und gibt eine Dosis von $5,28 \mu\text{Sv/h}$ für das Ungeborene an (95). Die Studie von Nicholas et al. berechnet die Dosis nicht nur im generellen Durchschnitt, sondern gibt verschiedene Dosen in Abhängigkeit von Flugroute und -höhe sowie der Gewebstiefe an. Hier wird für Polrouten (80°N , 20°E) und einer in der zivilen Luftfahrt näherungsweise üblichen Flughöhe von 30000 ft eine Dosis bei 5 cm Gewebstiefe von $3,8 \mu\text{Sv/h}$, bei 10 cm von $3,8 \mu\text{Sv/h}$ und bei 15 cm und $3,7 \mu\text{Sv/h}$ berechnet (94). Die effektive Dosis wird in dieser Studie mit $4,1 \mu\text{Sv/h}$ berechnet. Die angegebenen Werte sind mit dem Dosisrechnungsprogramm CARI-7 berechnet worden (94). Für die gesamte Dauer der Schwangerschaft wird bei aktiv im weltweiten Flugdienst eingesetzten Personals eine Dosis von $0,8\text{-}1 \text{ mSv}$ erwartet (105) (Tabelle 7).

Die Exposition des Foetus beziehungsweise des Embryos ist abhängig von der Strahlungsart. So kann festgestellt werden, dass Neutronenstrahlung zwar nicht die

5. Ergebnisse

gesamte Dosis ausmacht, jedoch der größte Anteil der Exposition durch die Neutronenstrahlung entsteht (101).

Tabelle 7: Exposition des Ungeborenen

Publikation	Jahr	Population, Charakteristika	Strahlungsart	Rekonstruierte Dosis	Dosiserfassung	Ergebnisdarstellung
Alves et. al (105)	2007	Schwangere Crewmitglieder	Kosmische Strahlung	0,8-1 mSv	CARI-6, EPDARD	Dosis für die gesamte Dauer der Schwangerschaft
Chen et. al (102)	2004	Fetus und Embryo in der zivilen Luftfahrt	Neutronen	8 Wochen: 21 pGy/cm ² , 3 Monate: 23 pGy/cm ² , 6 Monat: 20 pGy/cm ² , 9 Monate: 17,2 pGy/cm ²	Monte Carlo Simulation	Fetale Dosis in pGy/cm ²
Chen et. al (101)	2005	Fetus und Embryo in der zivilen Luftfahrt	Neutronen	1,97 µSv/h	EPCARD	Fetale Dosis in µSv/h
Chen & Mares (95)	2008	Fetus und Embryo in der zivilen Luftfahrt	Kosmische Strahlung	5,28 µSv/h	EPCARD	Fetale Dosis in µSv/h
Stabin et. al (104)	1995	Fetale Exposition im 6. Schwangerschaftsmonat	Photonen	4,2 ⁻³ J/kg	Monte Carlo Simulation	Absorbierte fraktionierte Photonenenergie bei der Bestrahlung des mütterlichen Körpers mit 1 MeV Photonenstrahlung

5. Ergebnisse

Taranenko et. al (103)	2009	Fetale Dosis während des 3., 6. und 9. Schwangerschaftsmonats	Protonen	3. Monat: 2,94 pGy/cm ² , 6. Monat: 24,4 pGy/cm ² , 9. Monat: 51 pGy/cm ²	Monte Carlo Simulation	Dosis bei der isotropen Bestrahlung des mütterlichen Körpers mit 0,1 GeV Protonenstrahlung
Nicholas et. al (94)	2000	Exposition eines menschenähnlichen Phantoms in 5 cm, 10 cm und 15 cm Gewebstiefe in Bezug auf die zivile Luftfahrt	Kosmische Strahlung	30000 ft Flughöhe, 80°N, 20°E: Effektive Dosis: 4,1 µSv/h Äquivalentdosis: 5 cm: 3,8 µSv/h 10 cm: 3,8 µSv/h 15 cm: 3,7 µSv/h	CARI-6, CARI-LF3	Effektive Dosis und Äquivalentdosis in Abhängigkeit von der Flughöhe und der geographischen Lokalisation

Fragestellung 2: Welche Auswirkungen hat ionisierende Strahlung auf Embryo und Fetus?

Datenexploration 2

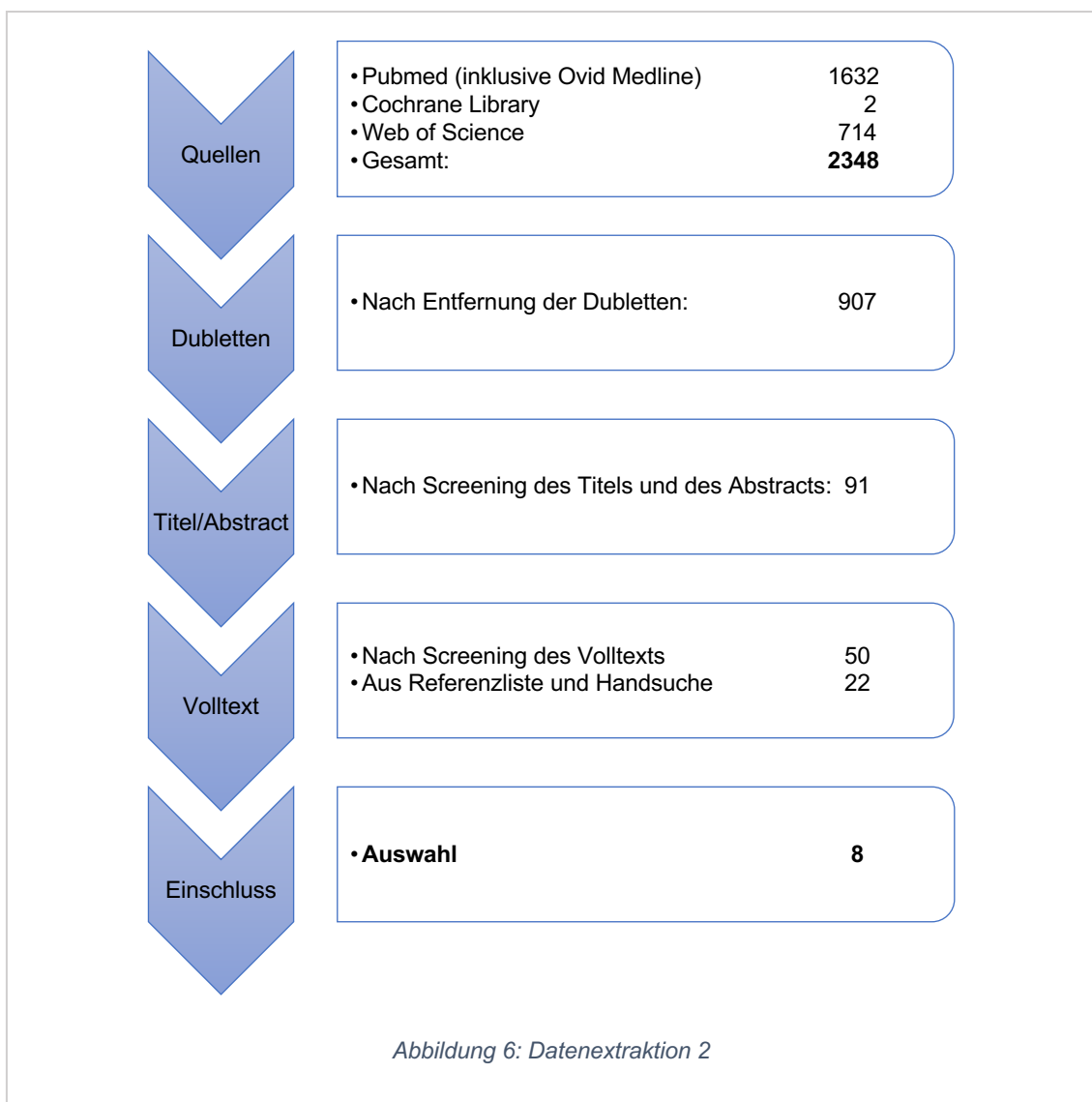
Auch für die Beantwortung dieser Fragestellung wurden die gängigen wissenschaftlichen Datenbanken Pubmed, Web of Science und die Cochrane Library nach relevanten Quellen durchsucht. Die Recherche in der Datenbank Pubmed/Medline lieferte 1632 Treffer. In der Cochrane Library wurden zwei potenziell relevante Quellen gefunden und bei der Recherche in der Datenbank Web of Science 714 (Tabelle 8).

Tabelle 8: Datenexploration 2

Datenbank	Letzte Suche	Treffer
Pubmed/Medline	26.02.2024	1632
Cochrane Library	26.02.2024	2
Web of Science	26.02.2024	714
Total		2348

Datenextraktion 2

Durch die Datenexploration wurden 2348 Quellen gefunden, die möglicherweise für die Beantwortung der Fragestellung 2 relevant sein könnten. Nachdem die Mehrfachtreffer entfernt worden waren, blieben noch 907 für das Screening des Titels und des Abstracts. Hierbei wurden 91 Quellen für das Volltextscreening als relevant beurteilt. Aus der Referenzliste und einer Handsuche mit Hilfe von Google Scholar wurden 22 weitere Quellen untersucht. Im letzten Schritt erfüllten acht Quellen die Einschlusskriterien (Abbildung 6).



Ergebnisse

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse der Literaturrecherche zu Fragestellung 2, dass Auswirkungen von Strahlung erst ab Expositionen mit 100 mSv beobachtet werden (Tabelle 9). Dennoch gibt der UNSCEAR Report ein Risiko von 0,1 % pro mSv für einen Abort an. Diese Beobachtung spricht für das Zutreffen der „Alles-oder-Nichts-Regel“, der zufolge ein Abort besonders in frühen Schwangerschaftsphasen wahrscheinlicher ist als die Entwicklung von Fehlbildungen (3).

In den Studien, welche Expositionen in niedrigeren Dosisbereichen untersuchten, konnten keine signifikant erhöhten Erkrankungsraten detektiert werden (106), (107), (108), (109). In der Veröffentlichung der ICRP wird ein Risiko für Schäden des ZNS und kariovaskuläre Schäden ab 100-200 mGy beschrieben (82). Miller & Blot konnten ein erhöhtes Risiko für geistige Behinderungen durch die Exposition Ungeborener in einer Kohorte Atombombenüberlebender ab einer Dosis von 1,5 Sv zeigen (110). Otake & Schull konnten erhöhte Raten an Organfehlbildungen ab 200 mSv beobachten (111). Sugiyama et al. fanden nach einer Exposition mit 123 mGy statistisch signifikant verringerte Umfänge des Kopfes und ein verringertes Geburtsgewicht (112). Diese Beobachtungen hatten keine statistische Signifikanz für einen verminderten IQ (112). Ein erhöhtes Risiko für die Entwicklung von Leukämien wurde durch Wakeford mit 10 % pro Gy angegeben (113) (Tabelle 9).

Dennoch ist auch der Strahlenschutz in Niedrigdosisbereichen essenziell. Strahlenschäden in diesen Bereichen, sind stochastische Schäden, die mit steigender Dosis häufiger werden und auch bei geringen Dosen auftreten können (49).

5. Ergebnisse

Tabelle 9: Auswirkungen von Strahlung auf ungeborenes Leben

Publikation	Jahr	Population, Charakteristika	Rekonstruierte Dosis	Effekt
Fiebich et al. (109)	2021	Radiologische Diagnostik	< 20 mSv	Präimplantationsphase: keine Effekte Organogenese: keine Effekte
Krestinina et al. (106)	2017	Bewohner Techna Fluss	4,4 mGy (max 295 mGy)	Keine Effekte beobachtet
Miller & Blot (110)	1972	Atombombenüberlebende	> 150 rad (entspricht 1,5 Sv)	Geistige Behinderung
Otake & Schull (114)	1998	Atombombenüberlebende	> 200 mSv	Organfehlbildungen
Preston et al. (108)	2008	Atombombenüberlebende	0 - 0,2 Gy	Keine statistische Signifikanz für solide Tumore
Schonfeld et al. (107)	2013	Mayak Arbeiter	54 mGy (max. 945 mGy)	Keine Effekte beobachtet
Sugiyama et al. (112)	2021	Atombombenüberlebende	123 mGy	Geringerer Kopfumfang, geringeres Geburtsgewicht
Wakeford (113)	2008	Radiologische Diagnostik	10 % pro Gy	Leukämie

5.2 Untersuchung verschiedener Ground Level Enhancements (GLE)

Mit Hilfe des programmierten Python-Skripts wurden die vorhandenen Daten zu 31 Ground Level Enhancements (GLE) die von der Universität Oulu erhoben wurden, ausgewertet (19). Es konnten für alle Ereignisse die Anstiegszeit und Halbwertsbreite ermittelt werden (Tabellen 10 und 11).

Das GLE mit der höchsten Zählrate war das GLE 69 am 20.01.2005 mit einem Anstieg der Neutronenzahl um 269 % (19). Die Anstiegszeit betrug 10 Minuten. Die Halbwertsbreite lag bei 35 Minuten. Damit gehörte dieses GLE zu den Ereignissen mit kurzer Dauer. Weitere GLEs mit kurzer Anstiegszeit und kurzer Halbwertsbreite sind die GLEs 31, 38 und 70. Das am längsten andauernde GLE war das GLE 43 am 19.10.1989. Die Halbwertsbreite betrug 8:25 Stunden bei einer langen Anstiegszeit von 1:15 Stunden. Weitere lang andauernde GLEs waren die GLEs 42, 45, 59 und 60. Das GLE 38 am 08.12.1932 stellt einen Sonderfall dar. Die Anstiegszeit war mit 2:05 Stunden langandauernd, wohingegen die Halbwertsbreite nur 40 Minuten betrug.

Einzelne Teilwerte sind aufgrund einer besseren Übersicht nur für die neun stärksten GLEs in Tabelle 10 gezeigt. Hierbei werden die angegebenen Zeiten in Minuten und UT dargestellt. UT steht für Universal Time und ist die weltweit gültige Normalzeit.

5. Ergebnisse

Tabelle 10: Auswertung der Ground Level Enhancements

GLE	Datum	p10 (UT)	p90 (UT)	INC (%) bei p10	INC (%) bei p90	Anstiegszeit (h:m:s)	½ f (x max) in %	X1 (UT)	X2 (UT)	Halbwertsbreite (h:m:s)
31	07.05.1978	033500-034000	034500-035000	8.53	76.79	0:10:00	42.15	034000-034500	040500-041000	0:25:00
38	08.12.1982	221000-221500	001500-002000	2.63	23.66	2:05:00	13.35	000000-000500	004000-004500	0:40:00
42	29.09.1989	115500-120000	131500-132000	17.48	157.32	1:20:00	87.2	121000-121500	161500-162000	4:05:00
43	19.10.1989	132500-133000	144000-144500	3.75	33.75	1:15:00	18.85	135500-140000	222000-222500	8:25:00
45	24.10.1989	183500-184000	195000-195500	8.99	80.94	1:15:00	47.2	190000-190500	003500-004000	5:35:00
59	14.07.2000	103000-103500	104000-104500	2.75	24.75	0:10:00	14.7	103500-104000	122500-123000	1:50:00
60	15.04.2001	140000-140500	142500-143000	5.79	52.14	0:25:00	28.35	141000-141500	153000-153500	1:20:00
69	20.01.2005	065000-065500	070000-070500	27.39	246.53	0:10:00	134.545	065500-070000	073000-073500	0:35:00
70	13.12.2006	025000-025500	030000-030500	9.23	83.03	0:10:00	46.05	025500-030000	032000-032500	0:25:00

5. Ergebnisse

Tabelle 11: Anstiegszeit und Halbwertsbreite

Ground Level Enhancement	Anstiegszeit in Minuten	Halbwertsbreite in Minuten
23	205	270
24	55	120
25	175	90
26	100	130
27	100	55
28	140	35
29	285	260
30	25	95
32	205	205
33	45	155
34	5	355
35	0	435
36	205	285
37	85	245
39	80	30
40	190	125
41	250	155
44	155	160
46	15	130
47	50	260
48	175	520
52	35	110
53	145	120
55	70	220
57	470	540
58	345	400
61	25	75
62	595	1090
63	165	365
65	275	635
71	10	35

5.2.1 Auswertung

Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten ergibt den Wert $r_{xy} = 0,7117$. Dieser Wert spricht für eine gute Korrelation und somit für die Annahme der H1 Hypothese und den Verwurf der H0 Hypothese. Allerdings muss mit Hilfe des p-Werts verifiziert werden, ob die Korrelation nur durch Zufall aufgrund der geringen Fallzahl $n = 31$ ermittelt werden konnte.

Der p-Wert beträgt für die untersuchten Daten 0,0000072. Somit ist der p-Wert $< 0,001$ und spricht somit für eine nicht zufällig ermittelte Korrelation (100).

Das Signifikanzniveau wurde auf 0,05 beziehungsweise 5 % festgelegt. Da der p-Wert deutlich niedriger ist als das Signifikanzniveau, kann die Korrelation r_{xy} verifiziert und angenommen werden.

Abbildung 7 zeigt die graphische Darstellung der Korrelation zwischen Anstiegszeit und der Halbwertsbreite der untersuchten GLEs.

Die Ausgleichgerade (orange) zeigt den durchschnittlichen Verlauf der Korrelation. Die Winkelhalbierende (grau) zeigt den idealen Verlauf. Würden alle Punkte auf der grauen Geraden liegen, wäre eine ideale Korrelation gegeben. Die orangene Gerade stellt somit auch die Abweichung von der idealerweise gegebenen Korrelation dar.

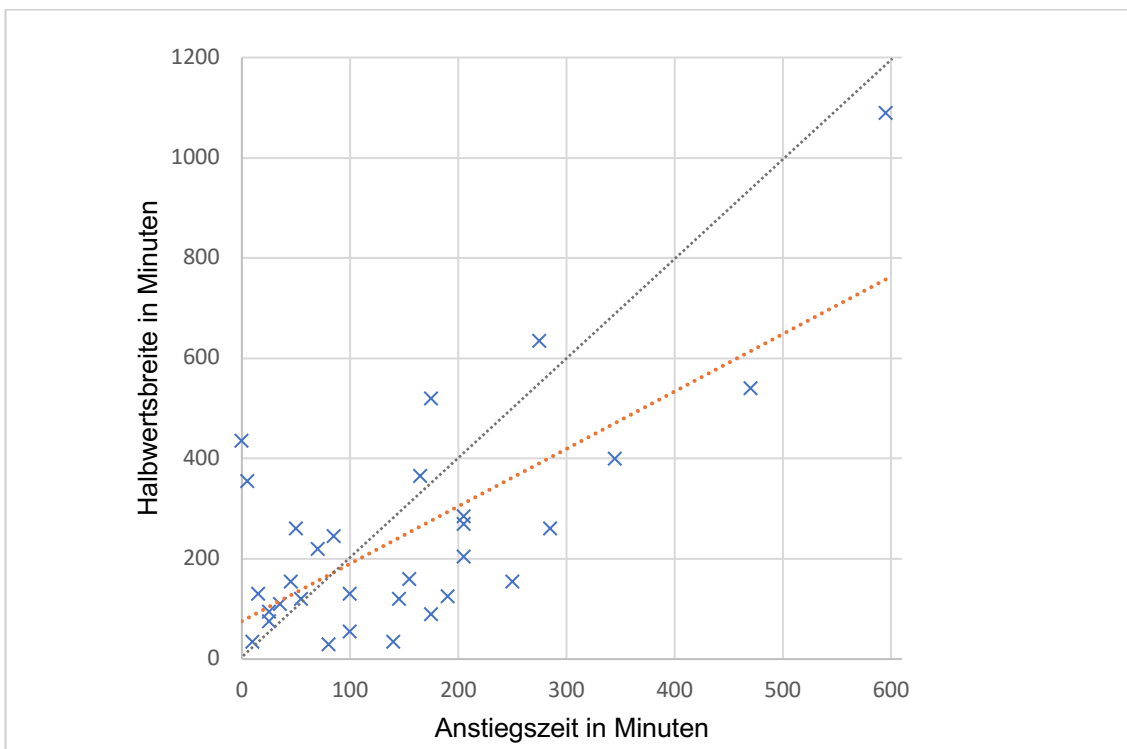


Abbildung 7: Korrelation zwischen Anstiegszeit und Halbwertsbreite der untersuchten GLEs

5.2.2 Abweichungen

Würde die H1 Hypothese für alle untersuchten Fälle zutreffen, betrüge der Korrelationskoeffizient 1. Da es aber in den Daten der untersuchten Ereignisse zu Abweichungen kam, beträgt die Korrelation nicht 1.

Die Abweichungen beziehen sich auf sieben der 31 untersuchten Ground Level Enhancements. Veranschaulicht werden die Abweichungen in Abbildung 8. Würden alle Ereignisse eine positive Korrelation zeigen, würden die Kurven einen ähnlichen Verlauf zeigen. In den überwiegenden Fällen kann ein Anstieg beziehungsweise ein Abfall simultan zwischen beiden Parametern gezeigt werden. Ausgenommen hiervon sind die Daten der Ground Level Enhancements 25, 33, 34, 35, 39, 46 und 53. Die Ereignisse 25, 27, 28, 39, 40, 41 und 53 zeigen eine Antikorrelation.

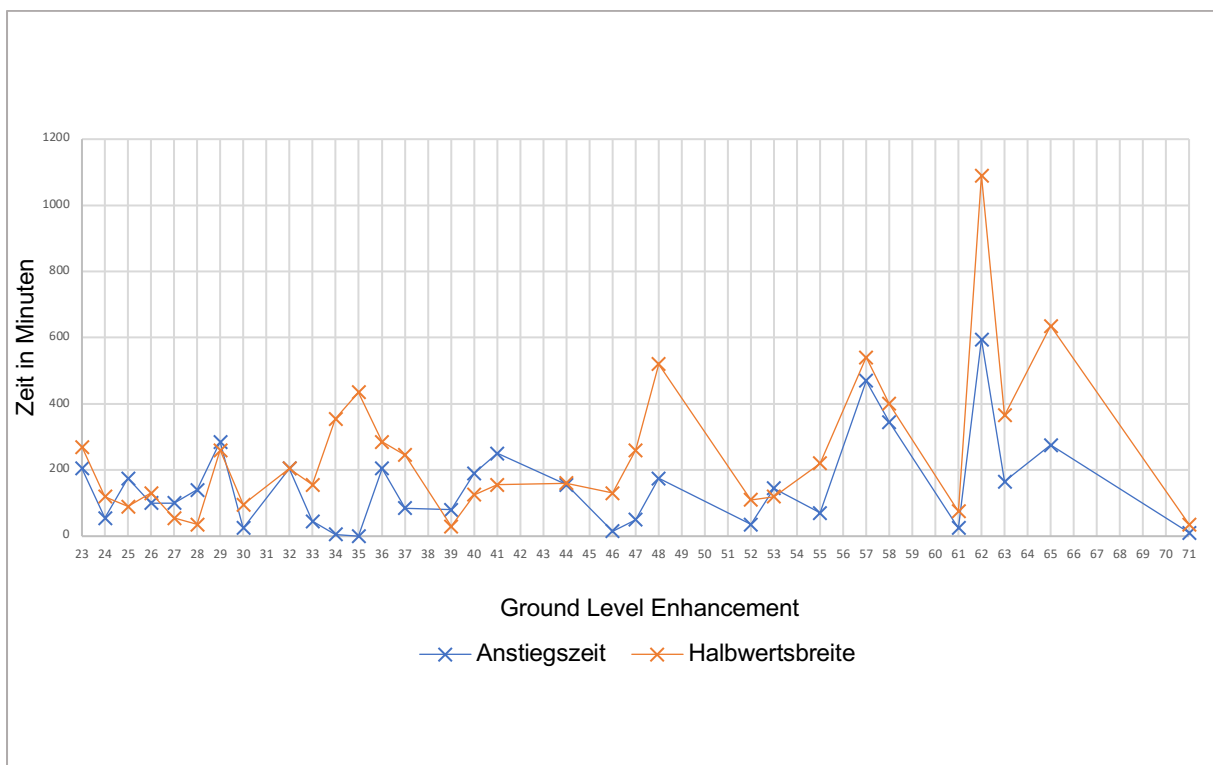


Abbildung 8: Anstiegszeit und Halbwertsbreite der GLEs

6. Diskussion

Die durchgeführte Literaturrecherche und die Untersuchung der Ground Level Enhancements sollen Grundlagen zur Erarbeitung von Handlungsoptionen schaffen. Anregungen hierfür werden anschließend diskutiert. Auch werden Stärken und Schwächen der durchgeführten Studie dargestellt.

6.1 Methodik

Die angewandte Methodik zeigt trotz erfolgreicher Ergebnisfindung einige Schwächen, welche in diesem Kapitel dargestellt werden.

6.1.1 Literaturrecherche

Die durchgeführte Literaturrecherche wurde in Anlehnung an die PRISMA Kriterien durchgeführt. Hier war das Ziel, eine Einschätzung der zu erwartenden Strahlungsdefekte auf das ungeborene Leben zu gewinnen. Außerdem wurde recherchiert, wie hoch die Exposition des Ungeborenen in Flughöhen ist und auf welche Weise am sinnvollsten eine Berechnung der Exposition erfolgen kann.

Ein Kriterium zur Durchführung eines PRISMA Schemas ist die unabhängige Datenerhebung durch mindestens zwei Reviewer. In dieser Arbeit konnte dieses Kriterium nicht durchgeführt werden, da ein Mangel an weiteren Reviewern bestand. Zur Erhöhung der Verlässlichkeit sollte dies nachgeholt werden.

Vor diesem Hintergrund sind die durchgeführten Literaturrecherchen am ehesten als narrative Reviews einzuordnen.

Auch zeigt die Literaturrecherche in Bezug auf die Fragestellung 1 zur Einschätzung der Exposition des Ungeborenen, dass es Studien zur Erhebung der Dosis gibt. Jedoch sollte darauf hingewiesen werden, dass bei der Erhebung der Daten in den untersuchten Studien unterschiedliche Methoden verwendet wurden. Es wurden teilweise nicht alle relevanten Parameter in der Berechnung berücksichtigt. Vor allem die Studie durch Nicholas et al. (94) berücksichtigt in Bezug auf die Anwendbarkeit der Berechnung die relevantesten Parameter. Vor diesem Hintergrund ist die Indikation für die Beantwortung der Fragestellung mit Hilfe einer Literaturrecherche zu hinterfragen.

Eine sinnvollere Möglichkeit zur Bestimmung der Dosis für ein ungeborenes Kind wäre die Berechnung unter Einbezug aller wichtigen Parameter mit Hilfe von Dosisberechnungsprogrammen. Die Berechnung durch verschiedene Dosisrechnungsprogramme könnte in zukünftigen Studien genauer untersucht werden.

6.1.2 Untersuchung der Ground Level Enhancements

Die Untersuchung der Ground Level Enhancements gibt Hinweise auf den erwartbaren Verlauf kommender Ground Level Enhancements. Dennoch zeigen einige der untersuchten Ereignisse abweichende Verläufe von der angenommenen Hypothese. Dennoch zeigen die Ergebnisse eine gute Korrelation. Eine genauere Untersuchung kann durch die Erhöhung der Fallzahl erfolgen. Dafür wäre die Auswertung der Neutronendaten weiterer Ground Level Enhancements notwendig. In der durchgeführten Untersuchung wurden alle verfügbaren Daten in Bezug auf vergangene Ground Level Enhancements, die durch die Universität Oulu bereitgestellt werden, verwendet.

In zukünftigen Studien sollte angestrebt werden, auch die Daten, die derzeit nicht über die Universität Oulu verfügbar sind, auszuwerten.

6.2 Mögliche Grenzwertüberschreitung

Bei der Betrachtung der erwartbaren Dosis durch vergangene GLEs fällt auf, dass besonders der Grenzwert für die Organäquivalentdosis der Gebärmutter gebärfähiger Frauen als zu überschreitender Grenzwert infrage kommt. Um die Tragweite möglicher Expositionen zu verdeutlichen, wird im Folgenden auf Studien zu extremen vergangenen solaren Teilchenereignissen eingegangen. Untersuchungen an Polareis und Baumringen konnten Hinweise auf extreme solare Teilchenereignisse mit hohen Auswirkungen auf die Exposition am Erdboden und somit auch näherungsweise in Flughöhen zeigen. Die Konzentration von ^{14}C in Baumringen gibt Hinweise auf bereits vergangene solare Teilchenereignisse. Im Polareis gibt die Konzentration ^{10}B und ^{36}Cl ebenfalls Hinweise auf die Exposition bereits vergangener solarer Teilchenereignisse. Eines dieser Ereignisse soll im Jahr 774-775 n. Chr. stattgefunden haben und wurde durch eine japanische Forschungsgruppe hinsichtlich seiner Exposition untersucht (115). Es wird angenommen, dass die Exposition während dieses Ereignisses bis zu 20 Mal höher im Vergleich zur Hintergrunddosis war (115). Ein weiteres extremes

solares Teilchenereignis soll 993/994 n. Chr. stattgefunden haben. Analog zu den bereits lange vergangenen extremen Ereignissen zeigen auch die stärkeren Ground Level Enhancements jüngerer Zeit (GLE 5 und GLE 69) messbare Veränderungen in der ^{14}C und ^{10}B Konzentration in Baumringen und Polareis (4). Würden solche Ereignisse heutzutage auftreten, könnte mit erheblichen Auswirkungen auf die zivile Luftfahrt gerechnet werden. Diese Untersuchungen zeigen darüber hinaus, dass durchaus mit extremen solaren Teilchenereignissen gerechnet werden muss. Im Fall des solaren Teilchenereignisses 774/775 n. Chr. hätte die Exposition auf einem Flug von Paris nach Tokyo zwischen 1 und 32 mSv betragen. Die Exposition ist auch hier stark abhängig von der Flugroute und unterscheidet sich auch im Hinblick auf die Flugrichtung. Während auf einem Flug von Paris nach Tokyo die Route vom Osten nach Westen verläuft, ist die Verbindung von Tokyo nach Paris eine West-Ost-Verbindung. Hier wird die Exposition während des solaren Teilchenereignisses 774/775 n. Chr. mit 8,5 bis 42 mSv berechnet (4).

Im Falle dieser extremen solaren Teilchenereignisse könnte nicht nur der Grenzwert für die Organäquivalentdosis der Gebärmutter überschritten werden. Gäbe es ein derartiges Teilchenereignis mit begleitendem Ground Level Enhancement, könnten auch andere Grenzwerte überschritten werden. Daher ist die Entwicklung von Handlungsempfehlungen obligat.

6.3 Exposition des Ungeborenen

Die Untersuchung der Exposition eines ungeborenen Kindes durch Strahlung in Flughöhen ist nicht nur vor dem Hintergrund ruhiger Weltraumwetterverhältnisse interessant. Mit der Kenntnis über die Hintergrundexposition ist auch eine näherungsweise Einschätzung der zu erwarteten Dosis durch Ground Level Enhancements möglich.

Die Beantwortung der ersten Fragestellung in der vorliegenden Arbeit beschäftigt sich aus diesem Grund mit der erwartbaren Dosis für die Gebärmutter durch den Aufenthalt in Flughöhen. Die gefundenen Studien geben verschiedene Dosiswerte an (Tabelle 7). Der Grund dafür ist, dass in den einzelnen Studien verschiedene Berechnungsparameter und Datenermittlungsverfahren einbezogen wurden. Während Chen & Mares (95) auf Grundlage des von Stabin et al. (104) entwickelten mathematischen Modells eines weiblichen schwangeren Körpers ihre Daten für verschiedene Schwangerschaftsabschnitte angeben, werden durch Nicholas et al. (94) die Äquivalentdosis in

Bezug auf die Gewebseindringtiefe mit der effektiven Dosis verglichen. Chen & Mares (95) berechnen die Dosis in 5,28 $\mu\text{Sv/h}$ für die Lokalisation über dem Indischen Ozean während eines solaren Minimums. Nicholas et al. ermitteln die Dosis nicht nur für eine bestimmte Lokalisation, sondern berechnen die jeweilige Dosis für verschiedene Flughöhen, Breitengrade und Flugrouten. Daher macht diese Studie eine breitere Anwendbarkeit möglich.

Die Studie von Stabin et al. (104) ermittelt die Exposition einer Schwangeren für die Exposition mit Photonen. Photonen tragen zwar zur Exposition auf Flughöhen bei, machen aber nicht den Hauptanteil der Exposition aus. Protonen, die durch Taranenko et al. (103) untersucht wurden, haben einen größeren Einfluss auf die Exposition in Flughöhen. Sie tragen zusammen mit Neutronen zu 60 – 80 % zum Strahlungsfeld bei (3). Allerdings ist die Studie (103) nur bedingt übertragbar auf das Strahlungsfeld in Flughöhen, da die untersuchten Energien deutlich höher sind als im Strahlungsfeld in Flughöhen. Neutronen haben wie zuvor erwähnt einen größeren Einfluss auf die Exposition. Chen et al. (101) untersuchten in ihrer Studie die Exposition der Schwangeren und ermittelten die Dosis, die durch Neutronenstrahlung verursacht wird. Der große Einfluss der Neutronen auf die Dosis bedingt sich nicht nur durch ihre direkte Einwirkung auf die Dosis. Sie haben vor allem einen Einfluss auf die indirekte Strahlenwirkung, indem sie ein sekundäres Strahlungsfeld generieren. Aus diesem Grund wurden vor allem die Studien von Chen & Mares (95) und die Studie von Nicholas et al. (116) als näherungsweise angenommene Werte zur Einschätzung der Exposition und zur Beantwortung der ersten Fragestellung ausgewählt. Für die Einschätzung der Exposition ist eine näherungsweise Abschätzung der Dosis ausreichend. Die effektive Dosis kann laut Nicholas et al. (116) annähernd gleich der Äquivalentdosis angenommen werden. Diese Annahme kann eine Grundlage zur Ermittlung der Dosis für das Ungeborene möglich machen.

6.4 Auswirkungen in Abhängigkeit von der Dosis

Für Strahlungsschäden konnte gezeigt werden, dass vermehrte Entwicklungsstörungen und erhöhte Krebsraten erst ab einer Exposition von 100 mSv beobachtet werden. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass auch Expositionen im Niedrigdosisbereich zu Schäden führen. Diese gehören, wie bereits in der Literaturdiskussion beschrieben, zu den stochastischen Schäden. Andere Quellen geben eine Schwellendosis für

Ungeborene von 50 – 100 mSv an (50). Für einen statistisch signifikanten Nachweis der Auswirkung von Strahlung im Niedrigdosisbereich wären riesige Kohorten notwendig (50). Bisher wurde noch keine Studie zu diesem Thema mit einer solch großen Probandenanzahl durchgeführt. Ausschlaggebend für die Auswirkungen einer Exposition sei nicht nur die Höhe der Exposition, sondern auch die Dauer (50).

Oftmals bleiben Schwangerschaften besonders im ersten Trimenon unerkannt. Auch folgen in der sehr frühen Schwangerschaft Schäden möglicherweise unerkannt der Alles-oder-Nichts-Regel (3). Das bedeutet, selbst wenn eine Frau schwanger war, ist das nicht immer bekannt. Dieses Phänomen macht die Detektion von Strahlungsauswirkungen auf ungeborene Kinder noch schwieriger.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Strahlungsart, mit der exponiert wurde. In der Literaturdiskussion wurden bereits verschiedene Strahlungsarten und deren Wichtungsfaktoren vorgestellt. Neutronen haben einen großen Einfluss auf die Strahlenexposition in Flughöhen. Die Energie der Neutronen hat Einfluss auf deren Wichtungsfaktor (56).

Grundsätzlich sind die Auswirkungen einer Strahlenexposition nicht gänzlich vorhersehbar. Aus diesem Grund sollte gemäß dem ALARA-Prinzip die Exposition so gering wie möglich sein.

6.5 Zeitprofil vergangener Ground Level Enhancements

Eine direkte Korrelation zwischen Anstiegszeit und Halbwertsbreite kann angenommen werden (Kapitel „5. Ergebnisse“). Damit kann ebenfalls die H1 Hypothese, die annimmt, eine kurze Anstiegszeit habe auch eine kurze Halbwertszeit zur Folge, angenommen werden. In anderen Studien, die ähnliche Fragestellungen untersuchten, konnte eine näherungsweise Korrelation beobachtet werden. Es wird von einer zwei- bis dreifach längeren Abklingzeit im Vergleich zur Anstiegszeit ausgegangen (117). Die Anstiegszeit wird in der Studie von Musset et al. zwischen 6 Minuten und 3 Stunden angegeben (117). Das kann in der hier durchgeführten Untersuchung nur eingeschränkt bestätigt werden (Tabelle 11). In der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchung wurde der erste Wert des 5-Minutenintervalls als Beginn gewählt. Musset et al. definieren den Beginn eines GLE an den Zeitpunkt, an dem der Teilchenfluss um drei Standardabweichungen höher ist im Vergleich zur Hintergrunddosis (117). Der erwartbare Verlauf eines GLE wird anhand einer Weibull-Verteilung beschrieben (117). Die

meisten der untersuchten GLEs folgen entsprechend dem Verlauf dieser Verteilung, die nach einem steilen Anstieg eine längere Abstiegsphase zeigt. Eine Ausnahme stellt das GLE 59 vom 14. Juli 2000 dar. Hier wird diskutiert, durch welche Faktoren dieses GLE moduliert wurde. Es wird angenommen, dass ein Zusammenhang zwischen der Lokalisation nahe einer Parker-Spirale und dem GLE Auswirkungen auf den Verlauf hat (117). Eine Parker Spirale beschreibt die Form des interplanetaren Magnetfelds, welches von der Sonne ausgeht und sich durch eine Wellenform auszeichnet (118). Das Verhältnis des 50 %-Punktes (x_1) der Anstiegszeit zu dem 50 %-Punkt (x_2) der Abklingzeit wird mit unterschiedlichen Werten in Studien angegeben: Strauss et al. errechneten ein Verhältnis von 3,5 (119). Musset et al. geben ein Verhältnis von 2,7 an (117). Die Werte wurden auf unterschiedliche Weise berechnet. Daher ist eine Abweichung der Werte zu erwarten. Musset et al. untersuchten die Zählrate der Neutronen. Dafür wurde die Zählrate mit dem auf Meeresspiegelhöhe vorhandenen Luftdruck verrechnet, um eine Vergleichbarkeit der Werte herzustellen. In der hier durchgeführten GLE-Untersuchung wurde der prozentuale Zuwachs des Teilchenflusses untersucht. Auch untersuchten Musset et al. nur 23 GLEs, die eine um 10 % höhere Zählrate im Vergleich zur Hintergrunddosis zeigten. In dieser Untersuchung wurden 31 der aufgezeichneten GLEs ausgewertet.

Die Spitzenintensität eines GLE wird meistens nach unter einer Stunde erreicht, oftmals sogar in weniger als 20 Minuten (117). Die Untersuchungen der GLEs in dieser Arbeit zeigen eine Korrelation zwischen Anstiegszeit und Abklingzeit. Der Korrelationskoeffizient von 0,7 weist auf eine deutliche Beziehung zwischen Dauer der Anstiegszeit und Dauer der Halbwertsbreite hin.

Vorhersagen über den wahrscheinlichen Verlauf eines GLEs können, nachdem der Höhepunkt erreicht worden ist, getroffen werden, denn dann steht die Anstiegszeit fest (117). Das bedeutet, dass eine Vorhersage erst während der Abklingphase getroffen werden kann, und bedeutet somit einen zeitlichen Verzug. Wichtig hierfür ist die Lokalisierung des Neutronenmonitors, der den stärksten Teilchenfluss misst, um auch eine Aussage zur Lokalisation der stärksten Auswirkungen des GLEs treffen zu können.

In manchen Fällen beeinflussen Antikorrelationen zwischen der Anstiegszeit und der Halbwertsbreite den Verlauf eines GLEs. In diesem Fall spielen vor allem die Sonnenaktivität und der interplanetare Transport eine bedeutende Rolle und sollten bei der Vorhersage zum erwarteten Verlauf des GLEs mit einbezogen werden (117). Auch in

dieser Arbeit konnte eine Antikorrelation für die GLEs 25, 27, 28, 39, 40, 41 und 53 gezeigt werden.

6.6 Die Anpassung der Flugdurchführung am Beispiel von vulkanischer Asche

Besonders eindrücklich in Bezug auf den europäischen Luftverkehr war in diesem Zusammenhang 2010 der Ausbruch des isländischen Vulkans Eyjafjallajökull, welcher zu erheblichen Einschränkungen im Flugverkehr führte (120). Die Anpassungen der Flugdurchführung an einen Vorfall werden im Folgenden am Beispiel von vulkanischen Aschewolken gezeigt. Ein Ground Level Enhancement stellt nicht die gleiche Art Ereignis dar. Es kann dennoch hilfreich sein, eine Flugdurchführungsanpassung anhand des Beispiels von vulkanischer Asche zu zeigen. In diesem Fall ist die Cockpitbesatzung mit besonderen Herausforderungen konfrontiert, die spezielle Maßnahmen erfordern, um die Sicherheit des Fluges zu gewährleisten. An erster Stelle steht eine direkte Reaktion auf entstehende Aschewolken. Das kann die Umleitung oder Verzögerung des Fluges sein. Die Cockpitbesatzung erhält regelmäßige Informationen von Flugverkehrsleitstellen und Meteorologen über Vulkanasche in der Atmosphäre. Bei Bedarf können sie entscheiden, den Flug umzuleiten oder zu verzögern, um sicherheitsrelevante Gebiete zu meiden. Die Besatzung arbeitet eng mit Fluglotsen zusammen, um sicherzustellen, dass der Flug sicher durchgeführt werden kann. Dies kann auch Koordinationen für eine sichere Landung oder Umleitung beinhalten.

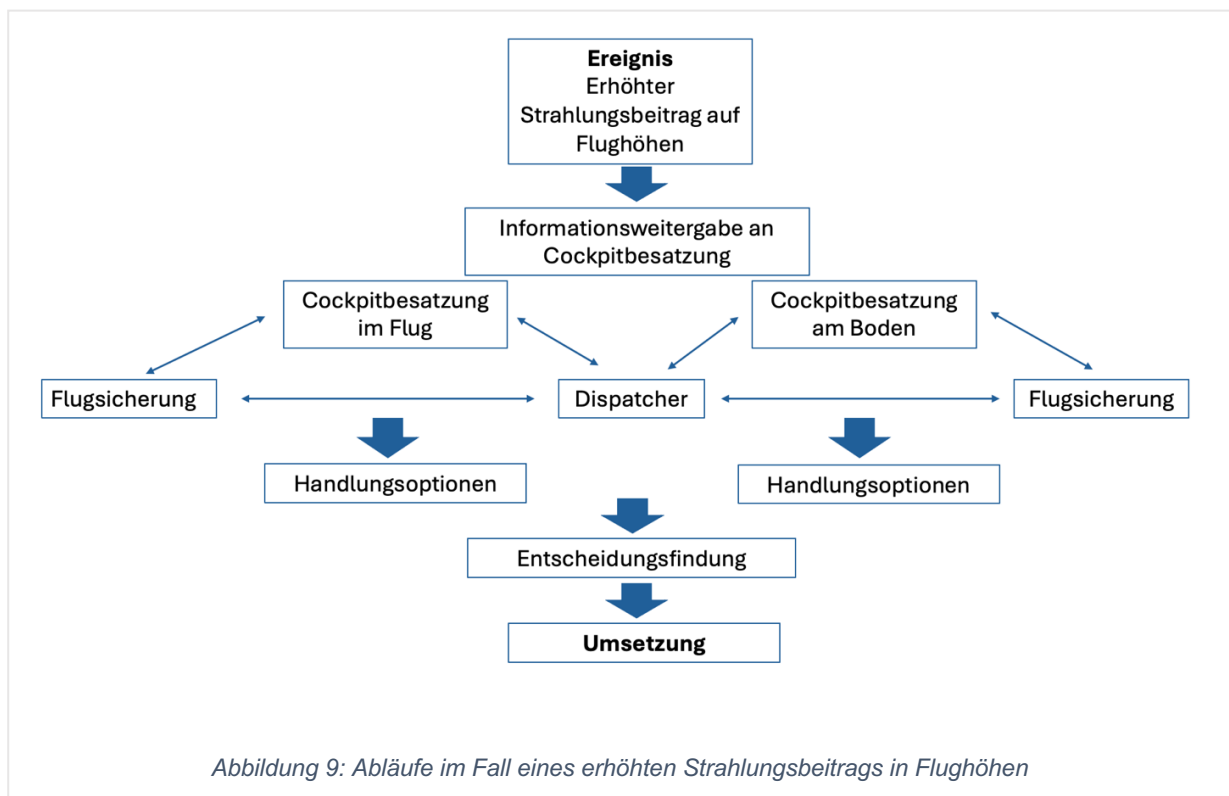
Eine weitere Möglichkeit bietet die Anpassung der Flughöhe. Die Crew kann die Flughöhe anpassen, um Vulkanaschewolken zu umgehen. Vulkanasche kann sich in unterschiedlichen Höhen in der Atmosphäre ausbreiten. Eine Änderung der Flughöhe kann dazu beitragen, die Gefahr zu minimieren. Grundlegend ist die ständige Kommunikation mit den Bodenstationen und auch mit anderen Flugzeugen. Die Besatzung erhält auch Anweisungen und Freigaben, um sicher durch den Luftraum zu navigieren. Im beispielhaften Fall von Vulkanasche ist der Schutz der Triebwerke von besonderer Bedeutung. Dieser Umstand muss im Fall eines GLE nicht beachtet werden. Bei Sichtung oder Verdacht von Vulkanasche in der Nähe kann die Besatzung entsprechende Notverfahren einleiten, wie zum Beispiel das Ändern der Triebwerksleistung, um mögliche Schäden zu minimieren. Für die zivile Luftfahrt und vor allem die Durchführung von Passagierflügen ist die Informationsweitergabe an die Crew und Passagiere für die fluginterne Sicherheit ein wichtiger Faktor. Idealerweise informiert die

Cockpitbesatzung die Crew und die Passagiere über die aktuelle Situation und die getroffenen Maßnahmen. Klarheit und Transparenz sind entscheidend, um Panik zu vermeiden.

Vulkanische Aschewolken sind Ereignisse, die sofortiger Maßnahmen bedürfen. Ähnlich könnte es sich im Fall starker GLEs verhalten. Kommt es zu einer erhöhten Strahlenbelastung auf Flughöhen, muss die Cockpitbesatzung im Hinblick auf die erhöhte Exposition informiert werden. Um die Cockpitbesatzung zu informieren, müssen die zuständigen wissenschaftlichen Experten zuvor den Flugbetrieb der jeweiligen Airline informieren. Das kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen. Beispielsweise durch ein automatisches Informationsweiterleitungssystem.

Anschließend sollten die Echtheit und Relevanz beurteilt werden. Wie im Kapitel 3.1.6 „Warnsysteme“ beschrieben, ist eine Warnmeldung durch erhöhte Strahlungsbeiträge nicht zwingend für die Exposition auf Flughöhen relevant.

Für die anschließende Entscheidungsfindung ist die derzeitige Lokalisation wichtig. Befindet sich das Flugzeug noch am Boden oder bereits seit einiger Zeit im Reiseflug? Für die jeweiligen Szenarien werden im Kapitel 6.7 „Handlungsoptionen“ verschiedene Möglichkeiten als Reaktion im Sinne einer Flugdurchführungsanpassung gegeben. Letztendlich trifft die Entscheidung die Cockpitbesatzung in Absprache mit dem zuständigen Flugbetrieb und der Flugsicherung (Abbildung 9).



6.7 Handlungsoptionen

Für die Entwicklung und Durchführung von Handlungsoptionen im Fall eines erhöhten Strahlungsbeitrags auf Flughöhen sind die Weitergabe von Weltraumwetterinformationen und die Übermittlung an die Flugbetriebe essenziell (121,122).

Im Falle eines erhöhten Strahlungsbeitrags kann von Experten eine Einschätzung zum erwarteten Verlauf eines GLEs gegeben werden. Zusätzlich wäre es wünschenswert, eine Einschätzung zu erlangen, ob nach einem Event weitere GLEs innerhalb eines engeren Zeitintervalls zu erwarten sind. Anpassungsmaßnahmen können dementsprechend in kurzfristige Reaktionen und längerfristige Reaktionen unterteilt werden. Der wichtigste Aspekt ist hierbei der Zeitpunkt innerhalb der Flugdurchführung. Befindet sich das Flugzeug am Boden oder bereits in der Luft? Lohnt es sich, zum Heimatflughafen zurückzukehren, oder befindet sich das Flugzeug bereits seit einiger Zeit im Reiseflug?

Den Anpassungsmaßnahmen steht die konservativste Maßnahme entgegen, die Annullierung des Fluges (122). Die meisten GLEs machen Flugdurchführungsanpassungen nur für einen Zeitraum von einigen Stunden erforderlich (122). Vor dieser Annahme ist eine Annullierung eines Fluges eventuell nicht zwingend erforderlich. In den meisten Fällen würde eine Anpassung der Flugdurchführung eine bessere Handlungsoption bieten.

Daher wurden verschiedene Handlungsoptionen bereits untersucht und Einschätzungen hinsichtlich der damit verbundenen wirtschaftlichen Auswirkungen beschrieben (121,122). Eine als kurzfristige Reaktion mögliche Anpassung ist die Verringerung der Flughöhe. Die meisten Langstreckenflugzeuge nutzen Flughöhen zwischen 30 000 ft (FL 300) und 40 000 ft (FL 400). FL steht hier für Flight Level. Die Verringerung der Flughöhe auf 20 000 ft (FL 200) wird als unrealistisch eingeschätzt, da meteorologische Bedingungen und der Treibstoffverbrauch die Flugdurchführung unmöglich machen (122). Die geringste durchführbare Flughöhe ist unter anderem abhängig vom Flugzeugtyp. Im Fall eines Airbus 330 ist der FL 280 (28 000 ft, 8 500 m) die geringste Höhe (121). Wird die Flughöhe verringert, erhöht sich entsprechend der Treibstoffverbrauch. In diesem Zusammenhang besteht immer eine Diskrepanz zwischen Wirtschaftlichkeit und Reduktion der Strahlenbelastung. Würde neben der Flughöhe auch die Geschwindigkeit reduziert werden, könnte der Treibstoffverbrauch gesenkt

werden. Allerdings käme es dann zu zusätzlichen Kosten aufgrund von Flugverspätungen. Über dieser Problematik steht grundsätzlich das Gebot des ALARA-Prinzips, die Strahlenbelastung so gering wie möglich zu halten. Anpassungen der Flughöhe können zu erhöhten Kosten für die Fluggesellschaften führen. Wäre beispielsweise während des GLE 69 bei einem Flug von New York nach Tokyo über die gesamte Flugzeit hinweg die Flughöhe auf den FL 300 angepasst worden, beliefen sich die zusätzlichen Kosten auf mehrere zehntausend US Dollar, wenn die unter Normalbedingungen geplante Geschwindigkeit geflogen worden wäre (122). Da meistens kürzere Anpassungen für die Dosisreduzierung während eines GLEs ausreichen, kann diese Berechnung als Grenzfall angesehen werden (122).

Untersuchungen des GLE 70 zeigten, dass die Exposition während eines GLE einer Anisotropie zugrunde liegt (121). Mit Anisotropie ist in diesem Fall die geographische Verteilung der eintreffenden Strahlung gemeint. Zu Beginn des GLE 70 wurden vor allem in östlichen Längengraden hohe Teilchenflüsse aufgezeichnet. 30 Minuten später waren die erhöhten Teilchenflüsse auch an den anderen Neutronenmonitoren messbar (123). Es kann davon ausgegangen werden, dass das anisotrope Verhalten der Teilchenflüsse am Boden näherungsweise der Exposition auf Flughöhen entspricht (121).

Fluggesellschaften berechnen grundsätzlich die Treibstoffmenge mit einer zusätzlichen Reserve von 5 % (121). Diese Reserve kann das Ansteuern eines Ausweichflughafens ermöglichen, der bis zu 200 Seemeilen beziehungsweise 30 Minuten vom ursprünglich geplanten Zielflughafen entfernt liegt (121). Die optimale Geschwindigkeit, mit der ein Langstreckenflugzeug im Reiseflug unterwegs ist, liegt zwischen 0,81 und 0,82 Mach (121). Anpassungen der Flugroute, die auf die 5 % Reservetreibstoff zurückgreifen, sind als kurzfristige Reaktionen zu betrachten. Es ist möglich, die Flughöhe zu reduzieren und die Machzahl anzupassen oder beizubehalten. Ebenfalls kann die Flughöhe reduziert werden und nach Ende des Ereignisses wieder zur ursprünglichen Flugroute zurückgekehrt werden. Die Entscheidung, ob die Machzahl beibehalten oder angepasst werden soll, hängt von der geplanten Höhenreduktion und von der noch verbleibenden Strecke ab (121). Anhand einer modellhaften Untersuchung ergibt sich die Option, bis zu 42 % effektiver Dosis durch die Höhenreduktion einzusparen, wenn nicht mehr als 5 % Treibstoffreserve verwendet werden (121). Diese

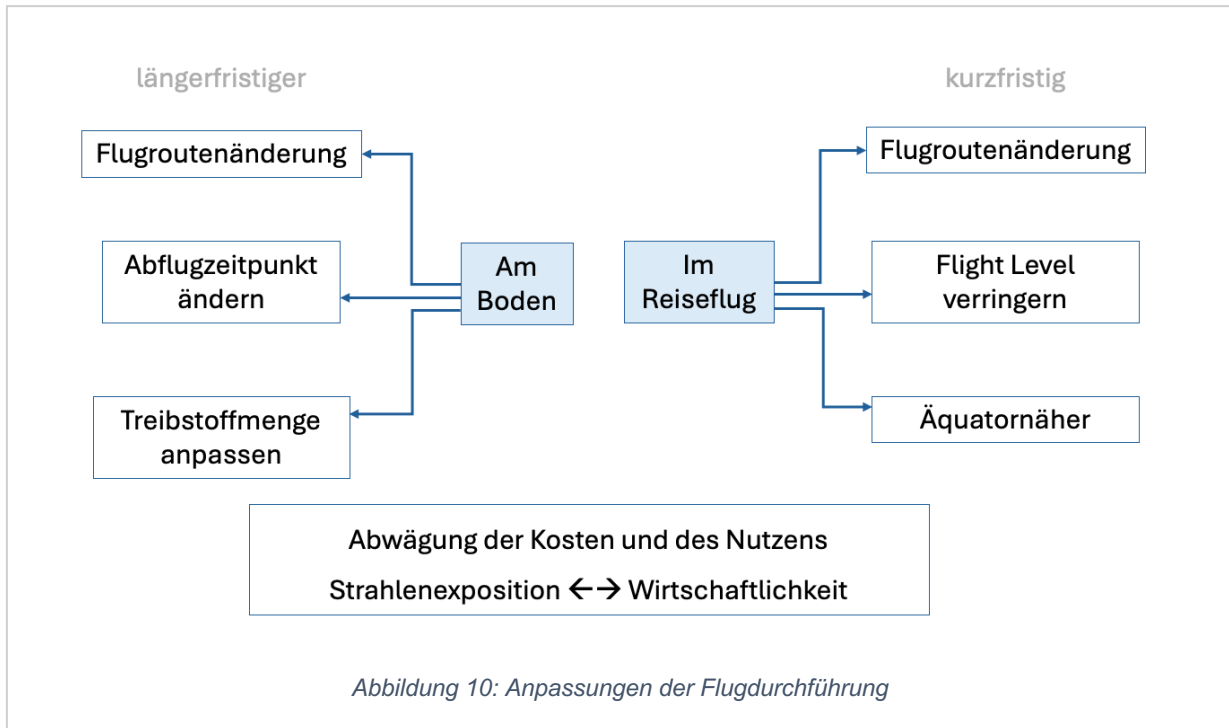
Berechnung wurde am Beispiel des GLE 70 auf einer Route zwischen Köln und Seattle durchgeführt (121).

Neben Anpassungen der Flughöhe ist es auch möglich, die Flugroute anzupassen. Die Strahlenbelastung nimmt von den Polen zum Äquator hin ab. Somit wäre eine Anpassung der Flugroute in äquatornähere Breitengrade denkbar. Flugrouten sind nicht frei anpassbar. Damit die Vielzahl der durchgeführten Flüge reibungslos ablaufen kann, muss der Flugverkehr ständig überwacht werden (122). Es steht bereits die Dynamic Airborne Reroute Procedure zur Verfügung (122). Es handelt sich hierbei um eine Routenanpassung über dem Pazifischen Ozean, welche im Fall von vulkanischer Asche und starken Windverhältnissen genutzt wird (122). Es bleibt zu prüfen, ob diese Anpassungsmöglichkeit auch Verwendung für GLEs finden kann.

Informationen zur aktuellen Weltraumwetterlage und deren Auswirkungen auf die Erde sind verfügbar (121). Im Fall von Störungen des Funkverkehrs ist es möglich, dass die Kommunikation sowohl über den Hochfrequenzfunk als auch über SATCOM eingeschränkt sein kann (122). Viele moderne Flugzeuge sind mit einem Internetzugang ausgestattet, welcher eine Aktualisierung der Flugdaten während des Fluges möglich macht. Es ist möglich, dass im Fall einer Funkverkehrsstörung auch eine Störung der Internetnutzung auftritt. Daher ist es notwendig, möglichst frühzeitig Informationen an die Cockpitbesatzung zu übermitteln. Die Übermittlung kann beispielsweise über ACARS durchgeführt werden (121).

Zu den langfristigen Reaktionen gehören Anpassungen, die durchgeführt werden, bevor das Flugzeug den Boden verlässt. Ist bekannt, dass es zu erhöhten Strahlungsbeiträgen kommt, könnten Flüge später starten. Auch kann schon im Voraus eine Routenanpassung stattfinden und die Treibstoffmenge entsprechend angepasst werden. Es muss beachtet werden, dass auch die langfristigen Reaktionen wirtschaftliche Auswirkungen haben.

Zusammenfassend sollte in Bezug auf Handlungsoptionen eine Optimierung des zwischen Flugroutenoptimierung, Echtzeitwetterlage und dem Informationsfluss an die Cockpitbesatzung stattfinden (Abbildung 10). Nur dann ist es möglich, die wirtschaftlichen Auswirkungen und die gesundheitlichen Auswirkungen für die Crew und die Passagiere so gering wie möglich zu halten.



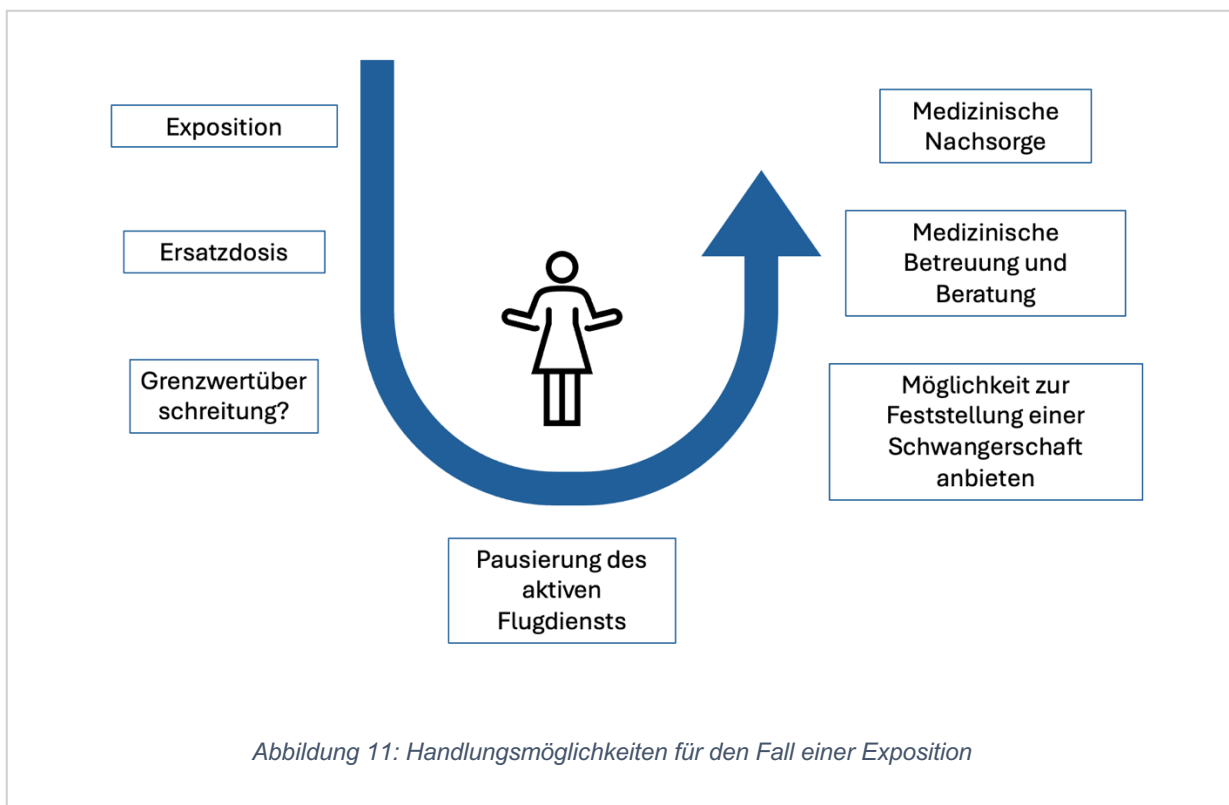
6.8 Offene Fragen

Um Vorschläge für eine praktische Umsetzung von Strahlenschutzmaßnahmen während eines Ground Level Enhancements entwickeln zu können, bleiben einige Fragen ungeklärt. Es ist bisher kein standardisiertes Verfahren zur Umsetzung von Strahlenschutzmaßnahmen in Bezug auf Flugdurchführungsanpassungen etabliert worden. Besonders das Management der Koordination des Luftraumes, wenn zahlreiche Flugzeuge einer Kursänderung bedürfen, stellt eine Herausforderung dar. Derzeit erscheinen vor allem Anpassungen wie am Beispiel von vulkanischer Asche als eine umsetzbare Lösung. Auch ist nicht ausreichend geklärt, auf welchem Weg die Cockpitbesatzung aktuelle Informationen hinsichtlich Beginns und Endes der einzuleitenden Maßnahmen erhält. Fallen Hochfrequenzfunk, SATCOM und ACARS aus, stehen wenige bis keine Informationswege zur Verfügung. Neben den verschiedenen Informationswegen stehen auch verschiedene Quellen in Bezug auf Weltraumwetterinformationen zur Verfügung. Die Relevanz dieser Informationen und deren Anwendbarkeit in Flughöhen müssen jeweils geprüft werden (7).

In Bezug auf Flugdurchführungsanpassungen muss eine Airline mit erhöhten Kosten rechnen. Um diese so gering wie möglich zu halten, ist es notwendig, Strategien für einen sinnvollen Umgang mit Weltraumwetterinformationen zu schaffen. Auch bleibt

zu prüfen, ob eine Versicherung eine mögliche finanzielle Entlastung für eine Fluggesellschaft bieten kann.

Sollte es zu einer erhöhten Exposition in Flughöhen kommen, bei der ein Grenzwert überschritten würde, sind bisher keine standardisierten Behandlungs- und Überwachungsabläufe etabliert. Es ist sinnvoll einer gebärfähigen Frau, die einer Grenzwertüberschreitung ausgesetzt wurde, die Möglichkeit zu bieten festzustellen, ob eventuell eine Schwangerschaft vorliegt. Grundsätzlich ist es sinnvoll, die Höhe der Dosis festzustellen, der die Frau ausgesetzt war. Für die Festlegung der zusätzlichen Dosis durch ein Ground Level Enhancement ist es möglich, eine Ersatzdosis festzulegen (6). Das bietet zwar lediglich eine postexpositionelle Maßnahme, ist jedoch für die Einschätzung der möglichen Auswirkungen und die Planung der weiteren Einsatzfähigkeit der Betroffenen notwendig (Abbildung 11). In Deutschland unterliegen beruflich exponierte Personen einer Überwachung der effektiven Dosis, die durch die Fluggesellschaften an das Luftfahrtbundesamt übermittelt wird (34). Im Fall einer Grenzwertüberschreitung sollte eine eventuell schwangere Frau medizinisch betreut und beraten werden. Es könnte eine Aufklärung über eventuell erwartbare Fehlbildungen und deren Auftretenswahrscheinlichkeit thematisiert werden.



Zusammenfassend ist festzustellen, dass eine Diskrepanz zwischen den möglichen Informationsquellen, den zur Verfügung stehenden relevanten Informationen sowie der Etablierung der aus wissenschaftlicher Sicht möglichen Maßnahmen in den Fliegeralltag besteht.

Es wurde deutlich, dass für eine zukünftige sichere Flugdurchführung während erhöhter Strahlenbelastungen durch Ground Level Enhancements in Flughöhen eine enge Zusammenarbeit zwischen Vertretern der Fluggesellschaften, den zuständigen Behörden und den wissenschaftlichen Experten unabdingbar ist.

7. Zusammenfassung

Galaktisch kosmische und solare kosmische Strahlung tragen zum Strahlungsfeld in Flughöhen bei. Fliegendes Personal ist einem ständigen Beitrag der Höhenstrahlung ausgesetzt.

Durch Veränderungen des interplanetaren Mediums, kann es zu Sonnenstürmen kommen, die Auswirkungen auf das Strahlungsfeld auf der Erde haben. Sind die Auswirkungen stark genug, kann es zu messbar erhöhten Teilchenflüssen am Erdboden kommen. Die erhöhten Teilchenflüsse werden vor allem durch Neutronen generiert. Erhöhte Neutronenflüsse ab bestimmten Schwellenwerten werden Ground Level Enhancements genannt. Ground Level Enhancements können zu erhöhten Expositionen in Flughöhen führen.

Es ist nicht auszuschließen, dass der Strahlungsbeitrag durch kosmische Strahlung in Flughöhen so hoch ausfällt, dass Grenzwerte überschritten werden können. Besonders der Grenzwert für die Organäquivalentdosis des Uterus gebärfähiger Frauen, der im deutschen Strahlenschutzgesetz verankert ist, wäre ein möglicher zu überschreitender Wert. Bei diesem Grenzwert handelt es sich um eine besondere Schutzmaßnahme, mit der ungeborenes Leben vor dem schädlichen Einfluss durch Strahlung geschützt werden soll.

Um die Relevanz dieser Schutzmaßnahmen beurteilen zu können, wurden in dieser Dissertation zwei Fragestellungen durch Literaturrecherchen beantwortet. Die Höhe der Exposition des Ungeborenen im Reiseflug spielt vor allem im Hinblick auf deren Ermittlung eine Rolle. Es konnte festgestellt werden, dass die Dosis des Ungeborenen näherungsweise der effektiven Dosis der Mutter gleichzusetzen ist. Hier spielen vor allem die Expositionsdauer, die Flughöhe und die Flugroute eine Rolle. Die zweite Fragestellung befasst sich mit der Ermittlung der Einschätzung der Auswirkungen von Strahlung auf ungeborenes Leben. Schäden wurden in epidemiologischen Studien erst ab 100 mSv beobachtet. Dennoch darf die Auswirkung stochastischer Strahlenschäden ohne Schwellendosis nicht vernachlässigt werden.

Um Handlungsoptionen zu entwickeln, sind Kenntnisse zum erwartbaren Verlauf eines Ground Level Enhancements notwendig. Aus diesem Grund wurden 31 Ground Level Enhancements untersucht. Es konnte ein Zusammenhang zwischen Anstiegszeit und Halbwertsbreite festgestellt werden.

Anpassungen der Flugdurchführung können im Falle eines GLEs als Handlungsoptionen dienen. Hier sind vor allem die Anpassung der Flugroute und die Anpassung der Abflugzeit sinnvolle Maßnahmen zur Reduktion der Dosis.

Vor allem vor dem Hintergrund der besonders schutzbedürftigen Personengruppe ungeborener Kinder setzen die meisten Fluggesellschaften ihr Personal nach Anzeige einer Schwangerschaft nicht mehr im aktiven Flugdienst ein. Dennoch wird eine Schwangerschaft im frühen Stadium nicht immer erkannt. Diese Dissertation hat die Aufgabe, einen Überblick über die Notwendigkeit zur Etablierung geeigneter Verfahren zum Schutz der Flugzeugbesatzung und eventuell exponierter Ungeborener während Ground Level Enhancements zu ermöglichen.

8. Anhang

Im Anhang werden grundlegende Begriffe des Strahlenschutzes erklärt. Für das Verständnis der vorgestellten Studien sind Kenntnisse hinsichtlich der Definitionen dieser Begriffe notwendig.

8.1 Dosisbegriffe

Um physikalische Größen für den Strahlenschutz nutzbar zu machen, wurden verschiedene Begriffe definiert. In diesem Kapitel werden einige relevante Begriffe vorgestellt.

8.1.1 Linearer Energietransfer

Wenn energiereiche Strahlung auf Materie trifft, wird ein Anteil der Energie an die Materie abgegeben. Der Vorgang der Energieübertragung wird linearer Energietransfer genannt und ist definiert als abgegebene Energie pro Strecke. Die Einheit hierfür ist Elektronenvolt pro Mikrometer (Tabelle 12). Der lineare Energietransfer (LET) wird durch die Anzahl der pro Strecke produzierten Ionen gemessen. Es wird zwischen High-LET Strahlung und Low-LET Strahlung unterschieden. High-LET Strahlung erzeugt pro Strecke deutlich mehr Ionen als Low-LET Strahlung. Allerdings dringt High-LET Strahlung weniger tief in die Materie ein (1). Das zeigt auch, dass α -Strahlung bereits durch ein Blatt Papier abgeschirmt werden kann, wohingegen Röntgenstrahlung eine deutlich größere Eindringtiefe hat und nur mit Blei oder Ähnlichem abgeschirmt werden kann (56). Allerdings erzeugt α -Strahlung mehr Ionen pro Strecke und hat daher eine höhere Potenz, Schäden zu erzeugen, im Vergleich zu Low-LET Strahlung.

Tabelle 12: Low- und High-LET Strahlung (modifiziert nach (77))

Strahlungsintensität	Art der Strahlung	Linearer Energietransfer (in Wasser)
Low-LET Strahlung	β- Strahlung γ- Strahlung Röntgenstrahlung	≈ 0,25 keV/μm
High-LET Strahlung	Protonenstrahlung Neutronenstrahlung α-Strahlung	≈ 40 keV/μm ≈ 40 keV/μm ≈ 200 keV/μm

8.1.2 Messgrößen

Energiedosis

Verschiedene Messgrößen sind notwendig, um die Höhe einer Exposition und deren Auswirkungen einschätzen zu können. Die Energiedosis (D) wird grundsätzlich als die Menge ionisierender Strahlung in Materie definiert. Sie ist abhängig vom Absorbermaterial und wird in der Einheit Gray [Gy] gemessen. 1 Gray entspricht 1 Joule/Kilogramm. Dem menschlichen Gewebe kommt als Absorbermaterial Wasser am nächsten (56).

$$D = \frac{d_{\text{Energie}}}{d_{\text{Masse}}} \quad [\text{Gy}] \quad (56)$$

Äquivalentdosis

Um eine für den Strahlenschutz tauglichere Größe zu definieren, wurde die Äquivalentdosis eingeführt. Sie berücksichtigt nicht nur die Energiedosis, sondern bezieht auch einen Strahlungs-Wichtungsfaktor ($q_{(LET)}$) mit ein. Sie dient vor allem als Messgröße bei Dosismessungen. Die Äquivalentdosis wird in Sievert [Sv] gemessen. 1 Sievert entspricht 1 Joule/Kilogramm (56).

$$H = D \cdot q_{(LET)} \quad [Sv] \quad (56)$$

Umgebungsäquivalentdosis

Von der Äquivalentdosis lässt sich die Umgebungsäquivalentdosis ($\dot{H}^*(10)$) ableiten. Sie eignet sich besonders dazu, das Strahlungsfeld auf Flughöhen einschätzen zu können. Auch die Dosisrate in Flughöhen lässt sich durch die Umgebungsäquivalentdosis erfassen. Sie wird als Umgebungsäquivalentdosisrate ($\dot{H}^*(10)$) bezeichnet. Sie wird in Sievert pro Stunde [Sv/h] angegeben. Auch die jeweilige Flugdosis ist über die Umgebungsäquivalentdosisrate im Intervall vom Zeitpunkt des Abflugs (t_0) bis zum Zeitpunkt der Landung (t_1) unter Berücksichtigung des Strahlungsfeldes auf der jeweiligen Flughöhe zu berechnen (126). d bezeichnet hierbei jeweils die Dauer („duration“) des Parameters.

$$\dot{H}^*(10) = \frac{dH^*(10)}{dt} \quad [Sv/h] \quad (126)$$

$$H^*(10) = \int_{t_0}^{t_1} \dot{H}^*(10)(t) dt \quad [Sv] \quad (126)$$

Effektive Dosis

Die effektive Dosis (E_d) ermöglicht eine Einschätzung der Exposition auf den Menschen und ist somit für den Strahlenschutz eine der relevantesten Dosisgrößen. Sie ist definiert als Energiedosis ($D_{T,R}$) multipliziert mit dem jeweiligen Gewebe-Wichtungsfaktor (ω_T) und dem Strahlungs-Wichtungsfaktor (ω_R). Nicht alle Gewebstypen reagieren gleich empfindlich auf ionisierende Strahlung, daher wurden von der International Commission of Radiological Protection Faktoren für die Einschätzung der Strahlungsempfindlichkeit veröffentlicht. Auch haben nicht alle Strahlungsarten den gleichen Einfluss auf die bestrahlte Materie. Aus diesem Grund gibt es auch für verschiedene Strahlungsarten Strahlungs-Wichtungsfaktoren (Kapitel 3.3.1 „International Commission of Radiological Protection“) (77).

$$E_d = \sum \omega_T \cdot \omega_R \cdot D_{T,R} \quad [Sv] \quad (56)$$

9. Literaturverzeichnis

1. Matthiä D. The Radiation Environment in the Lower Atmosphere - A Numerical Approach. 2009.
2. Matthiä D, Meier MM, Reitz G. Numerical calculation of the radiation exposure from galactic cosmic rays at aviation altitudes with the PANDOCA core model. *Space Weather*. 2014;12(3):161–71.
3. Meier MM, Copeland K, Klöble KEJ, Matthiä D, Plettenberg MC, Schennetten K, u. a. Radiation in the Atmosphere—A Hazard to Aviation Safety? *Atmosphere*. Dezember 2020;11(12):1358.
4. Hubert G, Aubry S. Study of the Impact of Past Extreme Solar Events on the Modern Air Traffic. *Space Weather*. 1. April 2021;19.
5. Kim MHY, Cucinotta FA, Wilson JW. Mean occurrence frequency and temporal risk analysis of solar particle events. *Radiat Meas*. 1. Oktober 2006;41(9):1115–22.
6. Klöble KEJ. Gesprächsprotokoll Webkonferenz 22.07.2021. 2021.
7. Meier MM, Matthiä D. A space weather index for the radiation field at aviation altitudes. *J Space Weather Space Clim*. 2014;4:A13.
8. Benton ER, Benton EV. Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B Beam Interact Mater At*. 1. September 2001;184(1):255–94.
9. Blasi P. The origin of galactic cosmic rays. *Astron Astrophys Rev*. 5. November 2013;21(1):70.
10. O'Brien K, Friedberg W, Sauer HH, Smart DF. Atmospheric cosmic rays and solar energetic particles at aircraft altitudes. *Environ Int*. 1. Januar 1996;22:9–44.
11. Baker DN, Kanekal SG, Li X, Monk SP, Goldstein J, Burch JL. An extreme distortion of the Van Allen belt arising from the 'Hallowe'en' solar storm in 2003. *Nature*. Dezember 2004;432(7019):878–81.
12. Lewis BJ, Bennett LGI, Green AR, Butler A, Desormeaux M, Kitching F, u. a. Aircrew dosimetry using the predictive code for aircrew radiation exposure (PCAIRE). *Radiat Prot Dosimetry*. 20. Dezember 2005;116(1–4):320–6.
13. Sarkar R, Chakrabarti SK, Pal PS, Bhowmick D, Bhattacharya A. Measurement of secondary cosmic ray intensity at Regener-Pfotzer height using low-

- cost weather balloons and its correlation with solar activity. *Adv Space Res.* 1. September 2017;60(5):991–8.
14. Tobiska WK, Didkovsky L, Judge K, Weiman S, Bouwer D, Bailey J, u. a. Analytical Representations for Characterizing the Global Aviation Radiation Environment Based on Model and Measurement Databases. *Space Weather.* 2018;16(10):1523–38.
 15. Frasch G, Kammerer L, Karofsky R, Schlosser A, Spiesl J, Stegemann R. Die berufliche Strahlenexposition des fliegenden Personals in Deutschland 2004 - 2009 : Bericht des Strahlenschutzregisters. August 2011 [zitiert 23. November 2022]; Verfügbar unter: <https://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-201108016029>
 16. Federico CA, Gonçalez OL, Caldas LVE, Pazianotto MT, Dyer C, Caresana M, u. a. Radiation measurements onboard aircraft in the South Atlantic region. *Radiat Meas.* 1. November 2015;82:14–20.
 17. Biswas A, Karak BB, Usoskin I, Weisshaar E. Long-Term Modulation of Solar Cycles. *Space Sci Rev.* 17. März 2023;219(3):19.
 18. Miyake F, Masuda K, Nakamura T. Lengths of Schwabe cycles in the seventh and eighth centuries indicated by precise measurement of carbon-14 content in tree rings. *J Geophys Res Space Phys.* 2013;118(12):7483–7.
 19. University of Oulu. Oulu Cosmic Ray Station [Internet]. 2023 [zitiert 29. März 2023]. Verfügbar unter: <https://cosmicrays.oulu.fi/>
 20. Clette F, Svalgaard L, Vaquero JM, Cliver EW. Revisiting the Sunspot Number. A 400-Year Perspective on the Solar Cycle. *Space Sci Rev.* 1. Dezember 2014;186:35–103.
 21. NOAA. Coronal Mass Ejections | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center [Internet]. 2023 [zitiert 24. März 2023]. Verfügbar unter: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-mass-ejections>
 22. Curdt W, Inhester B, Krummheuer B. Sonnenstürme und -aktivität: Antworten auf die zehn wichtigsten Fragen [Internet]. 2013 [zitiert 22. November 2022]. Verfügbar unter: https://www.mps.mpg.de/1982135/Frage_4
 23. NASA. Solar Flare [Internet]. 2023. [zitiert 18. November 2022] Verfügbar unter: <https://www.nasa.gov/science-research/heliophysics/nasa-enabled-ai-predictions-may-give-time-to-prepare-for-solar-storms/>
 24. Zheng Y, Ganushkina NY, Jiggins P, Jun I, Meier M, Minow JI, u. a. Space

- Radiation and Plasma Effects on Satellites and Aviation: Quantities and Metrics for Tracking Performance of Space Weather Environment Models. *Space Weather*. 2019;17(10):1384–403.
25. Wrixon AD. New ICRP recommendations. *J Radiol Prot*. Mai 2008;28(2):161.
 26. Poluianov SV, Usoskin IG, Mishev AL, Shea MA, Smart DF. GLE and Sub-GLE Redefinition in the Light of High-Altitude Polar Neutron Monitors. *Sol Phys*. 13. November 2017;292(11):176.
 27. Bartlett D, Beck P, Bottollier-Depois JF, Lindborg L, o'sullivan D, Tommasino L, u. a. Investigation of radiation doses at aircraft altitudes during a complete solar cycle. 28. Februar 2002;477:525–8.
 28. Lantos P. Predictions of Galactic Cosmic Ray Intensity Deduced from that of Sunspot Number. *Sol Phys*. 1. Juli 2005;229(2):373–86.
 29. Lantos P. Radiation doses potentially received on-board aeroplanes during recent solar particle events. *Radiat Prot Dosimetry*. 2006;118(4):363–74.
 30. Lantos P, Fuller N. History of the solar particle event radiation doses on-board aeroplanes using a semi-empirical model and Concorde measurements. *Radiat Prot Dosimetry*. 1. Mai 2003;104(3):199–210.
 31. Lantos P, Fuller N. Semi-empirical model to calculate potential radiation exposure on board airplane during solar particle events. *IEEE Trans Plasma Sci*. August 2004;32(4):1468–77.
 32. NWS Space Weather Prediction Center. Alerts, Watches and Warnings [Internet]. 2023 [zitiert 7. April 2023]. Verfügbar unter: <https://www.swpc.noaa.gov/products/alerts-watches-and-warnings>
 33. NOAA. NOAA Space Weather Scales | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center [Internet]. 2023 [zitiert 12. Juni 2023]. Verfügbar unter: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>
 34. Veith HM. Strahlenschutzgesetz mit Verordnungen. 12. Auflage. Reguvis Fachmedien GmbH; 2021.
 35. Copeland K. CARI-7A: DEVELOPMENT AND VALIDATION. *Radiat Prot Dosimetry*. 1. August 2017;175(4):419–31.
 36. Mertens CJ, Meier MM, Brown S, Norman RB, Xu X. NAIRAS aircraft radiation model development, dose climatology, and initial validation. *Space Weather*. 2013;11(10):603–35.
 37. Bottollier-Depois JF, Blanchard P, Clairand I, Dessarps P, Fuller N, Lantos P,

- u. a. An operational approach for aircraft crew dosimetry: the SIEVERT system. *Radiat Prot Dosimetry*. 1. Juli 2007;125(1–4):421–4.
38. Meier MM, Matthiä D. Classification and Communication of Aviation Related Space Weather Radiation Events. 1. Januar 2018;1.
39. Bundesamt für Strahlenschutz. Bundesamt für Strahlenschutz. BfS; [zitiert 21. Juni 2023]. Überwachung des fliegenden Personals. Verfügbar unter: <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/beruf/methodik/fliegendes-personal.html>
40. Trugenberger-Schnabel A. Grundlagen zur Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung in Deutschland [Internet]. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS); 2023 März [zitiert 3. Mai 2023]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.26907/2291-7238.2023032136841>
41. Pershagen G, Akerblom G, Axelson O, Clavensjo B, Damber L, Desai G, u. a. Residential Radon Exposure and Lung Cancer in Sweden. *N Engl J Med*. 20. Januar 1994;330(3):159–64.
42. Petermann E, Bossew P. Mapping indoor radon hazard in Germany: The geogenic component. *Sci Total Environ*. 1. August 2021;780:146601.
43. Bundesamt für Strahlenschutz. Federal Office for Radiation Protection. BfS; [zitiert 3. Mai 2023]. Natural radiation in Germany. Verfügbar unter: <https://www.bfs.de/EN/topics/ion/environment/natural-radiation/natural-radiation.html>
44. Weiland N, Steiner DrM, Grosche B. Gesundheitliche Folgen des Unfalls von Tschernobyl – 30 Jahre danach. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*. 1. September 2016;59(9):1171–7.
45. Bundesamt für Strahlenschutz. Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2019.
46. Yasumura S, Abe M. Fukushima Health Management Survey and Related Issues. *Asia Pac J Public Health*. 1. März 2017;29(2_suppl):29S-35S.
47. Momoshima N. TRITIUM IN THE ENVIRONMENT. *Radiat Prot Dosimetry*. 1. September 2022;198(13–15):896–903.
48. Meier MM, Berger T, Jahn T, Matthiä D, Plettenberg MC, Scheibinger M, u. a. Impact of the South Atlantic Anomaly on radiation exposure at flight altitudes during solar minimum. *Sci Rep*. 8. Juni 2023;13(1):9348.
49. Die Strahlenschutzkommission - Berichte der SSK - Heft 69: Grundlagen zur

- Begründung von Grenzwerten für beruflich strahlenexponierte Personen / Basic principles of determining dose limits for occupationally exposed persons
50. Brenner DJ, Doll R, Goodhead DT, Hall EJ, Land CE, Little JB, u. a. Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: Assessing what we really know. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 25. November 2003;100(24):13761–6.
 51. Richter E, Feyerabend T. Grundlagen der Strahlenwirkung. In: Richter E, Feyerabend T, Herausgeber. *Grundlagen der Strahlentherapie* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer; 1996 [zitiert 7. Mai 2023]. S. 45–89. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-662-00113-4_4
 52. UNSCEAR. UNSCEAR 2000 Report Volume II [Internet]. 2000 [zitiert 7. Mai 2023]. Verfügbar unter: [//www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_2.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_2.html)
 53. Krieger H, Herausgeber. Strahlenwirkung und Strahlenrisiko. In: *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes* [Internet]. Wiesbaden: Teubner; 2007 [zitiert 7. Mai 2023]. S. 433–64. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-8351-9128-0_12
 54. Preston RJ. Radiation effects. *Ann ICRP*. 1. Oktober 2012;41(3–4):4–11.
 55. Die Strahlenschutzkommission - Empfehlungen - Grundlagen zur Begründung von Grenzwerten für beruflich strahlenexponierte Personen
 56. Schulze R. *Lehrbuch zahnärztliches Röntgen : Grundlagen, Technik, Anwendung : Hintergrundinformationen*. 2019 [zitiert 22. November 2022]; Verfügbar unter: <https://openscience.ub.uni-mainz.de/handle/20.500.12030/188>
 57. Streffer C, Shore R, Konermann G, Meadows A, Uma Devi P, Preston Withers J, u. a. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus). A report of the International Commission on Radiological Protection. *Ann ICRP*. 2003;33(1–2):5–206.
 58. Ann. ICRP 35. ICRP Publication 99 Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk. 2005.
 59. Rink H. Die Radiolyse des Wassers. *Chem Unserer Zeit*. 1971;5(3):90–5.
 60. Hiddemann W, Huber H, Bartram CR. *Die Onkologie: Teil 1: Allgemeiner Teil - Epidemiologie - Pathogenese - Grundprinzipien der Therapie. Teil 2: Spezieller Teil - Solide Tumoren - Lymphome - Leukämien*. Springer Berlin Heidelberg; 2004. book.
 61. Olivier M, Hollstein M, Hainaut P. TP53 Mutations in Human Cancers: Origins,

- Consequences, and Clinical Use. *Cold Spring Harb Perspect Biol.* Januar 2010;2(1):a001008.
62. Elmore S. Apoptosis: A Review of Programmed Cell Death. *Toxicol Pathol.* 2007;35(4):495–516.
63. UNSCEAR. UNSCEAR 2019 Report [Internet]. 2019 [zitiert 7. Mai 2023]. Verfügbar unter: [//www.unscear.org/unscear/en/publications/2019.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2019.html)
64. Dreger S, Wollschläger D, Schafft T, Hammer GP, Blettner M, Zeeb H. Cohort study of occupational cosmic radiation dose and cancer mortality in German aircrew, 1960–2014. *Occup Environ Med.* 1. Mai 2020;77(5):285–91.
65. Sanlorenzo M, Wehner MR, Linos E, Kornak J, Kainz W, Posch C, u. a. The Risk of Melanoma in Airline Pilots and Cabin Crew A Meta-analysis. *JAMA Dermatol.* Januar 2015;151(1):51–8.
66. Leitlinienprogramm Onkologie. S3-Leitlinie Prävention von Hautkrebs [Internet]. 2021 [zitiert 8. Mai 2023]. Verfügbar unter: <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/032-052OL>
67. Schennetten K, Meier MM, Scheibinger M. Measurement of UV radiation in commercial aircraft. *J Radiol Prot.* Dezember 2018;39(1):85–96.
68. dos Santos Silva I, De Stavola B, Pizzi C, Evans AD, Evans SA. Cancer incidence in professional flight crew and air traffic control officers: Disentangling the effect of occupational versus lifestyle exposures. *Int J Cancer.* 2013;132(2):374–84.
69. Die Strahlenschutzkommission - Empfehlungen - Band 43 - Berechnungsgrundlage für die Ermittlung von Körper-Äquivalentdosen bei äußerer Strahlenexposition. 2016.
70. Sanlorenzo M, Vujic I, Posch C, Cleaver JE, Quaglino P, Ortiz-Urda S. The Risk of Melanoma in Pilots and Cabin Crew: UV Measurements in Flying Airplanes. *JAMA Dermatol.* April 2015;151(4):450–2.
71. Gilbert ES. Ionizing Radiation and Cancer Risks: What Have We Learned From Epidemiology? *Int J Radiat Biol.* Juni 2009;85(6):467–82.
72. Sugiyama H, Misumi M, Kishikawa M, Iseki M, Yonehara S, Hayashi T, u. a. Skin Cancer Incidence among Atomic Bomb Survivors from 1958 to 1996. *Radiat Res.* April 2014;181(5):531–9.
73. Cadilhac P, Bouton MC, Cantegril M, Cardines C, Gisquet A, Kaufman N, u. a. In-Flight Ultraviolet Radiation on Commercial Airplanes. *Aerosp Med Hum*

- Perform. 1. Oktober 2017;88(10):947–51.
74. Kvaskoff M, Weinstein P. Are some melanomas caused by artificial light? *Med Hypotheses*. 1. September 2010;75(3):305–11.
75. Wirbelauer C. Kataraktformen und Grading. In: Shajari M, Priglinger S, Kohnen T, Kreutzer TC, Mayer WJ, Herausgeber. *Katarakt- und Linsenchirurgie*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2023
76. Asbell PA, Dualan I, Mindel J, Brocks D, Ahmad M, Epstein S. Age-related cataract. *The Lancet*. 12. Februar 2005;365(9459):599–609.
77. Ann. ICRP 37. ICRP Publication 103 The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. 2007.
78. Kagami S, Bradshaw SE, Fukumoto M, Tsukui I. Cataracts in airline pilots: prevalence and aeromedical considerations in Japan. *Aviat Space Environ Med*. September 2009;80(9):811–4.
79. Rafnsson V, Olafsdottir E, Hrafnkelsson J, Sasaki H, Arnarsson A, Jonasson F. Cosmic Radiation Increases the Risk of Nuclear Cataract in Airline Pilots: A Population-Based Case-Control Study. *Arch Ophthalmol*. 1. August 2005;123(8):1102–5.
80. Facius R. No Evidence for the Causation by Cosmic Radiation of Nuclear Cataracts in Pilots. 2006;
81. Paulus WE. Embryologie und Teratologie. In: Schneider H, Husslein P, Schneider KTM, Herausgeber. *Die Geburtshilfe*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2004 https://doi.org/10.1007/978-3-642-18574-8_6
82. Ann. ICRP 30. ICRP Publication 84 Pregnancy and Medical Radiation. 2000.
83. UNSCEAR. UNSCEAR 2013 Report Volume II [Internet]. 2013 [zitiert 7. Mai 2023]. Verfügbar unter: [//www.unscear.org/unscear/en/publications/2013_2.html](https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013_2.html)
84. International Commission on Radiological Protection. ICRP [Internet]. [zitiert 6. Oktober 2022]. Verfügbar unter: https://www.icrp.org/icrp_group.asp?id=189
85. Ann. ICRP 21. ICRP Publication 60 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. 1990.
86. International Civil Aviation Organization. About ICAO [Internet]. [zitiert 15. Mai 2023]. Verfügbar unter: <https://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx>
87. International Civil Aviation Organization. Manual on Space Weather Information in Support of International Air Navigation [zitiert 15. Mai 2023].

- Verfügbar unter: <https://store.icao.int/en/manual-on-space-weather-information-in-support-of-international-air-navigation-doc-10100>
88. Bundesregierung. Die Bundesregierung informiert | Startseite. [zitiert 15. Mai 2023]. Euratom. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/bregde/service#open-615810>
 89. European Society of Radiology (ESR). Summary of the European Directive 2013/59/Euratom: essentials for health professionals in radiology. *Insights Imaging*. 1. August 2015;6(4):411–7.
 90. ICAO European and North Atlantic Office. NORTH ATLANTIC OPERATIONS AND AIRSPACE MANUAL. 2023.
 91. Defense Internet NOTAM Service [Internet]. [zitiert 8. Juni 2024]. Verfügbar unter: <https://www.notams.faa.gov/dinsQueryWeb/>
 92. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, u. a. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 29. März 2021;372:n71.
 93. Higgins JPT, Altman DG, Gøtzsche PC, Jüni P, Moher D, Oxman AD, u. a. The Cochrane Collaboration’s tool for assessing risk of bias in randomised trials. *BMJ*. 18. Oktober 2011;343:d5928.
 94. Nicholas JS, Copeland KA, Duke FE, Friedberg W, O’Brien K. Galactic cosmic radiation exposure of pregnant flight crewmembers. *Aviat Space Environ Med*. Juni 2000;71(6):647–8.
 95. Chen J, Mares V. Estimate of doses to the fetus during commercial flights. *Health Phys*. Oktober 2008;95(4):407–12.
 96. Zwick A, Zwick J. Slew-rate, Anstiegszeit. In: Zwick A, Zwick J, Herausgeber. *Operationsverstärker und Transistoren: Elektronische Schaltungen mit alternativen Methoden dargestellt*. Wiesbaden: Springer Fachmedien; 2022. S. 309–16. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-658-35003-1_14
 97. Morschhäuser D, Fischer W, Jakob M. Praxis der Herzschrittmacher-Nachsorge: Grundlagen, Funktionen, Kontrolle, Optimierung, Troubleshooting. In: Morschhäuser D, Fischer W, Jakob M, Herausgeber. *Praxis der Herzschrittmacher-Nachsorge: Grundlagen, Funktionen, Kontrolle, Optimierung, Troubleshooting*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2019. S. 1–45. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-662-57828-5_1
 98. Dannhäuser G, Wiech G. Bestimmung der wahren Halbwertsbreite der M~-

- Linien der Elemente 38 Sr bis 47Ag. 1971.
99. Python. Python.org. 2023 [zitiert 28. Mai 2023]. Welcome to Python. Verfügbar unter: <https://www.python.org/>
100. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 1988.
101. Chen J, Lewis BJ, Bennett LGI, Green AR, Tracy BL. Estimated neutron dose to embryo and foetus during commercial flight. *Radiat Prot Dosimetry*. 28. Juni 2005;114(4):475–80.
102. Chen J, Meyerhof D, Vlahovich S. Neutron fluence-to-dose conversion coefficients for embryo and fetus. *Radiat Prot Dosimetry*. 1. August 2004;110(1–4):693–8.
103. Taranenko V, Xu XG. Foetal dose conversion coefficients for ICRP-compliant pregnant models from idealised proton exposures. *Radiat Prot Dosimetry*. 1. Januar 2009;133(2):65–72.
104. Stabin MG, Watson EE, Cristy M, Ryman JC, Eckerman KF, Davis JL, u. a. Mathematical models and specific absorbed fractions of photon energy in the nonpregnant adult female and at the end of each trimester of pregnancy. Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States); 1995
105. Alves JG, Mairos JC. In-flight dose estimates for aircraft crew and pregnant female crew members in military transport missions. *Radiat Prot Dosimetry*. 1. Juli 2007;125(1–4):433–7.
106. Krestinina LY, Kharyuzov YE, Epiphanova SB, Tolstykh EI, Deltour I, Schüz J, u. a. Cancer Incidence after In Utero Exposure to Ionizing Radiation in Techa River Residents. *Radiat Res*. Juli 2017;188(3):314–24.
107. Schonfeld SJ, Tsareva YV, Preston DL, Okatenko PV, Gilbert ES, Ron E, u. a. Cancer Mortality Following In Utero Exposure Among Offspring of Female Mayak Worker Cohort Members. *Radiat Res*. September 2012;178(3):160–5.
108. Preston DL, Cullings H, Suyama A, Funamoto S, Nishi N, Soda M, u. a. Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors Exposed In Utero or as Young Children. *JNCI J Natl Cancer Inst*. 19. März 2008;100(6):428–36.
109. Fiebich M, Block A, Borowski M, Geworski L, Happel C, Kamp A, u. a. Prenatal radiation exposure in diagnostic and interventional radiology. *RöFo - Fortschritte Auf Dem Geb Röntgenstrahlen Bildgeb Verfahr*. Juli 2021;193(7):778–86.
110. Miller R, Blot W. SMALL HEAD SIZE AFTER IN-UTERO EXPOSURE TO

- ATOMIC RADIATION. *The Lancet*. 14. Oktober 1972;300(7781):784–7.
111. OTAKE M, SCHULL WJ. Review: Radiation-related brain damage and growth retardation among the prenatally exposed atomic bomb survivors. *Int J Radiat Biol*. 1. Januar 1998;74(2):159–71.
112. Sugiyama H, Misumi M, Sakata R, Brenner AV, Utada M, Ozasa K. Mortality among individuals exposed to atomic bomb radiation in utero: 1950–2012. *Eur J Epidemiol*. 2021;36(4):415–28.
113. Wakeford R. Childhood leukaemia following medical diagnostic exposure to ionizing radiation in utero or after birth. *Radiat Prot Dosimetry*. 1. November 2008;132:166–74.
114. Otake M, Schull WJ. In utero exposure to A-bomb radiation and mental retardation; a reassessment. *Br J Radiol*. Mai 1984;57(677):409–14.
115. Miyake F, Nagaya K, Masuda K, Nakamura T. A signature of cosmic-ray increase in AD 774–775 from tree rings in Japan. *Nature*. Juni 2012;486(7402):240–2.
116. Nicholas JS, Copeland K, Duke FE, Friedberg W, O'Brien K. Galactic Cosmic Radiation Exposure of Pregnant Aircrew Members II. 1. Oktober 2000 Verfügbar unter: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/15400>
117. Musset S, Klein KL, Fuller N, Khreich G, Wargnier A. The time profile of relativistic solar particle events as observed by neutron monitors. *J Space Weather Space Clim*. 2023;13:15.
118. European Space Agency. EASA. 2019 [zitiert 31. Dezember 2023]. Parker spiral. Verfügbar unter: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/03/Parker_spiral
119. Strauss RD, Ogunjobi O, Moraal H, McCracken KG, Caballero-Lopez RA. On the Pulse Shape of Ground Level Enhancements. *Sol Phys*. April 2017;292(4):51.
120. ICAO European and North Atlantic Office. Ash-cloud of April and May 2010: Impact on Air Traffic. 2017;
121. Matthiä D, Schaefer M, Meier MM. Economic impact and effectiveness of radiation protection measures in aviation during a ground level enhancement. *J Space Weather Space Clim*. 2015;5:A17.
122. Saito S, Wickramasinghe NK, Sato T, Shiota D. Estimate of economic impact of atmospheric radiation storm associated with solar energetic particle events

- on aircraft operations. *Earth Planets Space*. 23. Februar 2021;73(1):57.
123. Matthia D, Heber B, Reitz G, Sihver L, Berger T, Meier M. The ground level event 70 on December 13th, 2006 and related effective doses at aviation altitudes. *Radiat Prot Dosimetry*. 2009;136(4):304–10.
124. Delovski T, Werner K, Rawlik T, Behrens J, Bredemeyer J, Wendel R. ADS-B over Satellite The world's first ADS-B receiver in Space. In Porto Petro, Majorca, Spain; 2014. Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/91306/>
125. Matthia D, Meier MM, Schennetten K. New operational dose quantity ambient dose H^* in the context of galactic cosmic radiation in aviation. *J Radiol Prot Off J Soc Radiol Prot*. 8. April 2022;42(2).
126. Meier MM, Matthia D. Assessment of the skin dose for aircrew. *J Radiol Prot Off J Soc Radiol Prot*. 26. Juni 2017;37(2):321–8.

10. Lebenslauf

Persönliche Daten

Name **Klara Elsa Johanne Klöble**
Geburts- 02.04.1995 in Bad Dürkheim
datum/-ort



Ausbildung

Seit 2021 **Studium der Humanmedizin**
an der Albert Ludwigs Universität Freiburg

2022 **Gastzahnärztin**
am Nepal Cleft and Burn Center Kathmandu, Nepal

2015 – 2021 **Studium der Zahnmedizin**
an der Johannes Gutenberg Universität Mainz

2006 – 2014 **Allgemeine Hochschulreife**
am Goethe Gymnasium Bensheim

2013 **Sprachschule**
„La Brisa“ Málaga, Spanien

2009 – 2010 **Schüleraustausch**
Haifa, Israel

2001 – 2006 **Grundschule**
Felsenmeerschule Lautertal

Berufliche Laufbahn

- Seit 2023 **Universitätsklinik Freiburg**
Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie
Weiterbildungsassistentin Oralchirurgie
- 2014 – 2023 **Deutsche Lufthansa AG**
Flugbegleiterin
- 2022 **Praxisklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie Dr. D. Kawa**
Assistenz Zahnärztin
- 2020 – 2021 **Universitätsmedizin Mainz**
Klinik für Mund-, Kiefer-, Gesichtschirurgie
Studentische Hilfskraft
- 2021 **Marienhaus Klinikum Mainz – Klinik für Pneumologie**
Studentische Hilfskraft
- 2020 **Universitätsmedizin Mainz**
Kinderklinik – Hämatologie und Onkologie
Wissenschaftliche Hilfskraft
- 2020 **Universitätsmedizin Mainz – Covid-Prevent-Studie Mainz**
Wissenschaftliche Hilfskraft
- 2018 **Universitätsmedizin Mainz**
Klinik für Allgemein-, Viszeral- und Transplantationschirurgie
Wissenschaftliche Hilfskraft