

Veröffentlichungen
der Strahlenschutzkommission • Band 32

Herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Der Strahlenunfall

Ein Leitfaden für Erstmaßnahmen

2., überarbeitete und aktualisierte Auflage



H. HOFFMANN GmbH – FACHVERLAG, Berlin

Umrechnungstabelle

Curie ↔ Becquerel

Ci → Bq	
kCi	TBq
Ci	GBq
mCi	MBq
μCi	kBq
nCi	Bq
pCi	mBq
1	37
2	74
3	111
4	148
5	185
6	222
7	159
8	296
9	333
10	370

Bq → Ci	
TBq	Ci
GBq	mCi
MBq	μCi
kBq	nCi
Bq	pCi
mBq	fCi
1	27
2	54
3	81
4	108
5	135
6	162
7	189
8	216
9	243
10	270

Beispiel:
2 mCi = 74 MBq

Beispiel:
7 GBq = 189 mCi

Der Strahlenunfall

Veröffentlichungen
der Strahlenschutzkommission • Band 32

Herausgegeben vom Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Der Strahlenunfall

Ein Leitfaden für Erstmaßnahmen



H. HOFFMANN GmbH – FACHVERLAG, Berlin

Redaktion: S. Genkel

Bundesamt für Strahlenschutz
Geschäftsstelle der Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
53048 Bonn

Bibliografische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-87344-139-2

© Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit · 2008

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Satz und Layout: C. Siepenkötter, Bundesamt für Strahlenschutz, Bonn
Druck und Verarbeitung: Chudeck Druck Service, Bornheim
Vertrieb: Verlag H. Hoffmann GmbH, Berlin; Tel.: 033203/305810; Fax.: 033203/305820
Printed in Germany

Vorwort zur 1. Auflage

Die Strahlenschutzkommission (SSK) hat sich im Rahmen ihrer Klausurtagung 1992 mit den medizinischen Maßnahmen bei Strahlenunfällen befasst, wobei insbesondere die medizinischen Fragen des Notfallschutzes bei kern-technischen Unfällen erörtert wurden. Die Vorträge wurden in Band 27 der Schriftenreihe „Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission“ publiziert.

Bei der Auswertung der Klausurtagung gelangte die Strahlenschutzkommission zu dem Ergebnis, dass für medizinische Maßnahmen bei Strahlenunfällen mit wenigen Betroffenen, wie sie beispielsweise in Forschungslabors, in der Industrie und beim Transport radioaktiver Stoffe auftreten können, bisher kein geeigneter aktueller Leitfadens zur Verfügung steht, der auch die speziellen Aspekte der Organisation der Ersten Medizinischen Hilfe in Deutschland berücksichtigt. Hinzu kommt, dass dank des hoch entwickelten Strahlenschutzes in unserem Lande solche Ereignisse extrem selten sind, so dass weder Rettungsärzte noch Mitarbeiter der Hilfsorganisationen in der täglichen Arbeit Erfahrungen im Umgang mit Betroffenen solcher Strahlenunfälle erlangen können.

Aus diesem Grund beauftragte die Strahlenschutzkommission eine Expertengruppe mit der Erstellung eines Leitfadens für Ärzte und Hilfsorganisationen für die Erste Hilfe bei Strahlenunfallverletzten. Der Expertengruppe gehörten Prof. Dr. J. Schütz (Universität Münster), Prof. Dr. D. Arndt (Bundesgesundheitsamt), Dr. B. Bauer (Bundesamt für Strahlenschutz), Prof. Dr. T. M. Fliedner (Universität Ulm), Dr. W. Löster (Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Oberschleißheim), Dr. E. Maintz (Gesundheitsdienst HEW, Hamburg), Dr. H. Miska (Ministerium des Innern und für Sport, Mainz), Dr. H. Pfob (Badenwerke AG, Karlsruhe) und Dr. G. Seitz (Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln) an. Den Mitgliedern der von Prof. Schütz geleiteten Expertengruppe gilt der Dank der SSK für ihre erfolgreiche Arbeit.

Ziel des als Band 32 der Reihe „Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission“ vorliegenden Leitfadens ist es, im Falle eines Unfalls mit Beteiligung offener radioaktiver Stoffe oder umschlossener Strahlenquellen sowie von Einrichtungen, die ionisierende Strahlung aussenden, den Ersthelfern Instruktionen an die Hand zu geben, die den Zeitraum von der Ersten Hilfe bis zur Übergabe an den Arzt mit Kenntnissen im Strahlen-

schutz bzw. Spezialisten regeln. Darüber hinaus soll hiermit auch Material für Ausbildungszwecke zur Verfügung gestellt werden.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wurde der vorliegende Band in zwei Teile gegliedert,

1. den eigentlichen Leitfaden mit den Kapiteln
 - Vorgehensweise bei Strahlenunfällen,
 - Begriffsbestimmungen und Erläuterungen sowie die charakteristischen Angaben für α -, β - und γ -Strahler in medizinischen und industriellen Anwendungen,
2. eine weiterführende Information mit folgenden Themenschwerpunkten
 - Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung, Unfallgeschehen,
 - biologische Strahlenwirkungen,
 - externe Bestrahlung (Dosisabschätzungen),
 - Kontamination und Inkorporation,
 - Unfallmanagement und Behandlungsmöglichkeiten,
 - diagnostische Sicherungsmaßnahmen.

Der hier vorgelegte Leitfaden für Erstmaßnahmen sei allen Rettungsärzten und Mitarbeitern der Hilfsorganisationen zur Vorbereitung auf hoffentlich nicht eintretende begrenzte Strahlenunfälle empfohlen.

Der eigentliche Leitfaden liegt auch als Sonderheft vor und kann über die Geschäftsstelle der Strahlenschutzkommission bezogen werden.

Ergänzend sei noch darauf hingewiesen, dass in dieser Veröffentlichungsreihe der Strahlenschutzkommission noch folgende Bände zur Notfallproblematik erschienen sind: Band 4 enthält einen Leitfaden für medizinische Maßnahmen bei Kernkraftwerksunfällen mit vielen Betroffenen, Band 18 befasst sich mit Maßnahmen nach Kontamination der Haut und Band 25 hat den Notfallschutz und die Vorsorgemaßnahmen bei kerntechnischen Unfällen zum Inhalt.

Bonn, im April 1996

Prof. Dr. Chr. Reiners
Vorsitzender der
Strahlenschutzkommission

Vorwort zur 2. Auflage

Der Leitfaden für Erstmaßnahmen nach einem Strahlenunfall hat in der Vergangenheit bei den mit Vorsorgeaufgaben befassten Personen und Institutionen guten Anklang gefunden. Er wird auch in der Ausbildung von Ärzten und Strahlenschutzbeauftragten eingesetzt. Es gab daher keinen Grund, bei dieser Überarbeitung von der bewährten Konzeption auch hinsichtlich der Zweiteilung in Leitfaden und weiterführende Information abzuweichen. Natürlich musste wissenschaftlich aktualisiert werden, und die mit den Änderungen der gesetzlichen Grundlagen zum Strahlenschutz und zum Notfallschutz bei ionisierender Strahlung verbundenen Anpassungen mussten in diese Überarbeitung einfließen. Entsprechend der Gesamtkonzeption der Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission, insbesondere hier im Zusammenhang mit dem Band 4 – Medizinische Maßnahmen bei Kernkraftwerksunfällen –, wurden einige Schwerpunkte weiter ausgearbeitet. Dies betrifft insbesondere die biologischen Grundlagen sowie das akute Strahlensyndrom. Wie bei der ersten Auflage, ist der eigentliche Leitfaden als Sonderheft verlegt und kann über die Geschäftsstelle der Strahlenschutzkommission bezogen werden.

Der von der SSK mit der Überarbeitung der Bände 4 und 32 der Veröffentlichungen beauftragten Arbeitsgruppe gehörten an:

- Prof. Dr. Dörr – Universitätsklinikum Dresden
- Prof. Dr. Ganser – MH Hannover
- Dr. List – Forschungszentrum Karlsruhe
- Dr. Meldau – Vattenfall Europe Hamburg
- Dr. Miska – ehemals European Commission, Brüssel
- Prof. Dr. Müller – Universitätsklinikum Essen
- Prof. Dr. Reiners – Universitätsklinikum Würzburg
- Frau Dr. Schneider – Universitätsklinikum Würzburg
- Dipl.-Ing. Schnadt – TÜV Rheinland Group, Köln
- Dr. Seitz – Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln.

Dr. Seitz
BG Feinmechanik und
Elektrotechnik, Köln

Vorsitzender der Arbeitsgruppe

Prof. Dr. W.-U. Müller
Vorsitzender der SSK

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Vorgehensweise bei Strahlenunfällen (Übersicht).....	5
2.1	Lagebeurteilung	5
2.2	Sofortmaßnahmen	11
2.3	Maßnahmen des Selbstschutzes.....	12
2.4	Dosisrichtwerte für das Einsatzpersonal.....	13
2.5	Notruf / Unfallmeldung	15
2.6	Erste Hilfe	15
2.7	Krankentransport	17
2.8	Notfallambulanz / Krankenhaus.....	18
2.9	Zusammenarbeit der Hilfskräfte.....	19
3	Strahlenschutz – Begriffsbestimmungen und Erläuterungen	21
4	Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung, Unfallgeschehen	33
4.1	Industrie und Technik	33
4.2	Medizin und Wissenschaft	38
4.3	Transport radioaktiver Stoffe	39
4.4	Verlust oder Diebstahl von Strahlenquellen.....	40
5	Biologische Strahlenwirkungen.....	41
5.1	Grundlagen	41
5.1.1	Physikalische Grundlagen.....	41
5.1.2	Zelluläre Grundlagen.....	46
5.1.3	Strahlenwirkung auf Organe und Gewebe	48
5.2	Deterministische Strahlenwirkung auf die Gonaden	52
5.3	Strahlenwirkung auf den Embryo/Fetus.....	53
5.4	Strahlenwirkung auf die Augenlinse.....	54
5.5	Das akute Strahlensyndrom	54
5.5.1	Einleitung	54
5.5.2	Die zerebrovaskuläre Form	56
5.5.3	Die gastrointestinale Form	58
5.5.4	Die (muko)kutane Form	59

5.5.5	Die hämatopoetische Form	66
5.5.6	Sequentialdiagnostik	72
5.5.7	Schlussbemerkungen	78
6	Kontamination und Inkorporation	79
6.1	Kontamination	79
6.1.1	Dosisabschätzung bei Kontamination	80
6.1.2	Allgemeine Hinweise zur Dekontamination, insbesondere zur Personendekontamination	80
6.1.3	Vorgehen bei verbleibender Kontamination	82
6.1.4	Mögliche Strahlenexposition der Ärzte und des medizinischen Assistenz- und Pflegepersonals	83
6.1.5	Vorsorgemaßnahmen des Rettungs- und medizinischen Personals.....	83
6.1.6	Maßnahmen bei kontaminierten Wunden.....	83
6.2	Inkorporation	85
6.2.1	Präventive Maßnahmen zur Verhinderung einer Inkorporation beim beruflichen Umgang mit offenen Radionukliden.....	86
6.2.2	Inkorporationsmessung, Dosisabschätzung.....	86
6.2.3	Dekorporationsbehandlung (Ausscheidungsintensivierung).....	87
7	Unfallmanagement und Behandlungsmöglichkeiten	90
8	Weitergehende diagnostische Maßnahmen	93
8.1	Chromosomenanalyse	93
8.2	Mikronukleus-Test.....	95
8.3	Einzelschritte zur Veranlassung weiterführender diagnostischer Maßnahmen in peripheren Blutlymphozyten und praktische Hinweise	96
9	Literatur	97
Anhang A		
Unfallmeldung, Strahlenunfallerhebungsbogen		105
Anhang B		
Liste der Regionalen Strahlenschutzzentren		111

Anhang C	
Angaben für häufig verwendete Nuklide	115

Verzeichnis der Tabellen und Abbildungen

Tabellen

Tab. 2-1: Gefahrzettel zur Kennzeichnung von Versandstücken, die radioaktive Stoffe enthalten (entsprechend GGVS [2])	6
Tab. 2-2: Gefahrengruppen für die Feuerwehren mit Angaben über die Bedingungen für den Einsatz (vergl. § 52 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [3])	8
Tab. 2-3: Dosisrichtwerte für das Einsatzpersonal nach StrlSchV und FwDV 500	14
Tab. 3-2: Gewebewichtungsfaktoren w_T (nach Anlage VI Tab. C 2 StrlSchV)	28
Tab. 4-1: Nutzung von radioaktiven Stoffen und Geräten – typische Arbeitsbereiche – und Anzahl der beruflich strahlenexponierten Personen	34
Tab. 5-1: Dicke der Epidermis (Oberhaut) und Reichweite von α - und β -Strahlung im biologischen Gewebe	42
Tab. 5-2: Wichtige Einflussgrößen für die biologische Variabilität der Strahlenwirkung	47
Tab. 5-4: Klinische Symptome des zerebrovaskulären Syndroms, nach [15]	57
Tab. 5-5: Klinische Symptome des gastrointestinalen Syndroms, nach [15]	58
Tab. 5-6: Klinische Erscheinungsformen des (muko)kutanen Syndroms, nach [15]	61

Tab. 5-7: Grade des hämatopoetischen Syndroms nach Strahlenexposition, nach [15, 16].....	67
Tab. 5-8: Normalwerte der Leukozytenarten bei Einsatz von Blutbildautomaten	73
Tab. 5-9: Ablaufschema Sequentialdiagnostik bei Verdacht auf Vorliegen einer erhöhten Strahlenexposition	74
Tab. 5-10: Klinische Frühsymptomatik beim Menschen nach akuter kurzzeitiger Ganzkörperexposition	75

In den Anhängen:

Tabelle: Beispiele für Radionuklide in Form umschlossener Strahler in technischen/industriellen Anwendungen.....	117
Tabelle: Beispiele für Radionuklide in der nuklearmedizinischen Anwendung (als offene radioaktive Stoffe).....	119
Tabelle: Beispiele für Radionuklide in der strahlentherapeutischen Anwendung (als umschlossene radioaktive Stoffe).....	122
Tabelle: In der Praxis wichtige Dekorporationsmittel nach G.B. Gerber, R.G. Thomas – Guidebook (1992) [A2]....	124

Abbildungen

Abb. 1-1: Möglichkeiten einer erhöhten Strahleneinwirkung.....	3
Abb. 2-1: Musteraufbau einer Typ-A-Verpackung mit UN-Zulassung	6
Abb. 2-2: Verpackung für radioaktive Stoffe entsprechend Gefahrgutverordnung Straße GGVS [2] (Typ A), z .B. Arzneimittel, und Gefahrzettel der Kategorie II-GELB, zulässig für eine Dosisleistung von max. 500 μ Sv/h an der Oberfläche und 10 μ Sv/h in einem Meter Entfernung .	7

Abb. 2-3: Lieferfahrzeug für den Transport gefährlicher Güter mit der Warntafel nach GGVS nach Gefahrenklasse 7 „Radioaktive Stoffe“	7
Abb. 2-4: Beispiele für Ortsdosisleistungsmessgeräte	9
Abb. 2-5: Beispiele für Messgeräte zur Kontaminationskontrolle ...	10
Abb. 2-6: Beispiele für Personendosimeter	11
Abb. 3-1: Bohr'sches Atommodell (hier am Beispiel von Lithium) ..	21
Abb. 3-2: Abschirmung ionisierender Strahlung	24
Abb. 5-1: Abnahme der Dosisleistungen mit zunehmendem Abstand zur Strahlenquelle.....	44
Abb. 5-2: Eintrittswahrscheinlichkeit eines stochastischen Schadens in Abhängigkeit von der Dosis (Sv).....	49
Abb. 5-3: Schwere eines deterministischen Schadens in Abhängigkeit von der Dosis (Gy)	50
Abb. 5-4: Sekundärerethem mit leichter Schwellung unterhalb des Nagels am linken Zeigefinger. Die Strahlenexposition (ca. 15 Gy) erfolgte beim Probenwechsel an einem Röntgen-Feinstrukturgerät – Zustand: 4 Wochen nach Strahleneinwirkung.	64
Abb. 5-5: Sekundärerethem an den Fingern 1, 2, 4 und 5 rechts mit eingetrockneten Blasen am 4. Finger. Die Strahlenexposition (maximal 16 bis 20 Gy) erfolgte beim Hantieren im Nutzstrahlenbündel einer Röntgen-Feinstrukturanlage infolge Ausfalles der automatischen Sicherheitseinrichtung – Zustand: 23. Tag nach Strahleneinwirkung.....	64

- Abb. 5-6: Schwere Radiodermatitis (Erythemstadium) im Bereich des rechten Unter- und Oberarmes bei einem Ingenieur. Die Strahlenexposition (ca. 130 Gy) erfolgte bei der Manipulation im ungeschwächten Nutzstrahlenbündel eines Röntgen-Spektrometers – Zustand : 2. Tag nach Strahleneinwirkung.....65
- Abb. 5-7: Gleicher Patient wie in Abb. 5-6. Knapp 4 Wochen später entwickelte sich ein tiefes, bis zur Muskelfascie reichendes großes Hautulkus am Unterarm.....65
- Abb. 5-8: Blutbildveränderungen nach Ganzkörperexposition.....71
- Abb. 7-1: Ablaufschema: Maßnahmen bei möglicher erhöhter Einwirkung ionisierender Strahlung [5].....92

Leitfaden

1 Einleitung

Bei der Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung kann es durch menschliches und technisches Versagen zu Unfällen und dadurch auch zu erhöhten Strahleneinwirkungen kommen. Durch den Umgang mit umschlossenen Strahlenquellen und Einrichtungen, die Strahlung aussenden (Röntgeneinrichtungen, Beschleuniger), können sowohl der gesamte Körper als auch bestimmte Körperteile bestrahlt werden. Bei der Anwendung offener radioaktiver Stoffe kann es zu einer Kontamination und infolge dessen zu einer Inkorporation von Radionukliden kommen, wobei ebenfalls bestimmte Organe und/oder der gesamte Organismus exponiert werden. Als Sonderfall ist beim Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen auch auf offene Verletzungen zu achten (s. Abb. 1-1).

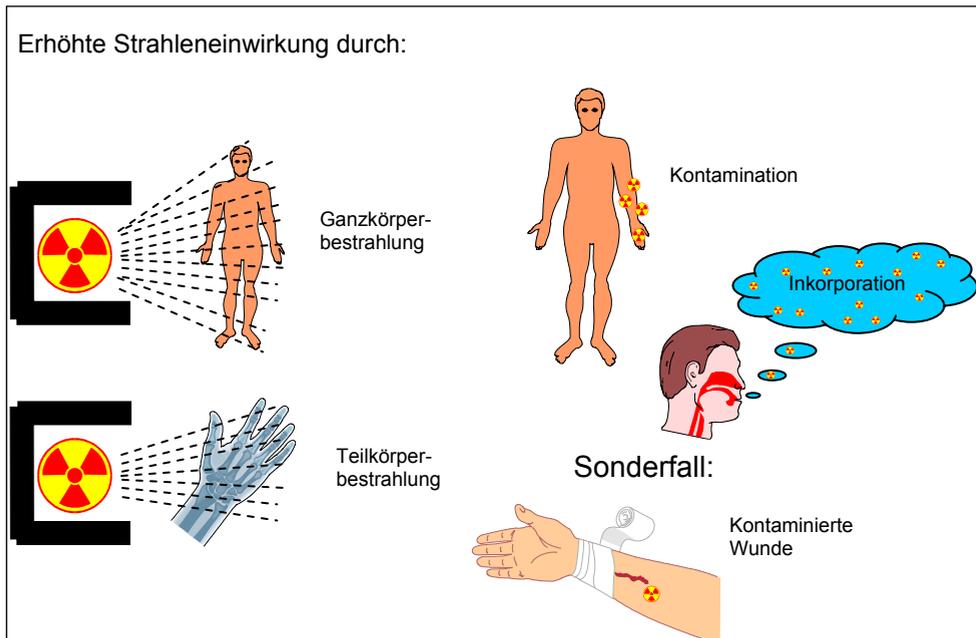


Abb. 1-1: Möglichkeiten einer erhöhten Strahleneinwirkung

Dieser Leitfaden beschreibt medizinische Maßnahmen zur Diagnose und Behandlung von strahlenverunfallten Personen. Dabei spielt zunächst keine Rolle, ob bei dem Unfall ursprünglich wenige Beteiligte betroffen sind oder ob eine große Zahl von Personen exponiert wurde. Bei einer großen Zahl von Betroffenen werden die vorangehenden Maßnahmen der Erstbehandlung in der Notfallstation im Band 4 der SSK [1] beschrieben.

Der Leitfaden wendet sich an Personen, die mit einem Strahlenunfall zu tun haben könnten. Er umfasst Hinweise von der Ersten Hilfe bis zur Weiterleitung der Betroffenen an spezielle Einrichtungen, die eine spezifische Diagnostik und Therapie durchführen können.

Der Leitfaden soll sowohl der gebotenen Vorbereitung auf ein solches Ereignis dienen, als auch bei dessen Eintritt die geordnete Durchführung der notwendigen Maßnahmen gewährleisten. Er dient auch der Aus- und Fortbildung.

Kapitel 2 gibt eine Kurzinformation über die unmittelbare Vorgehensweise bei einem Strahlenunfall. Einzelheiten werden in den darauf folgenden Kapiteln erläutert.

2 Vorgehensweise bei Strahlenunfällen (Übersicht)

In dieser Übersicht wird die Organisation der Rettungsmaßnahmen in der ersten Zeit nach der Alarmmeldung dargestellt. Angesprochen sind daher

- Sanitäts- und Rettungsdienste,
- Ärzte und Assistenzpersonal,
- Polizei und Feuerwehren.

Von allen Beteiligten sind die folgenden Maßnahmen zu treffen:

- Hilfe für die Betroffenen,
- Selbstschutz,
- Beseitigung der Gefahr,
- Schutz der Umgebung bzw. nicht unmittelbar Betroffener.

Es werden hier nur die Maßnahmen der Hilfe für Betroffene und die des Selbstschutzes beschrieben; die anderen Maßnahmen gehören zum Aufgabengebiet der Feuerwehren und Fachbehörden.

2.1 Lagebeurteilung

Für die sichere Durchführung von Hilfeleistungen ist es notwendig, Erkenntnisse über das Vorhandensein radioaktiver Stoffe und die Intensität der ionisierenden Strahlung zu gewinnen. Mögliche Informationsquellen sind:

⇒ Gefahrzettel, Warntafeln, Unfallmerkblätter

Aus der Farbe des Gefahrzettels und der Kategorie lässt sich im Groben die Dosisleistung an der Oberfläche eines – unbeschädigten – Versandstückes, angegeben in Mikro-Sievert pro Stunde ($\mu\text{Sv/h}$)¹, abschätzen (s. Abb. 2-2 und Tab. 2-1). Art und Menge des Nuklides sind zusätzlich vermerkt.

Auf der an Fahrzeugen angebrachten Warntafel ist unter dem Strahlenwarnzeichen (Flügelrad) und dem Wort „RADIOACTIVE“ die Gefahrenklasse 7 (Radioaktivität) angegeben (s. Abb. 2-3). Weitere Hinweise geben die Frachtbegleitpapiere mit den darin enthaltenen Unfallmerkblättern.

¹ Erläuterung s. Kap. 3: Äquivalentdosisleistung

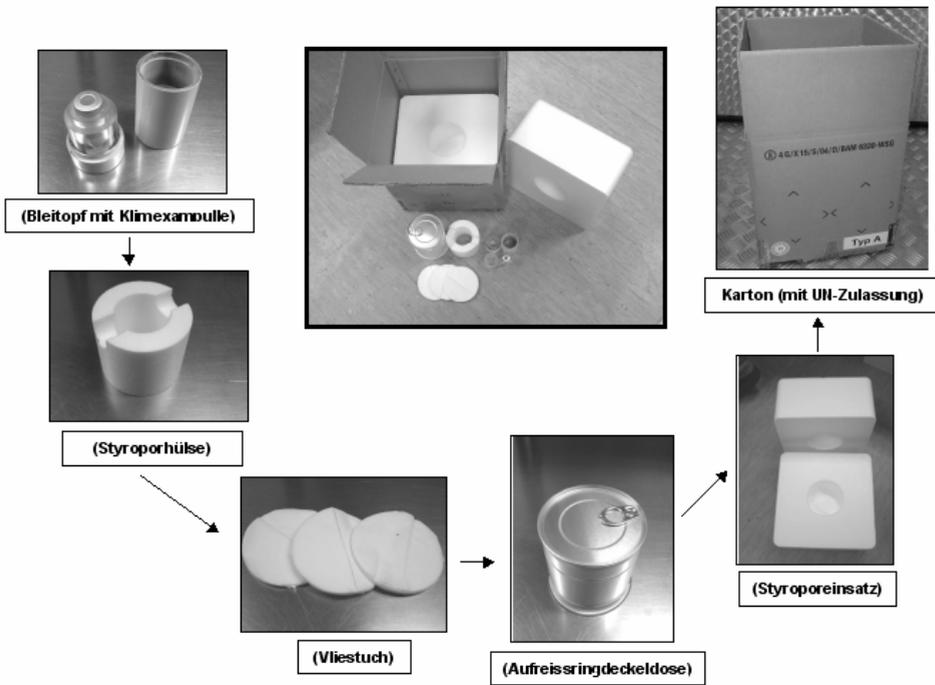


Abb. 2-1: Musteraufbau einer Typ-A-Verpackung mit UN-Zulassung

Tab. 2-1: Gefahrzettel zur Kennzeichnung von Versandstücken, die radioaktive Stoffe enthalten (entsprechend GGVS [2])

Kategorie	max. zulässige Dosisleistung	
	an der Oberfläche	in 1 m Abstand
I WEIß	5 $\mu\text{Sv/h}$	-
II GELB	500 $\mu\text{Sv/h}$	10 $\mu\text{Sv/h}$
III GELB	2.000 $\mu\text{Sv/h}$	100 $\mu\text{Sv/h}$
	(10.000 $\mu\text{Sv/h}$)*	(> 100 $\mu\text{Sv/h}$)*

* Werte nur zulässig bei Beförderung unter ausschließlicher Verwendung.

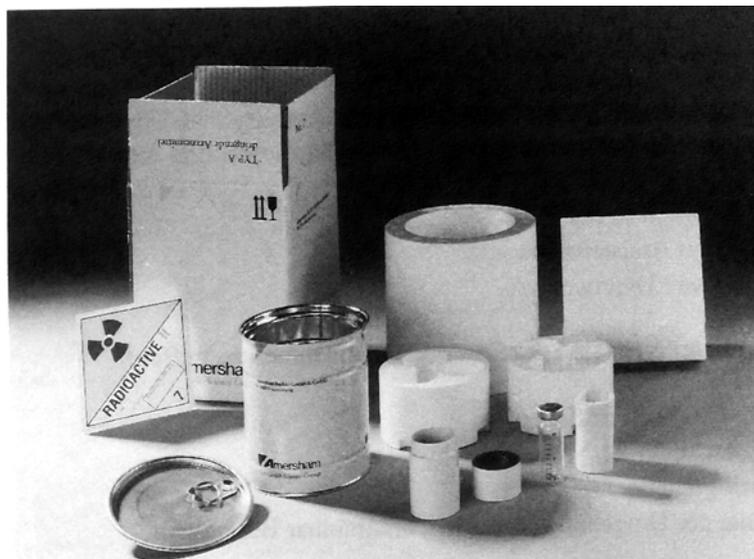


Abb. 2-2: Verpackung für radioaktive Stoffe entsprechend Gefahrgutverordnung Straße GGVS [2] (Typ A), z .B. Arzneimittel, und Gefahrzettel der Kategorie II-GELB, zulässig für eine Dosisleistung von max. 500 $\mu\text{Sv/h}$ an der Oberfläche und 10 $\mu\text{Sv/h}$ in einem Meter Entfernung



Abb. 2-3: Lieferfahrzeug für den Transport gefährlicher Güter mit der Warn-tafel nach GGVS nach Gefahrenklasse 7 „Radioaktive Stoffe“

An stationären Anlagen ist eine Warntafel mit der Gefahrengruppe für den Feuerwehreinsatz angebracht. Der Text auf der Tafel lautet „Feuerwehr-Gefahrengruppe IA bzw. IIA oder IIIA“; daraus ist zu erkennen, welche Schutzmaßnahmen erforderlich sind (s. Tab. 2-2). Diese Schutzmaßnahmen treffen auch für das Rettungspersonal zu. Das Strahlenwarnzeichen ist auf der Tafel mit der Angabe der Gefahrengruppe nicht enthalten.

Tab. 2-2: Gefahrengruppen für die Feuerwehren mit Angaben über die Bedingungen für den Einsatz (vergl. § 52 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [3])

Gefahrengruppe	Bedingungen für den Einsatz
IA	ohne besonderen Schutz
IIA	nur mit Strahlenschutzsonderrüstung und unter Strahlenschutzüberwachung
IIIA	wie IIA und – außer bei Lebensgefahr – zusätzlich unter Hinzuziehung eines Sachverständigen

Bei Transportunfällen soll nach Gefahrengruppe IIA vorgegangen werden.

Für zusätzlich benötigte Auskünfte sind Unterlagen in den Rettungsleitstellen bzw. Einsatzzentralen verfügbar, so dass Informationen über Funk erhalten werden können.

⇒ Zustand des Versandstücks

Ist ein Versandstück mit der Kennzeichnung gemäß Gefahrenklasse 7 nicht oder nur äußerlich beschädigt und kein Austreten von Inhalt aus dem Inneren erkennbar, ist von einer geringen Strahlengefahr und einer allenfalls örtlich eng begrenzten Kontamination auszugehen.

Bei fehlender bzw. nicht mehr erkennbarer Kennzeichnung kann sich ein Hinweis auf ionisierende Strahlung aus den spezifischen, auffallend schweren Transportbehältern ergeben.

⇒ Strahlenmessung

Genauere Erkenntnisse über eine mögliche Strahlengefährdung sind durch Messungen der Dosisleistung und/oder der Kontamination zu erhalten (s. Abb. 2-4 und 2-5). Die Grenze des Gefahrenbereichs ist, entsprechend der Feuerwehrdienstvorschrift (FwDV 500 [4]), aufgrund von Dosisleistungs-

messungen festzulegen. Außerhalb des Gefahrenbereichs darf die Dosisleistung den Wert von 25 Mikro-Sievert pro Stunde ($25 \mu\text{Sv/h}$) nicht übersteigen. Bereiche, bei denen der Verdacht einer Kontamination besteht, sind in den Gefahrenbereich mit einzubeziehen.

Ist keine Messung möglich, weil noch kein Messgerät zur Verfügung steht, wird im Freien um die Gefahrenstelle ein Gefahrenbereich mit einem Radius von 50 m abgegrenzt.

Bis zur Festlegung der Grenze des Gefahrenbereichs ist durch nicht unmittelbar am Einsatz beteiligte Kräfte ein Abstand von mindestens 50 m vom Schadensobjekt, unter Beachtung der Windrichtung, einzuhalten. Dies gilt nicht für das am Einsatz beteiligte Rettungsdienstpersonal.



Abb. 2-4: Beispiele für Ortsdosisleistungsmessgeräte



Abb. 2-5: Beispiele für Messgeräte zur Kontaminationskontrolle



Abb. 2-6: Beispiele für Personendosimeter

⇒ Fachpersonal

Innerhalb von Betrieben, in denen mit radioaktiven Stoffen umgegangen wird, gibt das betriebliche Strahlenschutzpersonal Auskunft über die mögliche Strahlengefährdung und Anweisungen über strahlenschutzgerechtes Verhalten bei Rettung und Transport der betroffenen Personen.

2.2 Sofortmaßnahmen

Die nichtärztliche und ärztliche Erste Hilfe haben zunächst absoluten Vorrang vor den Strahlenschutzmaßnahmen. Nach Möglichkeit sind, wie in Kap. 2.3 aufgeführt, Schutzmaßnahmen zu beachten.

Bei lebensbedrohlichen Zuständen entspricht das Ablaufschema dem der „Ersten Hilfe beim Auffinden einer Person“:

- ⇒ Kontrolle des Bewusstseinszustandes, ggf. stabile Seitenlagerung!
- ⇒ Kontrolle der Atmung:
Eine fachgerecht durchgeführte Atemspende (unter dem auch sonst aus hygienischen Gründen üblichen Gesichts-Mundschutz, wie er in den gängigen Erste-Hilfe-Kästen vorhanden ist) führt beim Helfer zu keiner zusätzlichen Gefährdung.
- ⇒ Kontrolle der Herzfunktion:
Herzstillstand? Herz-Lungen-Wiederbelebung (Reanimation)!
- ⇒ Kontrolle des Kreislaufes:
Schock? Schwere Blutung? Schockbekämpfung, Blutung stillen!
- ⇒ Sonstige schwere Verletzungen, Einklemmung?

Es sollen im Gefahrenbereich nur die unbedingt notwendigen, lebensrettenden Sofortmaßnahmen durchgeführt und der Patient / Verletzte dann unter Beachtung des Selbstschutzes aus diesem Bereich gerettet werden, bevor weitere Maßnahmen der Ersten Hilfe erfolgen.

- ⇒ Bei der Rettung der Patienten soll durch überlegte und zielstrebige Maßnahmen die Ausbreitung von Kontaminationen vermieden werden.

2.3 Maßnahmen des Selbstschutzes

Im Allgemeinen ist für die Helfer eine Gefährdung nicht gegeben, insbesondere wenn der Selbstschutz sachgerecht durchgeführt wird.

Die Maßnahmen des Selbstschutzes umfassen die „4 A“:

- ⇒ **Abschalten!**
Abschalten der Strahlenquelle (Röntgenröhre oder Beschleuniger) oder Rückführung der Strahlenquelle in den Abschirmbehälter, sofern möglich.
- ⇒ **Abstand halten!**
Es ist ein möglichst großer Abstand zur Strahlenquelle einzuhalten.
- ⇒ **Aufenthaltsdauer begrenzen!**
Ist für lebensrettende Maßnahmen ein Aufenthalt im Gefahrenbereich notwendig, muss die Aufenthaltszeit möglichst kurz sein.
- ⇒ **Abschirmung nutzen!**
Vorhandene Abschirmung soll genutzt werden. Die Errichtung von Abschirmungen verzögert in der Regel notwendige Rettungsmaßnahmen und sollte daher unterbleiben.

Wichtig für das Einsatzpersonal ist die Vermeidung einer Kontamination und das Verhindern einer Inkorporation. Es besteht daher während des Einsatzes ein absolutes Ess-, Trink- und Rauchverbot.

Einsatzkräfte mit offenen Wunden sind zur Vermeidung einer Inkorporation, die aus einer möglichen Kontamination entstehen kann, sofort abzulösen.

Im Gefahrenbereich

Da das Rettungsdienstpersonal im Allgemeinen nicht über eine persönliche Schutzausrüstung verfügt, ist die Rettung von Personen aus dem Gefahrenbereich primär Aufgabe der Feuerwehren. Ist die Feuerwehr (noch) nicht verfügbar oder ist die Rettung nur mit Hilfe des Rettungsdienstes, einschließlich des Notarztes, zu bewerkstelligen, müssen sich auch Angehörige des Rettungsdienstes zu dem Patienten in den Gefahrenbereich begeben. Dabei sollten sie möglichst mit einem Personendosimeter ausgestattet sein (s. Abb. 2-5).

Übergabe

Die Feuerwehren bzw. das betriebliche Fachpersonal übergeben den Patienten an der Grenze des Gefahrenbereiches an den Rettungsdienst. Das Rettungsdienstpersonal wird auf den Kontaminationsverdacht hingewiesen.

Außerhalb des Gefahrenbereiches

Beim Transport kontaminierter Personen ist für die Betreuenden Schutzkleidung zur Vermeidung einer Eigenkontamination oder Inkorporation in dem Maß ausreichend, wie sie auch zur Vermeidung von Infektionen üblich ist. Das sind Schutzhandschuhe, Einwegüberschuhe, Einweg-Folienschürzen oder auch leichte Schutzanzüge (z. B. Einweg-Papierschutzanzüge). Bei einer Gefahr des Aufwirbelns von Stäuben sind Staubfiltermasken (üblicherweise partikelfiltrierende Halbmasken FFP3) zweckmäßig. Ein umluftunabhängiges Atemschutzgerät ist nicht erforderlich.

2.4 Dosisrichtwerte für das Einsatzpersonal

Bei Einsätzen der Polizei oder von Feuerwehr und Rettungsdienst gelten die Dosisgrenzwerte des § 55 StrlSchV nicht. Einsatzkräfte gelten nach FwDV 500 nicht als beruflich strahlenexponierte Personen im Sinne des § 54

StrlSchV. Vielmehr sind die Vorschriften der §§ 58 und 59 sinngemäß anwendbar.

Bei überwiegender Ganzkörperexposition sind die in Tab. 2-3 angegebenen Dosisrichtwerte (effektive Dosis) nach FwDV 500 zu beachten, wobei die effektive Dosis bei externer Strahlenexposition vereinfachend mit der Ortsdosis gleichgesetzt werden kann.

Eine Dosis von 250 mSv darf nur in Ausnahmefällen überschritten werden, wenn dies bei lebensrettenden Maßnahmen notwendig und vertretbar ist. Die Strahlenschutzkommission empfiehlt, dass in diesen seltenen Fällen die Dosis jedoch 1 Sv nicht übersteigen sollte. Voraussetzung für einen solchen Einsatz ist die Zustimmung der Einsatzkräfte nach erfolgter Aufklärung. Die Einhaltung dieser Richtwerte ist mittels Personendosimeter (s. Abb. 2-5) zu überwachen.

Im Allgemeinen gilt, dass bei Einsatzkräften eine effektive Dosis von 100 mSv in einem Jahr und von 250 mSv im Laufe des Lebens nicht überschritten werden sollte. Die effektive Dosis im Verlaufe mehrerer Jahre sollte im Mittel 20 mSv pro Jahr nicht überschreiten (vergl. § 55 StrlSchV). Bei der Aus- und Fortbildung darf der Dosiswert von 1 mSv pro Jahr nicht überschritten werden.

Tab. 2-3: Dosisrichtwerte für das Einsatzpersonal nach StrlSchV und FwDV 500

Einsätze zum Schutz von Sachwerten	15 mSv pro Einsatz (max. 100 mSv im Jahr)
Einsätze zu Abwehr einer Gefahr für Personen, zur Verminderung einer wesentlichen Schadensausweitung oder zur Durchführung vordringlicher Messaufgaben	100 mSv pro Einsatz und Kalenderjahr
Einsätze zur Rettung von Menschenleben	250 mSv pro Einsatz sowie einmal im Leben

2.5 Notruf / Unfallmeldung

Die Unfallmeldung gleicht im Wesentlichen dem Schema sonstiger Unfallmeldungen mit den bekannten „5 W“, wird jedoch durch einige Zusatzfragen präzisiert.

- ⇒ **Wo ist etwas passiert?**
Genaue Ortsangabe:
Ort, Straße, Hausnummer, Name des Betriebes, Gebäudeteil, Zufahrtswege, örtliche Besonderheiten
- ⇒ **Was ist passiert?**
Strahlenunfall, Verkehrsunfall, Gefahrguttransport, Labor- oder Industrieunfall
- ⇒ **Wie viele Betroffene/Verletzte?**
Zahl verletzter und sonst beteiligter Personen
- ⇒ **Welche Verletzungen?**
Art des Schadensereignisses: Akute Lebensgefahr, Allgemeinzustand, Verletzungen, offene Wunden, Verbrennung, Verbrühung
Zusätzlich: Hinweis auf Strahleneinwirkung (externe Bestrahlung, Kontamination, Inkorporation, radioaktiver Stoff)
- ⇒ **Wer meldet?**
Name, Beruf, Fachkenntnisse im Strahlenschutz

2.6 Erste Hilfe

Die Erste Hilfe weist gegenüber sonstigen Unfällen einige Besonderheiten auf.

Dekontamination

- ⇒ Kontaminierte Kleidung ist zu entfernen, ggf. durch Aufschneiden. Eine Kontamination der Haut kann in der Regel durch schonendes Waschen mit lauwarmem Wasser beseitigt werden. Der Patient sollte anschließend bekleidet oder in Decken eingehüllt werden, um einer Unterkühlung vorzubeugen. Jedoch sollten zur Vermeidung von Wärmestaus keine Plastikfolien, Rettungsdecken oder ähnliche Materialien verwendet werden! Weitere Maßnahmen erfolgen im Krankenhaus.
- ⇒ Eine fachgerechte Dekontamination sollte nur durch entsprechend ausgebildetes Personal durchgeführt werden. Vor dem Transport soll – soweit

medizinisch vertretbar – eine Grobdekontamination erfolgen. Einzelheiten zur fachgerechten Dekontamination siehe Kapitel 6.1.2.

Behandlung von Wunden

- ⇒ Bei jeder kontaminierten Wunde ist bis zum Beweis der Kontaminationsfreiheit durch Messung an die Gefahr der Inkorporation radioaktiver Substanzen zu denken.
- ⇒ Wunden sollten, soweit vorhanden, sofort mit steriler physiologischer Kochsalzlösung oder mit anderen isotonen sterilen Elektrolyt-Lösungen, ansonsten auch mit Leitungswasser, gespült werden.
- ⇒ Soweit eine primäre Inkorporation ausgeschlossen werden kann, sollen offene Wunden gegebenenfalls wasserdicht verbunden werden, um eine nachträgliche Inkorporation zu verhindern.
- ⇒ Die Ausbreitung einer Wundkontamination kann durch Ruhigstellung vermindert werden. Kurzzeitig kann eine venöse Stauung angelegt werden.

Kontaminationskontrolle

- ⇒ Die Kontaminationskontrolle bedarf wegen der erforderlichen Messgeräte der Unterstützung durch Strahlenschutzfachkräfte. Messergebnisse sind zu protokollieren. Messungen sollen nur durchgeführt werden, wenn die sonst notwendige Erste Hilfe, insbesondere Rettungsmaßnahmen, nicht verzögert werden.

Weitere Erste-Hilfe-Maßnahmen

- ⇒ Die weitere Erste Hilfe entspricht der, die ohne Strahleneinwirkung durchzuführen wäre. Ihr Ziel ist, weiteren Schaden zu verhindern, Schmerzen zu lindern und den Patienten transportfähig zu machen.

Informationen über die Strahlenquelle

- ⇒ Informationen über die Strahlenquelle sind, soweit sie vorliegen oder ohne Zeitverzögerung zu erfassen sind, an den weiterbehandelnden Arzt weiterzugeben – von Vorteil sind dabei vorgegebene Protokolle im Sinne des Strahlenunfallerhebungsbogens der Berufsgenossenschaftlichen Informationsschrift BGI 668 „Erste Hilfe bei erhöhter Einwirkung ionisierender Strahlung“ [5].

Abfall

- ⇒ Aller Abfall, der bei der Grobdekontamination und der weiteren Ersten Hilfe anfällt, ist in geeigneten Behältnissen gesondert zu sammeln (Vermeidung einer Ausbreitung der Kontamination, Spurensicherung zur späteren Rekonstruktion der vorhandenen Kontamination). Die Entsorgung übernimmt ein dazu bestimmter Fachdienst oder wird durch die Aufsichtsbehörde veranlasst.

2.7 Krankentransport

Patient

- ⇒ Bei dem Transport sind kontaminierte Patienten, soweit möglich, getrennt von anderen Personen zu befördern.
- ⇒ Personen, die extern bestrahlt und nicht kontaminiert sind, nicht inkorporiert haben, keinen Hinweis auf eine akute Strahlenkrankheit (Übelkeit, Erbrechen, Durchfall) bieten und keine Verletzungen aufweisen, sollten unverzüglich einem Arzt mit Fachkenntnissen im Strahlenschutz, vorzugsweise einem ermächtigten Arzt, vorgestellt werden.
- ⇒ Patienten mit Verdacht auf Kontamination oder Inkorporation und zusätzlichen Verletzungen oder akuten Krankheitszeichen werden, je nach Schwere der Verletzung, direkt in das nächstgelegene, geeignete Krankenhaus mit Notfallambulanz oder zu einem in der Behandlung von Strahlenunfällen erfahrenen D-Arzt gebracht. Besonders geeignet ist ein Krankenhaus mit nuklearmedizinischer Abteilung, da hier fachkundiges Personal und geeignete Einrichtungen vorhanden sind.

Fahrzeug

- ⇒ Bei der Rettung und dem Transport der Patienten soll durch geeignete Maßnahmen die Ausbreitung der Kontamination vermieden werden. Dazu kann man im Rettungsfahrzeug vor Einladen der Trage an deren Stellplatz Plastikfolien oder zumindest eine Decke auslegen. Nicht versuchen, das ganze Fahrzeug auszukleiden!

Personal

- ⇒ Während des Transports gelten die Maßnahmen des Selbstschutzes (vergl. Kap. 2.3) ebenso wie am Unfallort. Dabei dürfen notwendige Hilfeleistungen nicht beeinträchtigt werden. Möglicherweise kontaminierte Schutzklei-

dung (Handschuhe, Überschuhe, Überanzüge) wird nach dem Transport abgelegt und in geeigneten Plastiksäcken gesammelt.

- ⇒ Bei Verdacht einer Inkorporation oder Erhalt einer Dosis von mehr als 50 mSv hat der Einsatzleiter unverzüglich nach Beendigung des Einsatzes dafür zu sorgen, dass die betroffenen Einsatzkräfte einem ermächtigten Arzt vorgestellt werden.

Meldung

- ⇒ Bei der Funkmeldung an die Leitstelle ist mitzuteilen, ob es sich um einen kontaminierten Patienten bzw. um einen Patienten mit Inkorporation handelt. Die Rettungsleitstelle verständigt hierüber das Krankenhaus, in das der Patient gebracht werden soll.

Übergabe

- ⇒ Bei Übergabe des Patienten im Krankenhaus muss das Rettungsdienstpersonal den Aufnahmekranken über die (vermutete) Strahleneinwirkung, die Kontaminationsart und über eingeleitete Schutzmaßnahmen informieren (s. Strahlenunfallerhebungsbogen, Anhang A).

Schlussmaßnahmen

- ⇒ Es ist eine Kontaminationskontrolle von Personal, Gerätschaften und Einsatzfahrzeug durchzuführen. Gegebenenfalls sollten Dekontaminationsmaßnahmen unter fachkundiger Leitung ergriffen werden. Kontaminierte Gegenstände einschließlich Schutzkleidung sind in geeigneten Plastiksäcken, die mit der Aufschrift „radioaktiv“ gekennzeichnet werden, zu sammeln.
- ⇒ Die Freigabe des Transportfahrzeugs und der Gerätschaften und die Entscheidung über die Art der Abfallentsorgung erfolgt durch eine autorisierte, fachkundige Stelle oder die Aufsichtsbehörde.

2.8 Notfallambulanz / Krankenhaus

Die Maßnahmen bei der Aufnahme im Krankenhaus richten sich danach, ob die Betroffenen allein ionisierender Strahlung ausgesetzt waren oder ob zusätzliche Verletzungen bestehen. In jedem Fall ist ein Arzt mit Kenntnissen im Strahlenschutz hinzuzuziehen. Außerdem sollte mit dem nächst-

gelegenen Regionalen Strahlenschutzzentrum (s. Anhang B) Kontakt aufgenommen werden.

- ⇒ Absoluten Vorrang haben die Erhaltung vitaler Funktionen und die Versorgung der Verletzungen, wie sie auch bei Unfällen ohne Strahleneinwirkung üblich sind. Wunden und Frakturen werden, soweit möglich, primär versorgt.
- ⇒ In jedem Fall (auch bei Nichtverletzten) sind die folgenden strahlenschutzmedizinischen Maßnahmen durchzuführen (siehe Kap. 6 bis 8)
 - Erfassung von Hinweisen auf eine akute Strahlenexposition,
 - Feststellung von Anzeichen einer akuten Strahlenkrankheit,
 - Feststellung einer akuten Hautreaktion mit Früherythem,
 - Messung zur Feststellung einer etwaigen Restkontamination,
 - erforderlichenfalls eine Dekontamination,
 - ggf. Inkorporationsmessungen bei Verdacht auf Inkorporation, Nasen- und Rachenabstrich, Sammeln von Stuhl- und Urinproben, Ganz- und Teilkörpermessungen,
 - Labordiagnostik,
 - Einleitung von Maßnahmen zur Ausscheidungsintensivierung.

Die Dekontamination von Mund, Nase und/oder Ohren ist von einem Arzt durchzuführen.

2.9 Zusammenarbeit der Hilfskräfte

Bei Strahlenunfällen kommt es auf eine gute Zusammenarbeit aller Beteiligten an. Die Koordinierung verschiedener Organisationen ist erfahrungsgemäß schwierig, aber unerlässlich. Wichtig ist der rasche Austausch von Informationen, insbesondere über:

- Erkenntnisse aus den Gefahrzetteln, den Frachtbegleitpapieren und Unfallmerkblättern;
- Messergebnisse;
- Abschätzungen der Gefahr für Einsatzkräfte und Betroffene.

Die Entscheidung über medizinische Maßnahmen, die über die Erste Hilfe hinausgehen, obliegt nur medizinischem Personal. Die Beurteilung der Gefahrenlage durch anwesende Strahlenschutzbeauftragte oder fachkundige Personen anderer Hilfsdienste ist zu berücksichtigen.

3 Strahlenschutz – Begriffsbestimmungen und Erläuterungen

Mit „Strahlung“ ist hier ausschließlich *ionisierende Strahlung* gemeint, d. h. Photonen- oder Teilchenstrahlung, die in der Lage ist, Elektronen aus dem Atom- oder Molekülverband herauszulösen. Zur Veranschaulichung dient das Bohr'sche Atommodell: der Kern ist aus Protonen und Neutronen aufgebaut und positiv geladen, um ihn kreisen auf vorgegebenen Schalen die Elektronen der Hülle (Abb. 3-1).

*Ionisierende
Strahlung*

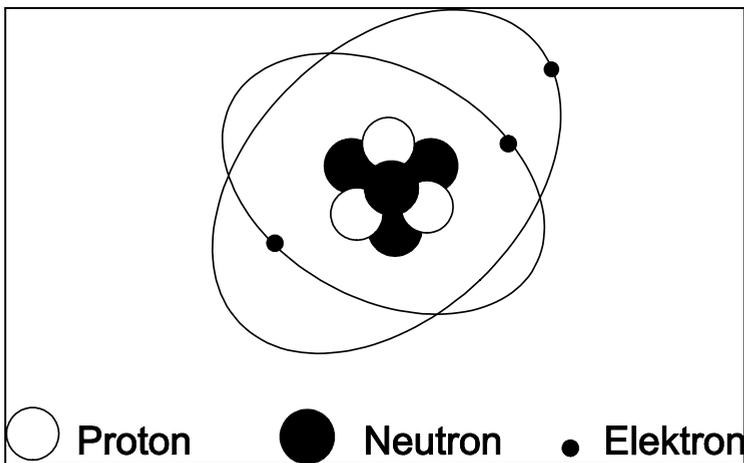


Abb. 3-1: Bohr'sches Atommodell (hier am Beispiel von Lithium)

Normalerweise ist ein Atom elektrisch neutral, der Zahl der Protonen im Kern entspricht die Zahl der Elektronen in der Hülle. Ionisation bedeutet, dass der Elektronenhülle Elektronen zugefügt oder aus ihr entfernt werden, so dass ein geladenes Teilchen (Ion) entsteht. In einem elektrischen Feld bewegen sich geladene Teilchen und bewirken einen elektrischen Strom. Ströme können sehr genau gemessen werden, so dass ionisierende Strahlung anhand der von ihr erzeugten Ionen nachgewiesen werden kann.

Strahlenarten

Die wichtigsten *Arten ionisierender Strahlung* sind α - (Alpha-), β - (Beta-), γ - (Gamma-), Röntgen- und Neutronenstrahlung. Alpha-Teilchen bestehen aus 2 Protonen und 2 Neutronen; es handelt sich um positiv geladene Teilchen. Beta-Teilchen sind entweder Positronen (positiv geladene Elektronen) oder Elektronen. Neutronen sind elektrisch neutrale Teilchen. Alpha- und Beta-Teilchen entstehen bei dem Zerfall radioaktiver Atomkerne. Nach einem α -Zerfall oder β -Umwandlungsprozess tritt in den meisten Fällen eine elektromagnetische Wellenstrahlung, die γ -Strahlung, auf.

Radioaktive Stoffe

Radioaktive Stoffe sind „nicht abschaltbare“ Strahlenquellen, die nur abgeschirmt werden können. Demgegenüber sind Röntgenstrahler und Teilchenbeschleuniger, die Röntgen- aber auch Teilchenstrahlung erzeugen, abschaltbare Strahlenquellen. Von ihnen geht im Allgemeinen nur während des Betriebes eine Strahlengefahr aus.

Radioaktiver Zerfall

Eine wichtige Quelle ionisierender Strahlung ist der *radioaktive Zerfall*. Hierbei handelt es sich um ein Phänomen, das nur den Atomkern betrifft. Nur bestimmte Kombinationen von Protonen und Neutronen ergeben einen stabilen Kern. Ist ein Kern nicht stabil, so wandelt er sich um (Zerfall) und sendet dabei ionisierende Partikel (α - oder β -Teilchen) aus, meist tritt außerdem auch noch γ -Strahlung auf. Atomkerne, die die gleiche Anzahl von Protonen enthalten und damit an einer Stelle im periodischen System stehen, sich aber in der Anzahl der Neutronen unterscheiden, werden als „Isotope“ bezeichnet. Isotope können stabil oder radioaktiv sein, letztere bezeichnet man als Radionuklide.

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ Zerfall pro Sekunde}$$

Ein Becquerel stellt eine sehr geringe Aktivität dar. Das Körpergewebe enthält etwa 100 Bq/kg natürlicher Radioaktivität. Die Aktivität von 1 g Radium beträgt 37 Milliarden Bq. Das entspricht der nicht mehr gebräuchlichen Einheit von 1 Curie.

Aus einer Aktivität kann nicht einfach auf die biologisch wirksame Dosis (Einheit Sievert) geschlossen werden. Die aus einer gegebenen Aktivität resultierende Dosis ist z. B. davon abhängig, ob nur eine externe Bestrahlung erfolgt, ob eine Kontamination oder gar eine Inkorporation vorliegt.

Es führt kein einfacher Weg von den „Becquerel“ zu den Sievert!

Die *physikalische Halbwertszeit* ist die Zeit, in der von einer vorhandenen Menge radioaktiver Atomkerne die Hälfte zerfällt. Sie charakterisiert einen radioaktiven Stoff. Nach 10 Halbwertszeiten ist ein radioaktiver Stoff bis auf einen Rest von weniger als 1 ‰ seiner Ausgangsaktivität zerfallen.

Halbwertszeit

Die *biologische Halbwertszeit* ist die Zeit, in der ein Stoff durch Stoffwechsel- und Ausscheidungsvorgänge zur Hälfte aus dem Körper ausgeschieden wird.

Die *effektive Halbwertszeit* hängt ab von der physikalischen und biologischen Halbwertszeit und ist kürzer oder höchstens so lang, wie die kürzere von beiden.

Umschlossene *radioaktive Stoffe* sind von einer festen, inaktiven Hülle umschlossen oder in festen, inaktiven Stoffen ständig so eingebettet, dass bei üblicher betriebsmäßiger Beanspruchung ein Austritt radioaktiver Stoffe mit Sicherheit verhindert wird; eine Abmessung muss mindestens 0,2 cm betragen.

*Umschlossene
radioaktive Stoffe*

Offene *radioaktive Stoffe* sind alle radioaktiven Stoffe mit Ausnahme der umschlossenen radioaktiven Stoffe.

*Offene radio-
aktive Stoffe*

Eine *Kontamination* ist eine durch radioaktive Stoffe verursachte „Verunreinigung“ von Gegenständen, Atemluft, Nahrungsmitteln oder Personen.

Kontamination

Inkorporation

Eine *Inkorporation* ist eine Aufnahme radioaktiver Stoffe in den Organismus. Sie kann über die Atmung (Inhalation), über die Nahrungsaufnahme (Ingestion) oder über die verletzte, selten auch intakte Haut direkt erfolgen.

Abschirmung

Beim Durchgang durch Materie wird Strahlung geschwächt. Alpha- und Beta-Strahlung verliert dabei Energie und hat deshalb eine definierte Reichweite (Abb. 3-2). Für α -Strahlung beträgt die Reichweite in Luft einige cm, im Gewebe einige Tausendstel mm (μm). Bei β - oder Elektronenstrahlung liegt die Reichweite im Gewebe im Zentimeterbereich.

Bei γ - und Röntgenstrahlung folgt die Schwächung einem Exponentialgesetz, dies gilt ebenso für Neutronen. Man kann daher keine maximale Reichweite angeben und rechnet mit der Halbwertsschicht, das ist die Dicke einer Materieschicht, in der die Strahlung auf die Hälfte geschwächt wird. Nach 10 Halbwertsschichten ist die Strahlung auf weniger als 1 ‰ abgeschirmt.

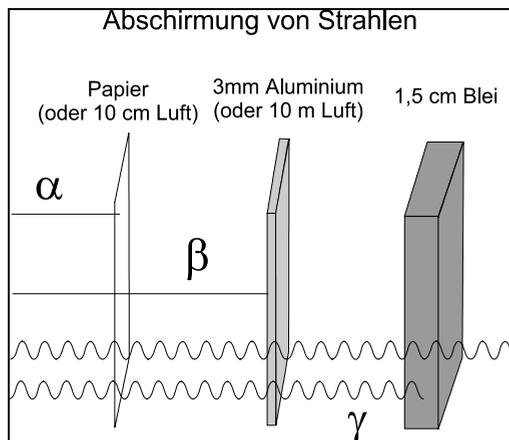


Abb. 3-2: *Abschirmung ionisierender Strahlung: Während α -Strahlung vollständig durch ein Blatt Papier und β -Strahlung z. B. durch 3 mm Aluminium abgeschirmt werden, werden für hochenergetische γ -Strahlung bereits mehrere Zentimeter Blei benötigt, um die Strahlung auf die Hälfte zu schwächen.*

Die *Strahlendosis* ist definiert als absorbierte Energie pro Masse (*Energiedosis D*). Im internationalen Einheitensystem (SI) ist die Einheit das Gray (Gy):

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule pro Kilogramm.}$$

Energiedosis

Man unterscheidet locker und dicht ionisierende Strahlung. Letztere ist *biologisch wirksamer*, da die durch sie hervorgerufenen Wirkungen in biologischen Strukturen enger beieinander liegen und erheblich schlechter repariert werden können.

*Biologische
Wirksamkeit*

Wegen ihrer dichten Energiedeposition entlang ihrer Bahnspur hat α -Strahlung bei gleicher absorbierter Energie eine wesentlich höhere biologische Wirkung als β -Strahlung.

Die *Äquivalentdosis H* entspricht dem Produkt aus der Gewebe-Energiedosis *D* und einem *Qualitätsfaktor Q*:

Äquivalentdosis

$$H = Q \cdot D.$$

Die Einheit der Äquivalentdosis ist das Sievert (Sv).

Die für ein einzelnes Organ T definierte *Organdosis H_{T,R}* ist die über ein einzelnes Organ gemittelte Energiedosis D, die durch eine bestimmte Strahlungsart R hervorgerufen wird.

Organdosis

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$$

bzw.

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R},$$

w_R = Strahlungs-Wichtungsfaktor.

Für locker ionisierende Strahlung ist der Zahlenwert des Strahlungs-Wichtungsfaktors gleich dem des Qualitätsfaktors gleich 1. In diesem Leitfaden wird daher zur Vereinfachung der Darstellung die Äquivalentdosis verwendet; für sie gilt demzufolge

$$1 \text{ Gy} \leftrightarrow 1 \text{ Sv.}$$

Demgegenüber geht man davon aus, dass dicht ionisierende Strahlung, wie α -Strahlung oder Neutronen unbekannter Energie, 20fach wirksamer als locker ionisierende Strahlung ist.

Äquivalentdosisleistung

Die Äquivalentdosisleistung \dot{H} ist die Äquivalentdosis H pro Zeit t :

$$\dot{H} = \frac{H}{t}.$$

Die Einheit ist Sv/h. 1 Sv ist eine relativ hohe Dosis, deshalb gibt man die Dosisleistung üblicherweise in mSv/h an.

Die mittlere Strahlenexposition in Deutschland durch natürliche Strahlenquellen beträgt etwa 2,4 mSv im Jahr.

Ortsdosis

Die *Ortsdosis* ist die Äquivalentdosis für Weichteilgewebe, gemessen an einem bestimmten Ort. Strahlenschutzmessgeräte (Ortsdosimeter) messen in der Regel die Ortsdosis. Sie gibt eine Abschätzung für die effektive Dosis aus externer Strahlung, die eine Person erhalten würde, wenn sie an diesem Messort stünde.

Effektive Dosis

Zur Bewertung des stochastischen Strahlenrisikos (siehe unten) dient die *effektive Dosis*. Die effektive Dosis E ist die Summe der mit den zugehörigen Gewebewichtungsfaktoren w_T (s. Tab. 3-2) multiplizierten Organdosen H_T in relevanten Organen und Geweben:

$$E = \sum_T w_T H_T.$$

Tab. 3-1: Strahlungs-Wichtungsfaktoren w_R (nach Anlage VI, Tab. C 1 StrlSchV)

Art und Energiebereich	Strahlungs-Wichtungsfaktoren w_R
Photonen, alle Energien	1
Elektronen und Myonen, alle Energien	1
Neutronen, Energie < 10 keV	5
10 keV bis 100 keV	10
> 100 keV bis 2 MeV	20
> 2 MeV bis 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protonen, außer Rückstoßprotonen, Energien > 2 MeV	5
Alphateilchen, Spaltfragmente, schwere Kerne	20

Durch die Gewebewichtungsfaktoren w_T werden die einzelnen Organdosen H_T entsprechend ihren relativen Beiträgen zu den stochastischen Strahlenwirkungen gewichtet. Diese Faktoren w_T spiegeln die unterschiedliche Empfindlichkeit der verschiedenen Organe und Gewebe gegenüber stochastischen Strahlenwirkungen (Krebsinduktion, Auslösung von Erbschäden) wider.

Tab. 3-2: Gewebewichtungsfaktoren w_T (nach Anlage VI Tab. C 2 StrlSchV)

Gewebe oder Organe	Gewebewichtungsfaktoren w_T
Keimdrüsen	0,20
rotes Knochenmark	0,12
Dickdarm	0,12
Lunge	0,12
Magen	0,12
Blase	0,05
Brust	0,05
Leber	0,05
Speiseröhre	0,05
Schilddrüse	0,05
Haut	0,01
Knochenoberfläche	0,01
andere Organe und Gewebe ^{1,2}	0,05

- 1) Für Berechnungszwecke setzen sich andere Organe oder Gewebe wie folgt zusammen: Nebennieren, Gehirn, Dünndarm, Niere, Muskel, Bauchspeicheldrüse, Milz, Thymusdrüse und Gebärmutter.
- 2) In den außergewöhnlichen Fällen, in denen ein einziges der anderen Organe oder Gewebe eine Äquivalentdosis erhält, die über der höchsten Dosis in einem der 12 Organe oder Gewebe liegt, für die ein Wichtungsfaktor angegeben ist, sollte ein Wichtungsfaktor von 0,025 für dieses Organ oder Gewebe und ein Wichtungsfaktor von 0,025 für die mittlere Organdosis der restlichen Organe oder Gewebe gesetzt werden.

*Stochastische
Strahlenschäden*

Bei den *stochastischen Strahlenschäden* (bösartige Neubildungen, Erbkrankheiten) handelt es sich um strahlenbedingte Gesundheitsschäden, für welche die Wahrscheinlichkeit des Auftretens, nicht aber die Schwere des Schadens, mit steigender Dosis zunimmt, wobei im Strahlenschutz davon ausgegangen wird, dass keine Dosischwelle vorliegt. Zwischen der Strahleneinwirkung und der klinischen Manifestation einer bösartigen Neubildung besteht eine jahre- bis jahrzehntelange Latenz.

Deterministische Strahleneffekte, zu denen sowohl die akute Strahlenkrankheit als auch die strahlenbedingten akuten und chronischen Gewebe- und Organveränderungen (z. B. akute Radiodermatitis, chronisches Radioderm, akute Pneumonitis, chronische Lungenfibrose) gehören, treten erst oberhalb bestimmter Schwellendosen auf. Der Schweregrad dieser Strahlenreaktionen nimmt mit steigender Dosis zu.

*Deterministische
Strahleneffekte*

Weiterführende Informationen

4 Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung, Unfallgeschehen

In Deutschland sind etwa 313 000 [6] beruflich strahlenexponierte Personen beschäftigt. Einen Überblick über die Zahl der in den typischen Arbeitsbereichen erteilten Genehmigungen und der dort tätigen Personen gibt Tab. 4-1.

4.1 Industrie und Technik

In den Anlagen der kerntechnischen Industrie (Anreicherung, Herstellung von Brennelementen, Kernkraftwerke, Entsorgung und Rückbau) sind in Deutschland etwa 8 000 beruflich strahlenexponierte Personen beschäftigt. Hinzukommen weitere 26 000 Personen, die in diesen Anlagen als Fremdfirmen-Mitarbeiter Wartungs- und Reparaturaufgaben durchführen.

Wenngleich die Häufigkeit von Arbeitsunfällen in diesen Anlagen niedrig ist, sind gelegentliche Verletzungen nicht ausgeschlossen. Trotz Schutzkleidung können durch die verletzte Haut radioaktive Stoffe inkorporiert werden.

Soweit solche Unfälle bei der Brennstoff-Herstellung oder bei der Abfallkonditionierung auftreten, kann es zu Inkorporationen von α -Strahlern kommen. Hier sind dann in aller Regel besondere Maßnahmen notwendig.

Im Nuklidgemisch eines Kernkraftwerkes herrschen immer γ -strahlende Nuklide vor. Sie sind messtechnisch gut erfassbar und werden daher Leitnuklide genannt. Beispiele sind Co-60 und Cs-137. Kontaminationen von Personen infolge von Zwischenfällen in Kernkraftwerken lassen sich durch Messen der Leitnuklide schnell feststellen. In Anlagen, deren Betriebszustand geändert wird, z. B. vom Leistungsbetrieb zum Rückbau, muss der Nuklidvektor neu bestimmt werden. Das Verhältnis der Leitnuklide zu anderen Nukliden kann sich erheblich verschoben haben.

Die Anlagen des Kernbrennstoff-Kreislaufes verfügen aufgrund gesetzlicher Bestimmungen und entsprechender Auflagen der zuständigen Überwachungsinstitutionen über eine effektive Organisation des Strahlenschutzes und über eine entsprechend organisierte Erste Hilfe.

Tab. 4-1: Nutzung von radioaktiven Stoffen und Geräten – typische Arbeitsbereiche – und Anzahl der beruflich strahlenexponierten Personen

Bereiche, Art der Anlagen	Zahl ¹⁾ der beruflich strahlenexponierten Personen
Medizin Beschleuniger Gammabestrahlungseinrichtungen Afterloadingeinrichtungen Nuklearmedizinische Abteilungen und Praxen Röntgeneinrichtungen	241.000
Kerntechnische Industrie	34.000
Eigenpersonal	8.000
Wartungsarbeiten durch fremdes Personal	26.000
sonstige Bereiche z. B.: Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mit radioaktiven Quellen Messeinrichtungen mit radioaktiven Quellen und anderer Umgang mit radioaktiven Stoffen Beschleuniger Bestrahlungseinrichtungen (Kunststoffbestrahlung, Sterilisation medizinischer und pharmazeutischer Produkte)	38.000

¹⁾ Zahlen gerundet (Stand 2004)

Zahlreiche Beschäftigte in der Industrie haben Umgang mit radioaktiven Stoffen oder ionisierender Strahlung bei *Qualitätssicherungsmaßnahmen*.

In vielen Fertigungsbereichen ist es notwendig, Produkte hinsichtlich ihrer Fertigungsqualität zu überwachen. Man nutzt dabei die Eigenschaft ionisierender Strahlung, Materie zu durchdringen, wobei ihre Intensität oder Richtung geändert wird. Dies wird messtechnisch erfasst (z. B. *zerstörungsfreie Werkstoffprüfung*).

Derartige Anlagen gibt es in vielen Ausführungen und mit sehr unterschiedlichen Strahlungsintensitäten, d. h. also auch mit sehr verschiedenen Primäraktivitäten, falls radioaktive Stoffe verwendet werden. Während die Schichtdickenmessung in der Kunststoff-Folienproduktion nur weniger Kilo-Becquerel eines β -Strahlenpräparates bedarf, werden für die Durchstrahlung von zentimeterdicken Stahlwandungen Strahlenquellen benutzt, deren Aktivitäten den Tera-Becquerel-Bereich erreichen.

Zu nennenswerten Unfällen ist es in der Vergangenheit verschiedentlich in der zerstörungsfreien Materialprüfung gekommen, insbesondere, wenn bei der mobilen Anwendung im Anlagen- und Pipelinebau Strahler unbemerkt aus dem Abschirmbehälter fielen. Dann konnte es geschehen, dass Mitarbeiter, die dies nicht bemerkt hatten, oder Unbeteiligte, die den Strahler fanden, ionisierender Strahlung ausgesetzt waren. Im Ausland hat es mit diesen Quellen auch tödliche Unfälle gegeben.

Wenn anstelle von radioaktiven Präparaten für solche Materialprüfungszwecke Röntgenröhren eingesetzt werden, kann es durch Fehlbedienung zu sehr hohen Teilkörperexpositionen, speziell der Hände, kommen.

Bei Schichtdicken-Messanlagen, die für die Papier- oder Kunststoffindustrie oder für die Bestimmungen der Schichtdicke auf galvanisierten oder aufgedampften Schichten verwendet werden, sind die Gefahren, die von den Strahlern ausgehen, gering. Diese Strahlenquellen haben eine niedrige Aktivität, so dass sie auch bei falschen Handhabungen zu keinen nennenswerten Expositionen führen können. Da es sich dabei, im Falle von Strahlenquellen, stets um umschlossene radioaktive Stoffe handelt, ist eine Kontamination nur möglich, wenn es durch mechanische Gewalt zu einer Beschädigung der Strahlerumhüllung kommt. Dann kann Radioaktivität austreten, und es kann zu Kontaminationen kommen. Häufig werden heute auch Röntgengeräte zur Schichtdickenmessung eingesetzt. Bei solchen

Geräten ist eine Exposition von Personen nur durch extremes Fehlverhalten denkbar.

Ionisierende Strahlung wird zum *Messen von Füllstand, Durchfluss oder Massenbelegung* (Flächengewicht von Fördergut) immer dort benutzt, wo andere Messmethoden wegen äußerer Einflüsse störanfällig sind. Dies kann z. B. bei der Messung heißer oder aggressiver Medien der Fall sein. Solche Medien befinden sich üblicherweise in dickwandigen Tanks, wo andere elektronische Messverfahren (kapazitiv, induktiv) nicht sinnvoll angewendet werden können. So findet man Füllstands- und Durchflussmessenrichtungen in großer Zahl in nahezu allen konventionellen Kraftwerken und Chemieanlagen oder Anlagen der Petrochemie.

Abhängig von der Schichtdicke des zu messenden Lager- oder Fördergutes werden dabei Aktivitäten zwischen Kilo- und Mega-Becquerel eingesetzt. Sie befinden sich in soliden Strahlerbehältern. Der Strahlengang kann für eine Kesselrevision von außen unterbrochen und der Unterbrechungsmechanismus kann verriegelt werden.

Sofern organisatorische Maßnahmen verhindern, dass Mitarbeiter sich im ungeschirmten Strahlengang aufhalten – wie es z. B. beim Begehen eines Behälters möglich wäre – kommt es mit solchen Geräten selten zu gravierenden Zwischenfällen.

Ein durchaus nennenswertes Gefährdungspotential liegt in *industriellen Bestrahlungseinrichtungen* vor. Allerdings ist in solchen Anlagen nur eine kleine Anzahl von Mitarbeitern beschäftigt. Die Einrichtungen werden benutzt, um entweder Produkte – vornehmlich für medizinische Anwendungen – durch ionisierende Strahlung zu sterilisieren oder um die Eigenschaften bestimmter Materialien – vornehmlich Kunststoffe – zu verändern.

Im ersteren Falle wird medizinisches Gerät durch die Abtötung von Mikroorganismen keimarm gemacht. Dies Verfahren ist rationeller und arbeitet zuverlässiger als herkömmliche Verfahren (Hitze, UV). Es kann z. B. auch bei hitzeempfindlichen Kunststoffen problemlos zur Anwendung gelangen. In dem zweiten erwähnten Anwendungsfall werden die Eigenschaften von Kunststoffen gezielt durch ionisierende Strahlung verändert; z. B. werden die äußeren Schichten von Schläuchen und Kabeln aus Kunststoff vernetzt. Befürchtungen, dass strahlensterilisierte Geräte oder strahlenvernetzte Kunststoffe selbst radioaktiv geworden seien, also selbst ionisierende Strahlung aussenden könnten, sind unbegründet.

Wegen ihrer hohen Dosisleistungen sind solche Anlagen sorgfältig gesichert. Die Bestrahlung selbst findet in abgeschirmten Betonräumen statt. Der Zutritt von Personen wird durch eine Reihe von Sicherungsmaßnahmen verhindert, solange die Strahlenquellen ausgefahren oder die Beschleuniger eingeschaltet sind. Die Dosisleistungen sind so hoch, dass Personen in kürzester Zeit schwere Schäden erleiden könnten, wenn sie der Strahlung ausgesetzt wären. Unfälle an solchen Anlagen sind im Ausland aufgetreten, wenn Sicherheitseinrichtungen versagt haben oder bewusst umgangen wurden.

Gegenüber den bisher genannten Einsatzgebieten treten die übrigen Anwendungen radioaktiver Stoffe in so genannten *Kleinquellen* hinsichtlich ihres Gefährdungspotentials für Mensch und Umwelt in den Hintergrund.

So findet beispielsweise *Thorium* als natürlicher radioaktiver Stoff von geringer spezifischer Aktivität, z. B. in Glühwendeln für Lampen oder als Beimischung in Schweißelektroden für eine spezielle Schweißart, Verwendung. Während in den Betrieben, die diese Elektroden herstellen, Strahlenschutzmaßnahmen abhängig von der verwendeten Menge an Thorium durchzuführen sind, ist der Umgang mit den fertigen Produkten für die damit betrauten Mitarbeiter in aller Regel mit keinen besonderen Gefahren verbunden.

Die Verwendung von *radioaktivierten Leuchtfarben* im Flugzeuginstrumentenbau und für Zifferblätter von Uhren ist weitgehend durch den Gebrauch von anderen Leuchtfarben, die durch die Einstrahlung von Sonnenlicht oder UV-Licht aktiviert werden, verdrängt worden. Zwar sind noch Instrumente und auch Uhren mit radioaktiv aktivierten Leuchtfarben für Spezialzwecke (Taucher) im Einsatz, jedoch wird ihre Leuchtfarbe heute tritiumaktiviert. Die von Tritium ausgehende schwache β -Strahlung durchdringt nicht die Glasabdeckung oder gar die metallene Rückwand der Uhren.

An weiteren Bauteilen der Elektronikindustrie seien hier noch *Leistungshaltröhren und Hochleistungssenderöhren* genannt, bei denen kleinste Mengen radioaktiver Stoffe für eine Vor-Ionisation sorgen. Solche Geräte werden in Deutschland von einigen Firmen hergestellt und im Wesentlichen in elektrischen Anlagen verwendet. Die darin enthaltenen Aktivitäten sind gering. Sie stellen für die Mitarbeiter der Anwenderbetriebe keine Gefahr dar.

Zu den Kleinquellen werden schließlich auch die *Statik-Eliminatoren* gezählt. Mit ihrer Hilfe werden elektrostatische Aufladungen – z. B. an Papiermaschinen – verhindert. Sie enthalten geringe Mengen an Polonium oder Promethium.

Zu den häufigsten Kleinquellen zählen im Übrigen *Ionisationsrauchmelder*. Sie enthalten heute überwiegend geringe Mengen eines α -Strahlers (z. B. Americium), der in eine Metallfolie von wenigen Millimetern Länge eingewalzt ist. Solange die Rauchmelder unzerstört sind, stellen sie keine Gefahr dar. Erst im Falle der Zerstörung des Melders besteht die Möglichkeit, dass die Metallfolie ebenfalls beschädigt und Americium freigesetzt wird. Dann wäre eine Gefährdung durch Inkorporation möglich. Denkbar wäre eine solche Zerstörung z. B. im Fall eines Brandes. Wer über eine größere Anzahl von Ionisationsrauchmeldern verfügt, wird daher mit der zuständigen Feuerwehr Kontakt aufnehmen, damit im Brandfall die entsprechenden Schutzmaßnahmen für die Einsatzkräfte angeordnet werden können. Zwischenzeitlich ist die Entwicklung von Brand- und Rauchmeldern, die ohne radioaktive Stoffe arbeiten, erheblich vorangeschritten. Ionisationsrauchmelder werden daher nur noch in speziellen Fällen eingesetzt.

4.2 Medizin und Wissenschaft

Kleinere Unfälle können in Forschungslabors sowie in Abteilungen für Nuklearmedizin, Strahlentherapie oder radiologische Diagnostik in Krankenhäusern und Arztpraxen auftreten. Neben konventionellen Verletzungen sind dabei folgende Einwirkungen ionisierender Strahlung oder radioaktiver Stoffe möglich:

- *Teilkörperbestrahlungen* (meist Hände) durch Röntgenstrahlung oder Quellen bei geringem Abstand oder fokussiertem Strahl.
- Bei größerem Abstand *Ganzkörper-Bestrahlung* durch Quellen oder Beschleuniger; allerdings sind dabei Dosen, die zu akuten Schäden führen können, unwahrscheinlich.
- *Kontamination* durch Radionuklide, evtl. auch deren *Inkorporation* über Inhalation sowie über Wunden (zerbrochene Gefäße!).

Bei derartigen Unfällen sind die Risiken durch ionisierende Strahlung für das Einsatzpersonal gering, keinesfalls darf die Furcht vor Strahlung und Radioaktivität zu Verzögerungen bei der konventionellen Behandlung

führen. Bei Unfällen in solchen Instituten ist außerdem zu beachten, dass dort manchmal mit „exotischen“ Radionukliden umgegangen wird, deren Nachweis schwierig ist oder die eine sehr kurze Halbwertszeit aufweisen, so dass die spätere Rekonstruktion des Unfalles erschwert wird.

4.3 Transport radioaktiver Stoffe

Transporte radioaktiver Stoffe unterliegen den Gefahrgutverordnungen. Diese Transportvorschriften basieren auf internationalen Empfehlungen, insbesondere denen der IAEA (International Atomic Energy Agency), womit folgende Ziele verfolgt werden: die Freisetzung radioaktiver Stoffe soll während des Transportes und bei etwaigen Unfällen verhindert werden, Gefahren durch die Strahlung vom intakten oder bei einem Unfall beschädigten Versandstück sollen minimiert werden. Beim Transport von Kernbrennstoffen muss eine Kritikalität ausgeschlossen werden.

Diese Ziele werden durch die Begrenzung der Art und Menge des radioaktiven Stoffs nach Typ der Verpackung, die Festlegung von Anforderungen an die Verpackung und Regeln für die Handhabung während des Transportes erreicht.

Bei den wenigen Transportunfällen, zu denen es bisher gekommen ist, sind keine schwerwiegenden Folgen aufgetreten, die auf ionisierende Strahlung oder Radioaktivität zurückzuführen waren. Für die Feuerwehren gilt nach der Dienstvorschrift 500 allgemein, bei Transportunfällen wie in Gefahrengruppe IIA vorzugehen, also persönliche Schutzausrüstung zu verwenden und die Personendosis zu messen (vergl. § 41 StrlSchV). Eine besonders fachkundige Person, wie in Gefahrengruppe IIIA gefordert, ist nicht notwendig.

⇒ Die Rettung von Menschen ist notfalls auch ohne Schutzausrüstung durchzuführen.

Bei der Mehrzahl der Transporte von radioaktivem Material handelt es sich um Stückgutsendungen für medizinische Anwender, Forschungseinrichtungen und Industrie. Diese Transporte werden ohne besondere Sicherungsmaßnahmen von Spediteuren oder der Bahn durchgeführt. Bei Unfällen ist mit gravierenden Folgen durch Radioaktivität nicht zu rechnen.

Die Zahl der Transporte von unbestrahlten oder bestrahlten Brennelementen aus dem Brennstoffkreislauf der Kernreaktoren ist weit geringer, doch sind dabei die Aktivitäten und damit das Gefahrenpotential größer. Diese Transporte unterliegen besonderen Bedingungen und werden häufig, zur Sicherung gegen Einwirkungen Dritter, von der Polizei begleitet.

4.4 Verlust oder Diebstahl von Strahlenquellen

Der Umgang mit verloren gegangenen oder entwendeten Strahlenquellen birgt sowohl Gefahren für die illegalen Händler als auch für Nichtbeteiligte.

Beim illegalen Umgang oder beim Umgang mit gefundenen Strahlenquellen sind bisher in Mitteleuropa noch keine Unbeteiligten zu Schaden gekommen, doch sind weit reichende Folgen denkbar, wie andere Fälle vor Jahren in Juarez (Mexiko, 1962), Goiañia (Brasilien, 1987), Yanango (Peru, 1999), Cochabamba (Bolivien, 2002) gezeigt haben, und bei denen es auch zu Todesfällen gekommen ist. Bei den Vorfällen wurden entweder ausgesonderte Bestrahlungsanlagen aus Krankenhäusern gestohlen und zerlegt bzw. illegal entsorgt; oder es wurden verloren gegangene Strahlenquellen gefunden, aber nicht als solche erkannt.

Solche vagabundierenden Strahlenquellen können sowohl durch äußere Bestrahlung als auch durch Inkorporation gefährlich werden.

Selbst bei Strahlern für die Geräteprüfung, zur Materialprüfung usw. kann unsachgemäße Handhabung lokal zu akuten Strahlenschäden führen, wenn der Strahler z. B. für längere Zeit in Taschen der Kleidung getragen wird, wie dies bisher bei einem Fall von Cs-137-Schmuggel berichtet wurde. Die Gefahr für unbeteiligte Dritte ist dabei geringer, da der Abstand größer und die Expositionszeit meist kurz ist. Auf akute lokale Strahlenschäden können in solchen Fällen auffällige Hautrötungen oder Verbrennungen hinweisen (s. a. Kapitel 5.5.4).

Solange Strahlenquellen umschlossen sind und nicht mit Gewalt geöffnet werden, besteht keine Kontaminations- und Inkorporationsgefahr. Bei offenen Quellen handelt es sich häufig um natürliche radioaktive Stoffe wie z. B. Thorium, seltener auch um abgereichertes Uran, das als Abschirmmaterial in der Herstellung von Strahlenquellen Verwendung findet.

Die unmittelbare Gefährdung durch Plutonium wird häufig überschätzt. Seine Isotope sind in der Mehrzahl α -Strahler, manche auch β -Strahler. Die

begleitende γ -Strahlung ist niederenergetisch, und es werden nur wenige Neutronen emittiert. Daher ergibt sich für Plutonium bei externer Bestrahlung keine nennenswerte Dosis. Eine Inkorporation, insbesondere eine Inhalation von Plutonium, aber ist mit allen Mitteln zu verhindern, da diese zu einer hohen Folgedosis führen kann.

5 Biologische Strahlenwirkungen

5.1 Grundlagen

5.1.1 Physikalische Grundlagen

Reichweite der α - und β -Strahlung

Aufgrund ihrer Ladung verliert α - und β -Strahlung beim Durchdringen von Materie ihre Energie in einer Vielzahl von Einzelprozessen. Sie weist daher eine begrenzte (maximale) Reichweite auf. Je nach Reichweite der Strahlung werden die Energiebeträge entlang der Wegstrecke in unterschiedlicher Dichte, z. B. auch auf die Biomaterie übertragen (sog. linearer Energietransfer LET), wobei es sowohl zu Anregungen als auch zu Ionisationen kommt. Die mittlere Zahl der Ionisationsakte pro Volumenelement wird als Ionisationsdichte bezeichnet. Da α -Teilchen eine größere Masse und Ladung als β -Teilchen besitzen, ist der Energieverlust pro Wegstrecke der α -Teilchen bei gleicher Gesamtenergie etwa 10 000 mal größer; sie erzeugen also bei der Energieübertragung, z. B. auf feste Stoffe, eine sehr viel dichtere „Bremsspur“. Entsprechend geringer ist ihre Reichweite.

Die Reichweite von α -Strahlung beträgt in Luft wenige Zentimeter, in Wasser einige tausendstel Millimeter (einige μm). Für β -Strahlung ergeben sich maximale Reichweiten bis zu 10 m in Luft und 2 cm in Wasser. Energieverlust und Reichweite in organischen Geweben entsprechen in etwa denen in Wasser. Wegen dieser begrenzten Reichweite kann Strahlung geladener Teilchen einfach abgeschirmt werden: α -Strahlung z. B. durch ein Blatt Papier, β -Strahlung z. B. durch 3 mm Aluminium. Inkorporierte α - oder β -Strahler führen zu einer hohen Dosis im betroffenen Organ, da diese ihre gesamte Energie innerhalb ihrer Reichweite von wenigen μm bis cm an das Gewebe abgeben. Dagegen ergibt sich bei Bestrahlung der Haut von außen mit α -Strahlung in der Regel keine biologisch wirksame Dosis, da sie

die äußeren, nicht mehr vitalen verhornten Epithelschichten nicht zu durchdringen vermag.

Bei Einwirkung von α -Strahlung auf bestimmte Abschnitte der wesentlich dünneren Bronchialschleimhaut wird hier die strahlenempfindliche Basalzellschicht durchaus getroffen, so dass es zu biologischen Effekten – z. B. Krebsentwicklung – kommen kann.

β -Strahlung wird bei äußerer Kontamination schon teilweise von der Kleidung abgeschirmt. Infolge ihrer größeren Reichweite geben sie die restliche Energie auch an die tieferen Hautschichten ab und können diese bei hoher Flächenaktivität akut schädigen (sog. β -burns, s. Tab. 5-1).

Tab. 5-1: Dicke der Epidermis (Oberhaut) und Reichweite von α - und β -Strahlung im biologischen Gewebe

Dicke der Epidermis (obere Hornschicht bis Basalzellschicht)	
Mittelwert	0,07 mm (7 mg/cm ²)
Schwankungsbreite	0,01-0,3 mm (1-30 mg/cm ²)
Maximale Reichweite im Gewebe	
α -Strahlung	0,033-0,046 mm
β -Strahlung	max. bis 20 mm
– H-3	≈ 0,01 mm
– Cs-137	≈ 2,5 mm
– I-131	≈ 2 mm
– Sr-90	≈ 3 mm
– P-32	≈ 9 mm

Schwächung der Photonen- und Neutronen-Strahlung

Anders als die geladenen Teilchen der α - und β -Strahlung verhalten sich die nichtgeladenen Photonen (Röntgen- und γ -Strahlung) sowie die ungeladenen Neutronen. Sie werden nicht quasi stetig gebremst, sondern verlieren ihre Energie unter Umständen in einem einzigen Wechselwirkungsereignis. Bis es zu einem solchen Ereignis kommt, kann diese Strahlung

bereits größere Materieabschnitte durchdrungen haben. Die Schwächung dieser Strahlung besteht daher im Wesentlichen aus einer Änderung der Photonen- bzw. Neutronenzahl und folgt daher einem Exponentialgesetz, und man kann keine maximale Reichweite angeben. Vielmehr ist es üblich, eine Halbwertsdicke oder Zehntelwertsdicke anzugeben; das sind diejenigen Schichten, welche die Strahlendosis auf die Hälfte bzw. ein Zehntel reduzieren.

Die Halb- bzw. Zehntelwertsdicken hängen von der Energie der Strahlung sowie von der durchstrahlten Materie ab.

Für Neutronen mittlerer Energie liegt die Halbwertsdicke in Wasser und Beton zwischen 6 und 9 cm, für γ -Strahlung des Kobalts liegt sie bei knapp 15 cm in Wasser und etwa 15 mm in Blei. Röntgenstreustrahlung lässt sich effektiv schon mit dünnen Bleischichten abschirmen. Mit einer Bleigummischürze von 0,5 mm Bleigleichwert wird Röntgenstreustrahlung auf etwa 1 % abgeschwächt.

Dosisabschätzung bei externer Bestrahlung

Mit Hilfe von Faustregeln kann bei externer Bestrahlung grob die zu erwartende Äquivalentdosisleistung \dot{H} (die Äquivalentdosis pro Zeit) abgeschätzt werden [7]. Durch Multiplikation mit der Aufenthaltszeit wird daraus die Äquivalentdosis H berechnet.

Bei einem Unfall ist es immer schwierig, genaue Angaben sowohl über den Abstand zum Strahler als auch über die Dauer der Einwirkung zu bekommen. Oft wird man mit Hilfe einer solchen Abschätzung nur Anhaltswerte für eine maximal mögliche Dosis bzw. für eine Mindestdosis erhalten können und sich bei therapeutischen Maßnahmen an dem klinischen Reaktionsbild orientieren müssen.

Für punktförmige (kleine) Strahlenquellen gilt das quadratische Abstandsgesetz, das heißt, Verdopplung des Abstandes zum Strahler reduziert die Dosisleistung auf ein Viertel, Halbierung des Abstandes erhöht sie auf das Vierfache (s. Abb. 5-1).

γ -Strahlenquellen

Bei externer γ -Strahlung werden alle Organe im Körper relativ gleichmäßig bestrahlt; Bewertungsgröße ist die Dosis an der dem Strahler zugewandten Körperseite. Bei stark inhomogener Bestrahlung sind jedoch die Teilkörperdosen zu ermitteln.

Für γ -Strahler, wie sie in Industrie und Forschung üblich sind (Energie um 1 MeV), gilt näherungsweise:

⇒ 1 MBq ergibt in 1 m Abstand eine Dosisleistung von ca. $0,3 \mu\text{Sv/h}$.

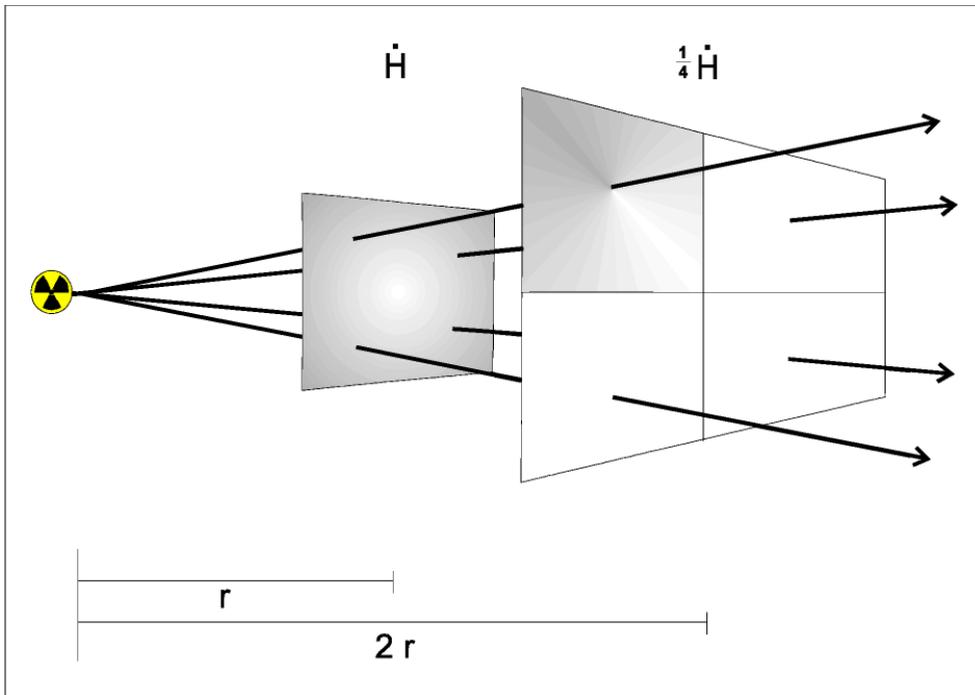


Abb. 5-1: Abnahme der Dosisleistungen mit zunehmendem Abstand zur Strahlenquelle

Bei in der nuklearmedizinischen Diagnostik verwendeten γ -Strahlern (Energie um 150 keV) beträgt die Dosisleistung maximal 1/10 dieses Wertes.

Durch Umkehrung dieser Regel kann aus einer Dosisleistungsmessung auf die Aktivität des punktförmigen Strahlers geschlossen werden, wenn der Abstand bekannt ist.

Werden Personen bei einem Zwischenfall kontaminiert, besteht eine gewisse Möglichkeit, dass helfende Personen sich ebenfalls kontaminieren. Es sind aber nur wenige Unfallszenarien denkbar, wo dies zu einer tatsächlichen Gefährdung führt. Bei Einhaltung selbstverständlicher Maßnahmen der Hygiene ist nicht mit einer nennenswerten Exposition zu rechnen. Nach Erstdekontamination des Verunfallten verbleibt üblicherweise keine gefahrbringende Kontamination. Zur Verdeutlichung dient folgendes Beispiel:

⇒ Eine mit der (hohen) Flächenaktivität von 1 kBq/cm^2 kontaminierte Person erzeugt in 1 m Abstand die (niedrige) γ -Dosisleistung von etwa $1 \text{ }\mu\text{Sv/h}$.

β -Strahlenquellen

Bei β -Strahlern kann die Absorption der β -Strahlung in Luft eine große Rolle spielen. Als kritische Organe für eine externe β -Bestrahlung kommen wegen der geringen Reichweite der β -Teilchen (einige Millimeter im Gewebe) die Haut und die Augenlinse in Betracht. Es gilt folgende Abschätzung für β -Strahler (mit $E_{\text{max}} > 0,7 \text{ MeV}$):

⇒ 1 MBq einer β -Strahlenquelle gibt im Arbeitsabstand von 50 cm für die nicht geschützte Haut und die nicht geschützte Augenlinse eine Dosisleistung von maximal etwa $30 \text{ }\mu\text{Sv/h}$.

All diese Faustregeln berücksichtigen keine Schwächung der Strahlung durch Quellenfassungen, Aufbewahrungs- oder Transportbehälter.

Röntgenstrahler

Im Nutzstrahlenbündel einer Röntgenröhre treten hohe Dosisleistungen auf. Sie werden von dem Röhrenstrom, der Filterung, dem Anodenmaterial und der Beschleunigungsspannung bestimmt.

Für industriell und in der Forschung verwendete Röntgenröhren mit Wolfram-Anode und Beryllium-Fenster gilt ohne Zusatzfilterung:

⇒ Eine Röntgenröhre mit einem Röhrenstrom von 1 mA liefert in 1 m Abstand vom Fokus eine Dosisleistung von 100 mSv/min.

Folglich können sich bei Unfällen Strahlendosen im Bereich von einigen Sievert ergeben, die deterministische Effekte zur Folge haben. Für die im medizinischen Bereich genutzten Röntgenröhren mit 2,5 mm Aluminiumfilterung ergibt sich immer noch (bei ca. 100 kV Beschleunigungsspannung und 1 mA Röhrenstrom) in 1 m Abstand eine Dosisleistung von ca. 10 mSv/min.

5.1.2 Zelluläre Grundlagen

Ausgangspunkt der Strahlenwirkung im Organismus ist die Energieabsorption in essentiellen Biomolekülen, vor allem der Desoxyribonukleinsäure (DNA), der Trägerin der genetischen Information. Die Strahlung bewirkt dort Ionisations- und/oder Anregungsvorgänge, die zu einer Zerstörung der molekularen Struktur führt. Wenn auch die Beträge der insgesamt absorbierten Energie klein sind, die selbst bei hohen Strahlendosen auftreten, so ruft die Konzentration auf räumlich enge Bereiche doch zahlreiche molekulare Primär- und Sekundärprozesse hervor. Diese setzen eine Reaktionskette im subzellulären, zellulären sowie im Organ- und Organism-Bereich und schließlich im Gesamtorganismus in Gang, die erhebliche biologische Auswirkungen nach sich ziehen kann. Die biophysikalischen Vorgänge im subzellulären Bereich führen über direkte und indirekte Prozesse, im letzteren Falle z. B. unter Bildung von Wasserradikalen und Wasserstoffperoxid, u. a. zu biologisch bedeutsamen Veränderungen an der DNA des Zellkernes, die für die Übertragung der Erbinformationen auf die nachfolgenden Zellgenerationen verantwortlich ist. Dabei entstehen insbesondere Einzel- und Doppelstrangbrüche sowie Basenschäden an den DNA-Molekülen. Diese können über verschiedene Mechanismen fehlerfrei oder auch fehlerhaft repariert werden. Ergebnisse dieser zellulären Strahlenwirkung sind entweder vorzeitiger Zelltod, Zellwachstums- und Zellfunktionsstörungen oder bleibende Veränderungen am Chromosomenapparat des Zellkerns der Körperzellen (Induktion von somatischen Mutationen; mögliche Krebsentwicklung) oder der Keimzellen (Induktion von genetischen Mutationen; mögliche Erbkrankheiten).

Tab. 5-2: *Wichtige Einflussgrößen für die biologische Variabilität der Strahlenwirkung*

Wichtige Einflussgrößen für die biologische Variabilität der Strahlenwirkung		
Physikalische Faktoren	Bestrahlungs- oder spezifische Bedingungen	Biologische Faktoren
Strahlenart Strahlenqualität / LET *) Reichweite/Durchdringungsvermögen Energiedosis	Zeitliche Dosisverteilung: – Dosisleistung – Dosisfraktionierung – Gesamt-Expositionszeit Räumliche Dosisverteilung: – bestrahlte Körperregion – bestrahltes Volumen – Bestrahlungsgeometrie/Tiefendosisverlauf	Alter, Geschlecht, Gewebearbeit, Erholungsprozesse, Milieubedingungen (Gewebs-sauerstoffpartialdruck), Individuelle Besonderheiten (Disposition/Konstitution)
Zusätzliche Einflussgrößen bei Kontamination/Inkorporation		
Physikalische Halbwertszeit Aktivität Physikalische und chemische Eigenschaften (Löslichkeit, Partikelgröße, anionische oder kationische Form der Radionuklidbindung)	Biologische Halbwertszeit, Aufnahmemodus (inhalativ, ingestiv, perkutan bzw. Wunde) Verteilungsmuster in Abhängigkeit vom Aufnahmeweg, vom Löslichkeitsverhalten und von der Organaffinität des radioaktiven Elements oder seiner Verbindungen	Stoffwechsel- und Transferprozesse (Deposition, Diffusion, Penetration, Resorption, Persorption, Retention)

*) LET = Linearer Energietransfer

Ausmaß und Qualität der zellulären Strahlenwirkung hängen von einer Vielzahl physikalischer, biologischer und expositionsspezifischer Einflussgrößen ab (s. Tab. 5-2). Von Bedeutung sind vor allem die lokale Dosis, abhängig von Strahlenart und Gewebe, und die Strahlenempfindlichkeit der betroffenen Zelle.

5.1.3 Strahlenwirkung auf Organe und Gewebe

Strahlenwirkungen auf den lebenden Organismus werden als *somatisch* bezeichnet, wenn sie sich auf die Körperzellen des exponierten Organismus selbst beziehen. Betreffen sie hingegen die bestrahlten Keimzellen des Individuums und damit möglicherweise die Nachkommenschaft, werden sie *genetisch (vererbbar)* genannt.

Weiterhin sind stochastische und deterministische Strahlenwirkungen zu unterscheiden.

Bei den *stochastischen* Strahleneffekten, zu denen beispielsweise die Induktion von Mutationen, mit der möglichen Folge von Tumoren oder Erbkrankheiten zählen, ist die *Wahrscheinlichkeit* des Auftretens dosisabhängig, nicht aber die Schwere des Schadens (s. Abb. 5-2). Stochastische Strahlenwirkungen sind immer Spätwirkungen, da z. B. eine Krebserkrankung erst nach jahre- oder jahrzehntelanger Latenzzeit klinisch manifest wird.

Bei Kausalitätserwägungen ist zu berücksichtigen, dass die für das strahlenbedingte Krebsrisiko aufgestellten Dosis-Risiko-Kurven und die daraus berechneten Risikoeffizienten auf epidemiologischen Erkenntnissen beruhen. Diese basieren insbesondere auf Untersuchungen an den Überlebenden nach den Atombombenabwürfen von Hiroshima und Nagasaki sowie an Strahlentherapiepatienten und auch an beruflich strahlenexponierten Personen. Alle untersuchten Gruppen waren im Vergleich zur allgemeinen Bevölkerung mit relativ hohen Dosen exponiert worden. Vom stochastischen Risiko in diesem hohen Dosisbereich wird linear, ohne Annahme einer Schwellendosis in den niedrigen, Strahlenschutz-relevanten Dosisbereich extrapoliert. Dabei ist die durch den Nullpunkt des Koordinatensystems gelegte *Gerade* als eine auf einer Konvention basierende Konstruktion anzusehen (Linear Non-Threshold, LNT). Da direkte Daten über Dosis-Effekt-Beziehungen im niedrigen Dosisbereich fehlen, sind Aussagen zum Strahlenrisiko infolge Einwirkung kleiner Dosen jedoch nur auf der Basis von Extrapolationen möglich und daher mit Unsicherheiten behaftet.

Im Bereich kleiner Strahlendosen können nur stochastische Wirkungen auftreten, deren Folgen sich somatisch in Form von Krebs oder genetisch in Form von Erbkrankheiten ausprägen können. Sie sind auch bei geringen Strahlendosen und damit auch als Folge einer natürlichen Strahlen-

exposition nicht ausgeschlossen. Dieser nach Lebensstil und -ort quantitativ erheblich variierenden natürlichen Strahleneinwirkung (mittlere effektive Jahresdosis in Deutschland 2,4 mSv) kommt für die Einschätzung zusätzlicher Strahlenexpositionen große Bedeutung zu. Das Leben auf der Erde hat sich unter dieser Strahleneinwirkung entwickelt. Ionisierende Strahlung künstlichen Ursprungs wirkt in gleicher Weise.

Mit heutigen Methoden ist nicht zu unterscheiden, ob eine Krebserkrankung durch Strahlung oder andere Schadstoffe verursacht wurde oder wegen weiterer unbekannter Ursachen aufgetreten ist.

Anders liegen die Verhältnisse bei den *deterministischen* Strahlenschäden. Bei diesen sind *Art* und *Schweregrad* des Gesundheitsschadens eine Funktion der Dosis. Ihre klinische Manifestation ist erst ab einem bestimmten Dosisbereich (Dosischwelle) zu erwarten (s. Abb. 5-3). Zu den deterministischen Strahlenschäden zählen die akute Strahlenkrankheit nach Ganzkörperbestrahlung (s. Kap. 5.5) sowie akute Gewebsreaktionen nach hoher Teilkörperexposition, wie z. B. die akute Radiodermatitis oder die Strahlenpneumopathie.

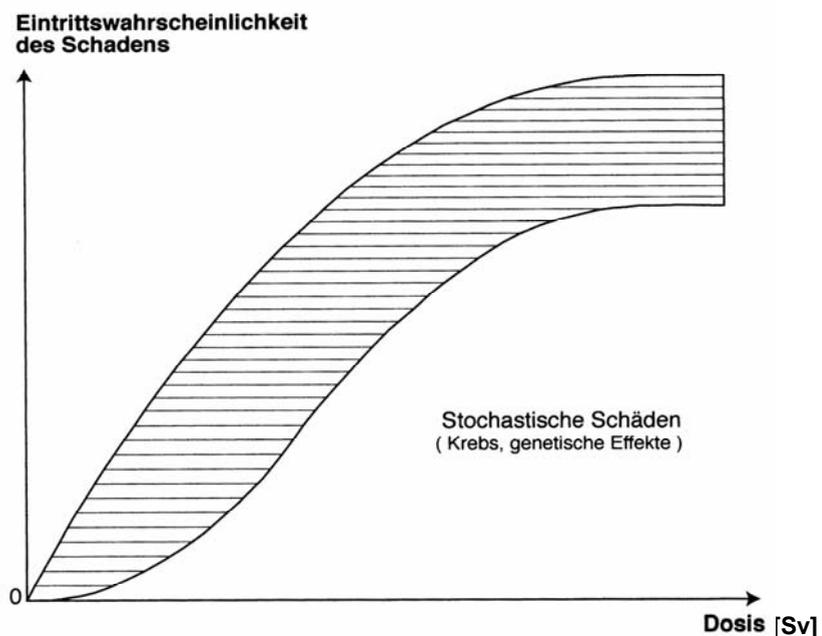


Abb. 5-2: Eintrittswahrscheinlichkeit eines stochastischen Schadens in Abhängigkeit von der Dosis (Sv)

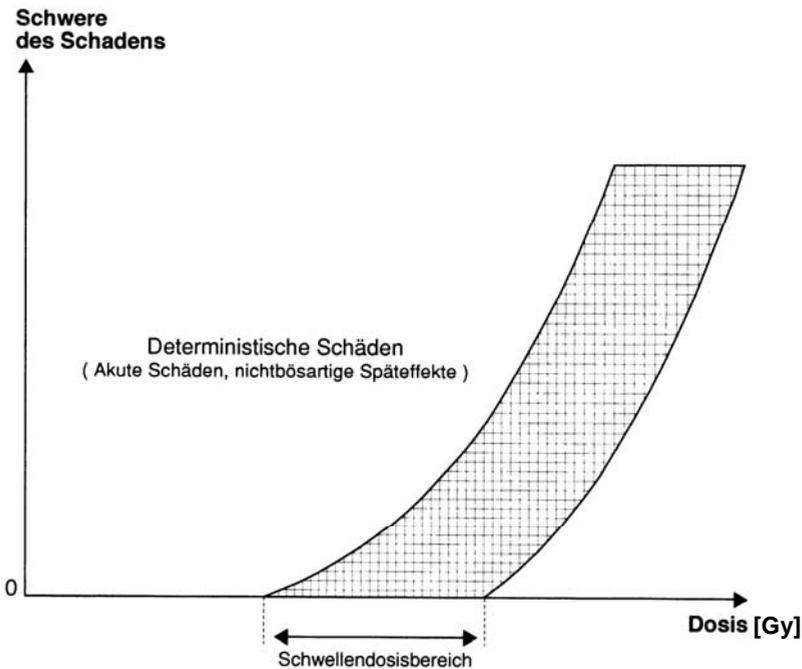


Abb. 5-3: Schwere eines deterministischen Schadens in Abhängigkeit von der Dosis (Gy)

Im Hinblick auf die Verwendung der hier verwendeten Dosiseinheiten Sievert (Sv) und Gray (Gy) soll darauf hingewiesen werden, dass Dosisangaben in Sievert (Sv) nur sinnvoll im Zusammenhang mit stochastischen Effekten (Tumor- und Erbrisiko) sind, da die verwendeten Wichtungsfaktoren nur für sie abgeleitet wurden. Immer wenn es um Zelltod geht (also bei den deterministischen Effekten), sollte die Energiedosis verwendet werden und die Dosisangabe dementsprechend in Gray (Gy) erfolgen. Begründung: Die Strahlungs-Wichtungsfaktoren sind abgeleitet von den Werten der relativen biologischen Wirksamkeit (RBW), die für stochastische Effekte beobachtet werden. Für Effekte, die mit dem Zelltod zu tun haben, liegen die RBW-Werte jedoch im Allgemeinen deutlich niedriger als für stochastische Effekte.

Als chronische oder späte deterministische Strahlenschäden sind beispielsweise chronische Strahlenreaktionen der Haut (sog. Rioderm), Strahlenfibrosen in verschiedenen Organen sowie Linsentrübungen (Katarakt) zu nennen. Dabei können die Latenzzeiten mehrere Jahre bis Jahrzehnte betragen und sich so durchaus mit denjenigen für stochastische Strahleneffekte überlagern.

Tab. 5-3: Schwellendosen für ausgewählte klinische Erscheinungsbilder nach akuter Strahlenexposition (unter Berücksichtigung von ICRP 60, 1991 [8]; UNSCEAR 1993 [9])

Expositionsart	Art des Strahlenschadens	Schwellendosis in Gy für locker ionisierende Strahlung
Ganzkörperexposition	– Schädigung des Knochenmarks mit klinisch signifikanter Herabsetzung der Blutbildung	ca. 0,5
	– akute Strahlenkrankheit	ca. 1-1,5
Teilkörperexposition	– Epilation der Haut (nach ca. 3 Wochen) vorübergehend	> 3
	bleibend	ca. 10
	Haut-Erythem und Desquamation (nach ca. 2 bis 4 Wochen)	3-5
	– feuchte Epitheliolyse und Haut-Ulzera	10-20
	– Strahlendermatitis mit Blasenbildung (nach ca. 1 Monat)	ca. 20
	– Hautnekrosen	> 50
	– Bleibende Sterilität männlich	3,5-6
	weiblich*	2,5-6
	– Störungen der Spermienbildung	0,1
	– Linsentrübung (Manifestation als Strahlenschaden nach Jahren)	2**

Schwellendosen für Hautschäden nach [10,11]

* altersabhängig

** Dieser Wert wird derzeit diskutiert (UNSCEAR), es liegen Hinweise vor, dass dieser Wert niedriger ist.

Für einige deterministische Schadensbilder sind in Tab. 5-3 Schwellendosen zusammengestellt. Solche und höhere Dosiswerte können bei Strahlenverunfallten durchaus auftreten. Sie sind jedoch bei Erste Hilfe leistenden Ärzten und Mitgliedern von Hilfsorganisationen äußerst unwahrscheinlich. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass diese sich bei ihren Hilfsmaßnahmen nicht längere Zeit und unkontrolliert im Strahlenfeld aufhalten und dabei bestimmte Dosiswerte überschreiten (s. Kap. 2.4).

5.2 Deterministische Strahlenwirkung auf die Gonaden

Die schädigende Wirkung ionisierender Strahlung auf die männliche und weibliche Fertilität (Fruchtbarkeit) wurde in zahlreichen Experimenten an verschiedenen Tierspezies nachgewiesen und auch durch Beobachtungen am Menschen bestätigt.

Hoden (Testis)

Im Hoden sind die Hormon produzierenden Zellen mit einer Schwellendosis deutlich über 10 Gy relativ unempfindlich gegenüber einer Strahlenexposition.

In der Spermatogenese zeigen die Spermatogonien (frühe Vorläuferzellen) die höchste Strahlenempfindlichkeit. Durch die Bestrahlung werden diese empfindlichen, frühen Stadien abgetötet, während nachfolgende, unempfindlichere Stadien noch die Reifung vollenden können. Der fehlende Zellnachschub wird somit im Spermogramm frühestens nach Durchlaufen eines Reifungszyklus (40-60 Tage) manifest. Erst höhere Dosen > 3 Gy können auch spätere Keimzellstadien beeinträchtigen und dieser Zeitraum kann damit verkürzt werden.

Eine temporäre und partielle Abnahme der Spermienzahl kann bereits ab Dosen von 0,1 Gy auftreten. Höhere Dosen führen zu einem kompletten Verlust der Spermienproduktion, der dosisabhängig über lange Zeiträume bis zu mehreren Jahren bestehen bleiben kann; die Erholungszeit beträgt ca. 2 Wochen/10 mGy. Ab einer Dosis von 1,5 Gy muss mit einem permanenten Ausbleiben der Spermienproduktion gerechnet werden, ab 4 Gy ist keine Erholung mehr möglich.

Beim Jungen vor der Pubertät ist die Strahlenempfindlichkeit der (ruhenden) Keimzellen geringer als beim Erwachsenen. Jedoch sind die Hormon

produzierenden Leydig'schen Zwischenzellen empfindlicher als beim Erwachsenen.

Eierstock (Ovar)

Schon beim Fetus ist die Ei-Entwicklung als sehr strahlenempfindlich zu bezeichnen. Weniger strahlensensibel sind dagegen die primären und sekundären Oozyten (Eizellen). Eine hohe Strahlenempfindlichkeit besitzen jedoch ab der Pubertät – insbesondere im Stadium der Vermehrung – die Granulosazellen des Follikels (spezifische Zellen des Eibläschens), die für die Existenz der befruchtungsfähigen Eizelle verantwortlich sind. Da die Anzahl der Follikel mit zunehmendem Alter stetig abnimmt, nimmt die Strahlenempfindlichkeit der Frau in Bezug auf eine Störung von Fertilität und Hormonproduktion mit dem Alter zu.

5.3 Strahlenwirkung auf den Embryo/Fetus

Umfang, Art und Schwere der Auswirkungen der ionisierenden Strahlung auf den menschlichen Embryo/Fetus hängen in entscheidendem Maße von der Phase der Keimesentwicklung, in der die Strahlung einwirkt, und von der Strahlendosis im Bereich der Leibesfrucht ab [12, 13].

Besonders strahlenempfindlich im Hinblick auf letale Effekte sind die embryonalen Zellen in der *Präimplantationsphase*, also vor der Einnistung in den Uterus (in den ersten 10 Tagen der Schwangerschaft, vom Zeitpunkt der Konzeption an gerechnet). Hier kommt es in der Regel zum Absterben und zur Resorption der Zellen.

In der *Hauptorganbildungsphase* (bis Ende der 7. Schwangerschaftswoche) können durch Strahleneinwirkung (ab 100 bis 200 mGy) die verschiedensten Formen kindlicher Fehlbildungen entstehen, wobei meist Skelettanomalien, vorwiegend im Schädelbereich, zu beobachten sind. Diese Veränderungen treten beim Menschen auch nach hohen Dosen vergleichsweise selten auf.

Die Bestrahlung in der sich anschließenden *Fetalphase* (ab etwa 50. Tag), in der sich das Körper- und Organwachstum vollzieht, hinterlässt keine Fehlbildungen mehr, sondern vorwiegend Wachstumsstörungen. Anzumerken ist jedoch, dass die Ausbildung der Großhirnrinde vor allem in diesem Zeitraum abläuft, wodurch die Strahlenempfindlichkeit in der 8.-15. Schwanger-

schaftswoche und – etwas geringer – in der 16.-25. Woche mit den Folgen schwerer geistiger Entwicklungsstörungen vergleichsweise hoch ist.

Insbesondere zu beachten ist die hohe Empfindlichkeit des sich entwickelnden Lebens im Hinblick auf die Auslösung von Tumorerkrankungen, die sich im Kindesalter bemerkbar machen. Nach einem Übersichtsartikel [14] deutet sich an, dass bereits nach einer Strahlendosis von 10 mSv während der Schwangerschaft eine Erhöhung kindlicher Tumorfälle eintreten könnte.

5.4 Strahlenwirkung auf die Augenlinse

Die Schwellendosis zur Induktion einer Linsentrübung liegt im Bereich von 2 Sv¹⁾. Es kommt zu einer Störung der Epithelbildung am Linsen-Äquator: Die neu gebildeten Zellen wandern nicht mehr physiologisch als Epithel zum vorderen Linsenpol, sondern als pseudo-epitheliale Zellen zum epithelfreien hinteren Pol. Dort beginnt als Folge der Degeneration dieser Zellen die Kataraktbildung (im Gegensatz zur Alterskatarakt, die am vorderen Pol beginnt). Die Latenzzeit ist abhängig von der Strahlendosis, beträgt aber mindestens 0,5 bis 2 Jahre. Der operative Linsenersatz ist heute eine Routinemaßnahme, so dass die Bedeutung der Strahlenkatarakta in den Hintergrund tritt.

5.5 Das akute Strahlensyndrom

5.5.1 Einleitung

Die Wirkung einer Ganzkörper- und großvolumigen Teilkörperexposition des menschlichen Organismus mit ionisierender Strahlung ist aus zahlreichen Strahlenunfallereignissen sowie aus den Erfahrungen bei therapeutischer Ganzkörperbestrahlungen (z. B. Konditionierungsbehandlung bei Leukämiepatienten zur Vorbereitung einer Stammzelltransplantation) her bekannt. Die frühen Folgen einer solchen Exposition werden unter dem Begriff *akutes Strahlensyndrom* (akute Strahlenkrankheit) zusammengefasst. Anzumerken ist, dass es sich beim akuten Strahlensyndrom immer um ein Multiorgan-Geschehen handelt [15], auch wenn im

¹⁾ Dieser Wert wird derzeit diskutiert und könnte nach unten korrigiert werden.

Folgenden einzelne Formen der Erkrankung beschrieben werden, die jeweils eigene diagnostische und therapeutische Grundlagen haben.

In Abhängigkeit von der Dosis und dem betroffenen Organsystem können vier verschiedene Erscheinungsformen des akuten Strahlensyndroms beobachtet werden:

- Bei Strahlenexpositionen ab 20 Gy tritt die zerebrovaskuläre Form der akuten Strahlenkrankheit auf.
- Im Dosisbereich ab 5 Gy entwickelt sich die gastrointestinale Form, welche auf Strahleneffekten an der Magen-Darm-Schleimhaut beruht.
- Bei vergleichbaren (lokalen) Dosen werden Strahlenschäden von Haut und kutanen Schleimhäuten (Mundhöhle) beobachtet, die als (muko)kutane Form zusammengefasst werden.
- Im Bereich ab 1 Gy zeigen sich charakteristische Veränderungen im Blutbild, die auf der Strahlenwirkung auf Lymphozyten und der Strahlenschädigung des Knochenmarks beruhen. Sie werden als *hämatopoetische Form* bezeichnet.

Voraus geht diesen Symptomenkomplexen eine Prodromalphase, die durch unspezifische Symptome, wie Übelkeit, Erbrechen und Appetitlosigkeit charakterisiert ist. Ihr kann eine Erholung mit anschließender symptomloser Latenzphase folgen. Die Dauer der Latenz nimmt mit steigenden Dosen ab.

Erbrechen und *Fatigue* (Ermüdungssyndrom) sind als charakteristische Befunde der Prodromalphase des akuten Strahlensyndroms essentiell für die Triage der strahlenexponierten Personen, wobei Beginn, Dauer und Anzahl des Erbrechens wichtige Informationen für die klinische Graduierung der Schwere des akuten Strahlensyndroms darstellen. Jedoch ist zu bedenken, dass diese Symptome auch psychosomatisch begründet sein können.

Aus der Kenntnis der strahleninduzierten Störungen der o.g. verschiedenen Organsysteme heraus müssen Abschätzungen zur Schwere der Schädigung, die Entscheidung über eine notwendige stationäre Behandlung, die Auswahl geeigneter, auch eingreifender therapeutischer Maßnahmen und die Früh- sowie Langzeitprognose erfolgen. Unter der Schirmherrschaft der Europäischen Union wurde 2001 ein Manual (METREPOL) entwickelt, das basierend auf der Pathophysiologie der genannten Organsysteme diagnostische und therapeutische Leitlinien nach akuter akzidenteller Strahlen-

exposition entwickelt hat [15], und das ebenfalls in den USA angewendet wird [16, 17].

Die gute Reproduzierbarkeit des Ablaufes und insbesondere die des Auftretens und Verschwindens jener Symptome, die subjektiv empfunden oder objektiv mit Laboratoriumsmethoden nachgewiesen werden können, ist – mit Ausnahme des zerebrovaskulären Syndroms – vor allem Folge der Umsatzkinetik der Zellerneuerungssysteme der Epidermis und der Schleimhäute sowie der Blutbildung im Knochenmark und in den lymphatischen Organen. Hierbei spielt insbesondere die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit der einzelnen Zellkompartimente eine Rolle; differenzierte Zellen (Granulozyten, Erythrozyten und Keratinozyten) haben eine niedrige Strahlensensibilität, während die proliferativen Zellpopulationen und insbesondere die hämatopoetischen Stammzellen relativ strahlenempfindlich sind. Eine Ausnahme bildet die hohe Strahlenempfindlichkeit der reifen Lymphozyten. Bei einer strahlenbedingten Sterilisation der proliferierenden Zellen kommt es nach Strahleneinwirkung zum Versiegen des Zellnachschiebes in die differenzierten Kompartimente. Dagegen ist der Zellverlust durch den physiologischen Zellumsatz bedingt und damit über weite Dosisbereiche unabhängig von der Strahlenexposition. Dadurch tritt die Symptomatik erst auf, wenn durch das Ungleichgewicht zwischen Zellproduktion und Zellverlust die Abnahme der differenzierten Funktionszellen manifest wird. Die Latenzzeit ist damit bedingt durch die physiologischen Umsatzprozesse in den Geweben. Erst bei hohen Dosen, die auch differenzierte Zellen beeinträchtigen, verkürzt sich die Latenz.

5.5.2 Die zerebrovaskuläre Form

Die *zerebrovaskuläre Form* des akuten Strahlensyndroms wird bei Dosen über 20 Gy im Gehirn beschrieben. Eine gesonderte Prodromalphase oder eine Latenzzeit sind nicht mehr erkennbar. Hier finden sich Symptome, die sich aus dem Versagen der zentralnervösen Regulationsmechanismen sowie des Herz-Kreislauf-Systems ergeben. Die Symptomatik umfasst Übelkeit, Erbrechen und Appetitlosigkeit. Bei zunehmender Strahlendosis tritt Fatigue (Ermüdung) hinzu; ihre Zunahme ist Hinweis auf die Verschlimmerung des zerebrovaskulären Syndroms. Auch Diarrhoe in dieser Phase ist Ausdruck einer zentralen Schädigung. Die Gefäßstörungen bedingen Kopfschmerzen, Hypotension und Verwirrtheit. Sensomotorische Störungen manifestieren sich in Ataxie und Bewusstseinsverlust.

Das akute Auftreten von Übelkeit ist in allen Phasen des zerebrovaskulären Syndroms zu beobachten, wobei die Schwere mit zunehmender Dosis abnimmt. Nach hohen Dosen (> 10 Gy) ist der Brechreflex unterdrückt und wird überlagert durch eine allgemeine Unterdrückung zentralnervöser Funktionen.

Die Herz-Kreislauf-Störungen resultieren in Myokardschädigung und Schock, die letztendlich innerhalb von wenigen Stunden bis Tagen zum Tod führen.

Neben der genauen Erfassung der Symptomatik dienen im klinischen Bereich die Ableitung des EEG und die Anfertigung eines Schädel-Computertomogramms oder eine Kernspintomographie zur Quantifizierung der ZNS-Schädigung bzw. zur Erfassung eines Hirnödems.

Ein leichtgradiges neurovaskuläres Syndrom kann ambulant mit Antiemetika aus der Gruppe der 5-HT₃-Rezeptorantagonisten behandelt werden.

Das Auftreten von schwerer Übelkeit und Erbrechen, schweren Kopfschmerzen, Somnolenz, Fieber und Hypotension und die vollständige Ausprägung des zerebrovaskulären Syndroms bei Dosen > 20 Gy weisen auf eine infauste Prognose hin. Ein Überleben ist ausgeschlossen. Es ist keine kausale Therapie möglich. Aus diesem Grund kann die klinische Versorgung derartig strahlenexponierter Personen nur palliativer Natur sein und muss sich auf die Gabe von Sedativa, den Ausgleich des Flüssigkeits- und Elektrolythaushalts sowie die Stabilisierung des Kreislaufs beschränken.

Tab. 5-4: Klinische Symptome des zerebrovaskulären Syndroms, nach [15]

Symptom	Zeitpunkt des Auftretens
Übelkeit	sofort - Stunden
Appetitlosigkeit	sofort - Stunden
Erbrechen	sofort - Stunden
Ermüdung	sofort - Stunden
Durchfälle	Stunden - Tage
Fieber	Stunden - Tage
niedriger Blutdruck	Stunden - Tage
Kopfschmerzen	Stunden - Tage
neurologische Ausfälle	Stunden - Wochen
kognitive Ausfälle	Stunden - Wochen

5.5.3 Die gastrointestinale Form

Die *gastrointestinale Form* des akuten Strahlensyndroms entwickelt sich nach Ganz- oder erheblicher Teilkörperbestrahlung mit Strahlendosen von 5 Gy bis 12 Gy. Nach einer Latenzzeit von ca. 5. Tagen treten unspezifische Befunde (Fieber, Tachykardie) und schwerste gastrointestinale Symptome mit Durchfall, der im weiteren Verlauf blutig wird, bis hin zum Ileus auf, begleitet von abdominalen Krämpfen. Folge ist eine erhebliche Störung des Flüssigkeits- und Elektrolythaushalts. Begünstigt durch die *hämato-poetischen* Störungen (siehe 5.5.4) dient der Verlust der epithelialen Barriere als Eintrittspforte für Infektionen, häufig durch opportunistische Keime.

Das Krankheitsbild der gastrointestinalen Form des akuten Strahlensyndroms beruht auf der „Entblößung“ der intestinalen Schleimhaut. Diese basiert auf der Störung der Zellneubildung in den Darmkrypten und damit des Zellnachschiebs in die differenzierten Gewebekompartimente (siehe auch 5.5.1).

Tab. 5-5: *Klinische Symptome des gastrointestinalen Syndroms, nach [15]*

Symptome	Zeitpunkt des Auftretens
Diarrhoe	Tage - Wochen
abdominelle Krämpfe	Stunden - Wochen

Die Ultraschalluntersuchung des Abdomens mit Bestimmung der Dicke der intestinalen Schleimhaut sowie mikrobielle Stuhlkulturen gehören zur klinischen Basisdiagnostik. Die Röntgenuntersuchung des Abdomens dient dem Nachweis eines Ileus.

Die Therapie muss einsetzen, sobald der Verdacht auf das Vorliegen dieser Form des akuten Strahlensyndroms geäußert wird, möglichst innerhalb von 24 bis 48 Stunden. Bei leichten Fällen des gastrointestinalen Syndroms ist die Gabe von Loperamid ausreichend, bei Auftreten spastischer Krämpfe sind zusätzlich Spasmolytika angezeigt. Die Blockade der Magensäuresekretion erfolgt mit einem Protonenpumpen-Inhibitor.

In schweren Fällen ist eine „Steril“-Therapie einzuleiten, d. h. Unterbringung im „Sterilbett“, bakterielle Darmdekontamination mit Hilfe nicht resorbierbarer Antibiotika und Antimykotika und konsequente „Sterilernährung“. Diese Vorgehensweise hat die Verhinderung einer Infektion mit

Krankenhaus- oder Umweltkeimen zum Ziel. Diese Maßnahmen müssen in Spezialkliniken durchgeführt werden, denen das gesamte Arsenal der Intensivpflege mit den entsprechenden fachübergreifenden Konsiliardiensten zur Verfügung steht.

Darüber hinaus muss der Exsikkose (Austrocknung) infolge von Durchfällen mittels Dauerinfusion von Flüssigkeit, mit Elektrolyten zum Ausgleich des Elektrolytverlustes, vorgebeugt werden. Die weitere Therapie ist auf die Substitution mit Blutprodukten und ggf. mit Gerinnungsfaktorphäparaten bei blutigen Durchfällen ausgerichtet.

Eine kausale Therapie existiert derzeit nicht; jedoch sind Wachstumsfaktoren (Keratinozyten-Wachstumsfaktor, KGF) in der Erprobung, welche die Regeneration des Darmepithels unterstützen können. Die Prognose ist – auch bei optimaler Therapie – schlecht. Todesfälle treten meist im Zeitraum von 2 bis 3 Wochen ein.

Chronische Veränderungen treten nach Latenzzeiten von bis zu mehreren Jahren ein und beruhen auf Obstruktionen und Stenosen. Bei chirurgischen Eingriffen, auch Biopsien, ist zu beachten, dass in Folge der (strahlenbedingt) beeinträchtigten Durchblutung die perioperative Morbidität und Letalität (Wundheilungsstörungen, Fisteln) hoch ist.

5.5.4 Die (muko)kutane Form

Das kutane Syndrom beinhaltet alle pathologischen Reaktionen der Haut auf ionisierende Strahlung. Die Mundschleimhaut ist pathophysiologisch in ihrer Strahlenreaktion eher der Haut als der Darmschleimhaut vergleichbar und wird deshalb in das mukokutane Syndrom mit eingeschlossen.

Je nach Größe der bestrahlten Hautoberfläche treten umschriebene bis hin zu großflächigen Hautreaktionen auf, deren Schweregrad von der Höhe der Hautdosis bestimmt wird. Dabei ist zu bedenken, dass gerade an der Haut und den kutanen Schleimhäuten, z. B. durch Kontamination mit Betastrahlern, sehr hohe lokale Dosen entstehen können, die in Folge der Dosisverteilung nicht zu systemischen (gastrointestinalen, hämatopoetischen) Effekten führen müssen.

Ähnlich wie das *hämatopoetische* Syndrom sind die Strahleneffekte an Haut und Mundschleimhaut gut zu dokumentieren. Die Veränderungen treten innerhalb von Stunden nach Exposition auf, benötigen zur vollen Ent-

wicklung z. T. aber Jahre. Innerhalb der ersten 7 Tage nach Exposition treten akute Hautläsionen (Erythem, Ödem, Blasen, Desquamation) nur nach sehr hohen Dosen (lokal > 100 Gy) auf, können sich aber mit zeitlicher Verzögerung auch nach erheblich niedrigeren Dosen entwickeln.

Es lassen sich verschiedene Reaktionsphasen abgrenzen: Die Gefäßreaktion führt zu erythematösen Veränderungen und Ödemen. Dabei tritt das Früherythem (Primärerithem) innerhalb weniger Stunden nach der Strahlenexposition ein, gefolgt vom Haupterythem nach wenigen Tagen. Die Pathogenese der klinisch bei moderaten Strahlendosen im Vordergrund stehenden *Epithelreaktion* entspricht derjenigen des gastrointestinalen Syndroms, mit einer Beeinträchtigung der Zellneubildung bei fortbestehendem Zellverlust. Daraus ergibt sich die Latenzzeit bis zum Auftreten von Ulzerationen mit ca. 2 Wochen. Eine Phase der trockenen Schuppung wird gefolgt von der feuchten Desquamation, die letztendlich in Ulzerationen bis hin zu tiefen Nekrosen mündet.

Höhere Dosen, die auch differenzierte Zellen abtöten können, führen zu einem schnelleren Zellverlust und damit zu kürzeren Latenzzeiten. Blasenbildung kann als Hinweis auf akute Nekrosen bei sehr hohen Dosen gelten.

An der Haut sind auch Strahleneffekte an den Adnexen zu beachten. Die Strahlensensibilität von Schweiß- und Talgdrüsen ist sehr hoch; die irreversible Schädigung führt zu einer Austrocknung der Haut und zum Verlust der Transpiration. Strahleneffekte an den Haarfollikeln führen ab 3 Gy bis 5 Gy zur Epilation nach ca. 3 Wochen (kürzer bei höheren Dosen). Diese kann – dosisabhängig – irreversibel (ab ca. 10 Gy) oder reversibel sein, wobei nachwachsende Haare häufig Pigmentveränderungen zeigen.

Tab. 5-6: Klinische Erscheinungsformen des (muko)kutanen Syndroms, nach [15]

Symptome/Merkmale	Zeitpunkt des Auftretens
Erythem/Enanthem	Stunden - 30 Tage - 10 Wochen
Sensibilitätsverlust/Juckreiz	Stunden - 30 Tage
Blasenbildung	5 Tage - 3 Wochen
Schwellung und Ödembildung	5 Tage - 8 Wochen
Desquamation	5 Tage - 8 Wochen
Ulzeration/Nekrose	5 Tage - >12 Wochen
Haarverlust	2-8 Wochen
Onycholyse, Nagelverlust	2-8 Wochen
Hyperpigmentierung/Depigmentierung	>12 Wochen
Atrophie	>12 Wochen
Onychodystrophie, Nagelwachstumsstörung	>12 Wochen
Keratose	>12 Wochen
Fibrose	>12 Wochen
Teleangiektasie	>12 Wochen

Im Hinblick auf die Prognose und die Behandlung kann der initiale klinische Verlauf gewisse Orientierungshinweise geben [15]:

- **Hautreaktion Grad 1**

Flüchtiges Früherythem, nach ca. 5 Tagen Sekundärerithem, 20- bis 30- (maximal 60-) tägliches symptomfreies Intervall, Epilation, trockene Epitheliolyse (*Radiodermatitis sicca*); Abheilung mit zarter Haut und geringer Pigmentstörung.

Ambulante Behandlung mit topischen Entzündungshemmern und systemischen Antihistaminika.

- **Hautreaktion Grad 2**

Fokale Reaktionen in weniger als 10 % der Körperoberfläche. Deutliches Früherythem und Sekundärerithem (Abb. 6-3) mit leichtem Hautödem und ggf. Blasenbildung 5-10 Tage nach Exposition.

Feuchte Epitheliolyse, Epilation. Abheilung wie oben, etwas stärkere Pigmentstörung.

Ambulante Behandlung mit topischen Entzündungshemmern und Glukokortikoiden, Linolsäure-Creme und systemischen Antihistaminika, Infektionsprophylaxe möglichst nach Antibiotogramm.

- **Hautreaktion Grad 3**

Fokale und konfluente Reaktionen in bis zu 40 % der Hautoberfläche. Kräftiges Sekundärerthem mit massivem Ödem und trockener Epitheliolyse. Blasenbildung ca. 5 Tage nach Exposition (Abb. 5-5) bis hin zu feuchter Epitheliolyse und Ulzeration/Nekrose. Irreparable Schäden am Kapillarsystem des Koriums (Lederhaut) sowie am Talgdrüsen- und Haarbalgapparat. Pigmentierung und Übergang in chronische Strahlenhaut, Radioderm, mit den klinischen Zeichen: Atrophie (Gewebschwund), Hyper- und Depigmentierung (Pigmentstörung), Fibrose (Bindegewebsvermehrung), Teleangiektasie (Gefäßerweiterung). Stationäre Behandlung mit Absaugen der Blasen, Debridement, topischen Entzündungshemmern und essentiellen Fettsäuren. Systemische Entzündungshemmer und Glukokortikoide, Analgesie, Infektionsprophylaxe.

- **Hautreaktion Grad 4**

Konfluente Reaktionen in mehr als 40 % der Hautoberfläche mit Beteiligung tieferliegender Strukturen, ausgeprägtes Früherythem mit üblicherweise direktem Übergang in das Sekundärerthem, ausgeprägtes Ödem, Blasenbildung. Akute Nekrosen nach 10-14 Tagen. Heilung nur nach spezieller Behandlung mit der Folge von Alopezie, Fibrose, Pigmentstörungen, Sensitivität gegenüber Sekundärtraumata, subkutaner Sklerose und Keratose.

Stationäre Intensivpflege mit Absaugen der Blasen, Debridement, Infektionsprophylaxe, systemischen Entzündungshemmern und Antihistaminika, Analgesie, ggf. Hauttransplantation oder Amputation.

Diagnostische Maßnahmen sind Photodokumentation, Ultraschall (anfangs täglich, später wöchentlich) und Kernspintomographie, Thermographie, Kapillarmikroskopie bis hin zur Hautbiopsie mit histologischer Untersuchung.

Bei den leichteren Schweregraden 1 und 2 mit Beeinträchtigung einer geringen Hautfläche ist eine ambulante Betreuung mit lokaler Applikation

einer wässrigen anti-inflammatorischen Lotio und von Antihistaminika bei Juckreiz ausreichend. Bei Vorliegen einer oralen Mukositis ist eine ausreichende Analgesie unumgänglich. Eine ausreichende Antibiose und Antimykose ist bei Sekundärinfektionen, meist durch opportunistische Keime, die in Folge der Barriestörung begünstigt sind, angezeigt.

Auch für die Prophylaxe bzw. Behandlung der Strahlenreaktion der Epidermis und der kutanen Schleimhäute werden Wachstumsfaktoren (KGF) erprobt.

Zur *Behandlung* schwerer Formen des akuten Strahlenschadens der Haut und der Folgezustände, so bei > 10 % Hautbeteiligung und bei tiefgreifender Schädigung inkl. Blasenbildung, muss die Aufnahme in eine spezialisierte Klinik (z. B. Fachklinik Hornheide im Verbund der Regionalen Strahlenschutzzentren der Berufsgenossenschaften) erfolgen, die neben einer Ausstattung zur Behandlung von Brandverletzten eine leistungsfähige dermatologische Abteilung und zur Behandlung der Systemschäden eine hämatologische Abteilung besitzt. Unter intensivmedizinischen Bedingungen wird der Inhalt der Hautblasen abpunktiert und Nekrosen werden abgetragen. Topisch werden Antibiotika und Antimykotika appliziert sowie nicht-adhäsive Verbände angelegt. Systemisch werden Antihistaminika, Kortikosteroide und Analgetika verabreicht.

Hauttransplantate wie auch Amputationen nekrotischer Extremitäten können nötig werden. Diese Entscheidungen stützen sich auf wiederholte kernspintomographische Untersuchungen.



Abb. 5-4: Sekundärer erythem mit leichter Schwellung unterhalb des Nagels am linken Zeigefinger. Die Strahlenexposition (ca. 15 Gy) erfolgte beim Probenwechsel an einem Röntgen-Feinstrukturgerät – Zustand: 4 Wochen nach Strahleneinwirkung.



Abb. 5-5: Sekundärer erythem an den Fingern 1, 2, 4 und 5 rechts mit eingetrockneten Blasen am 4. Finger. Die Strahlenexposition (maximal 16 bis 20 Gy) erfolgte beim Hantieren im Nutzstrahlenbündel einer Röntgen-Feinstrukturanlage infolge Ausfalles der automatischen Sicherheitseinrichtung - Zustand: 23. Tag nach Strahleneinwirkung.



Abb. 5-6: Schwere Radiodermatitis (Erythemstadium) im Bereich des rechten Unter- und Oberarmes bei einem Ingenieur. Die Strahlenexposition (ca. 130 Gy) erfolgte bei der Manipulation im ungeschwächten Nutzstrahlenbündel eines Röntgen-Spektrometers - Zustand : 2. Tag nach Strahleneinwirkung.



Abb. 5-7: Gleicher Patient wie in Abb. 5-6. Knapp 4 Wochen später entwickelte sich ein tiefes, bis zur Muskelfascie reichendes großes Hautulkus am Unterarm.

5.5.5 Die hämatopoetische Form

Die *hämatopoetische Form* des akuten Strahlensyndroms manifestiert sich ab Ganzkörper-Dosen von 1-1,5 Gy. Entscheidend für den klinischen Verlauf und die Prognose dieser Form des akuten Strahlensyndroms ist, ob der im Skelettsystem verteilte hämatopoetische Stammzellspeicher nur reversibel geschädigt ist. Es muss somit geklärt werden, ob die strahlenexponierte Person noch über vitale Stammzellen verfügt, die eine autochthone Regeneration der Hämatopoese bewirken können und zwar in einer klinisch gesehen ausreichenden Zeit, also innerhalb von 30-40 Tagen. Eine derartige *Reversibilität* der Stammzellfunktion kann zwei Ursachen haben. Zum einen sind viele „Ganzkörperexpositionen“ in erheblichem Umfang inhomogen, so dass Skelettanteile (z. B. Wirbelknochen, Extremitätenknochen, Schädelkalotte etc.) geringer exponiert waren als andere Körperabschnitte. Jede *Inhomogenität* der Strahlenexposition wirkt sich zugunsten des Regenerationspotentials der Hämatopoese aus. Zum anderen ist natürlich die akquirierte Strahlendosis im Knochenmark von großer Bedeutung. Selbst nach Ganzkörperdosen von 5-8 Gy können noch einige Stammzellen „übrig geblieben“ sein, von denen eine Regeneration ausgehen kann.

Indikatoren für eine Spontanregeneration der Blutbildung sind das Verhalten der Lymphozyten-, Granulozyten- und Thrombozytenzahlen in den ersten 10 Tagen nach Strahlenexposition (siehe Abb. 5-4). Die Lymphozytopenie ist zwar bereits ein sehr empfindlicher Messwert für die erhaltene Strahlendosis, erlaubt aber keine hinreichende Aussage über die spontane Regenerationsfähigkeit.

Nach einer initialen Granulozytose (1-2 Tage) zeigt sich ein Abfall der Granulozyten. Im Gegensatz zum Verlauf bei einer irreversiblen Schädigung der Hämatopoese, kommt es bei reversiblen Veränderungen jedoch nicht zu dem „dramatischen“ Granulozytenabfall zwischen dem 4. und 6. Tag als Zeichen eines zerstörten Proliferationsspeichers der Myelozytopenie im Knochenmark. Die Zellzahlen fallen langsam ab, meist begleitet vom Auftreten mitosegeschädigter Granulozyten (Riesen- und doppelkernige Granulozyten, myeloische Zellen mit Karyomeren) im peripheren Blut. Die Granulozytenzahlen gehen innerhalb von 10 Tagen auf subnormale Werte zurück, bleiben aber letztlich über 200-500 pro μl als Zeichen dafür, dass noch Vorläuferzellen gebildet werden und heranreifen. Typisch für die Diagnose einer reversiblen Schädigung der Hämatopoese ist auch der langsame Abfall der Thrombozyten während der ersten 10 Tage nach der Exposition mit einem Tiefpunkt zwischen dem 20. und 30. Tag.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die Diagnose „reversible Schädigung der Hämpoese“ in den ersten 10 Tagen nach Strahleneinwirkung eindeutig an den Zeichen einer *abortiven Regeneration* zwischen dem 5. und 15. Tag durch entsprechende Laborbefunde belegt werden kann. Die „Krise“ stellt sich zwischen dem 15. und 30. Tag nach Strahleneinwirkung ein. Sie wird begleitet von deutlichem Haarausfall und geht einher mit der Entwicklung einer Granulozytopenie und Thrombozytopenie mit der Gefahr von bakteriellen Infektionen und thrombozytopenischen Blutungen. Die Spontanregeneration der Hämatopoese führt zwischen dem 30. und 35. Tag zu einer Erholung der Granulozyten- und Thrombozytenzahlen im Blut.

Tab. 5-7: *Grade des hämatopoetischen Syndroms nach Strahlenexposition, nach [15, 16]*

Symptom/ Laborwert	Grad 1	Grad 2	Grad 3	Grad 4
Lymphozyten	$\geq 1.500/\mu\text{l}$	1.000- 1.500/ μl	500-1.000/ μl	$< 500/\mu\text{l}$
Granulozyten/ Granulozytose	$\geq 2.000/\mu\text{l}$	1.000- 2.000/ μl	500-1.000/ μl	$< 500/\mu\text{l}$ oder initiale Granulo- zytose
Thrombozyten	$\geq 100.000/\mu\text{l}$	50.000- 100.000/ μl	20.000- 50.000/ μl	$< 20.000/\mu\text{l}$
Blutverlust	Petechien, Hämatome, normaler Hb- Wert	milder Blut- verlust mit $< 10\%$ Hb- Abfall	stärkerer Blutverlust mit 10-20 % Hb-Abfall	Spontan- blutung oder Blutverlust mit $> 20\%$ Hb-Abfall

Zur Abschätzung des erwarteten Schweregrads des hämatopoetischen Syndroms muss in der Initialphase (24 h) nach Strahlenexposition möglichst alle 4 Stunden (mindestens aber alle 8 Stunden) ein komplettes Blutbild (Hämoglobin, Leukozyten, Thrombozyten, Lymphozyten, Granulozyten, + Retikulozyten) bestimmt werden, anschließend zweimal täglich. Zwei Blutproben, abgenommen im Abstand von 4 Stunden, müssen umgehend zur zytogenetischen Dosimetrie (siehe 8.) eingesandt werden. Leukozyten müssen sofort HLA-Klasse I typisiert und weitere Zellen zur Klasse-II-Typisierung eingefroren werden.

Aus dem Verlauf ergeben sich zwangsläufig die therapeutischen Strategien. Es gilt, die transitorischen Phasen der Knochenmarkinsuffizienz und die daraus folgenden Konsequenzen von Infekten und Blutungen „zu überbrücken“. Zu einer solchen *Überbrückungstherapie* gehört die Therapie mit Antibiotika. Bei Lymphopenie ist die prophylaktische Gabe von Aciclovir indiziert. Die systemische Prophylaxe mit Antimykotika wird derzeit nicht empfohlen, wohl aber die topische Gabe von Amphomoronal zur Darmdekontamination. Bei erheblicher Infektgefährdung (z. B. bei Personen mit eingeschränkter Infektabwehr durch Medikamente wegen anderer Erkrankungen) empfiehlt es sich, bei einem Granulozytenwert $< 500/\mu\text{l}$ eine *Sterilbettbehandlung* (siehe 5.5.2) einzuleiten und ggf. auch eine mikrobielle Dekontamination des Gastrointestinaltraktes herbeizuführen (evtl. auch eine sog. „selektive Dekontamination“).

Transfusionen haben das Ziel, den Thrombozytenspiegel des Blutes über 10 000 pro μl zu halten. Im Allgemeinen entsprechen diese Empfehlungen den therapeutischen Maßnahmen, wie man sie auch bei der Behandlung von schweren aplastischen Anämien anwenden würde. Alle Blutprodukte müssen mit 25 Gy bis 30 Gy bestrahlt sein, um eine transfusionsbedingte Graft-versus-Host-Erkrankung zu vermeiden. Bei ausgeprägter Thrombozytopenie $< 10\,000$ pro μl kann vor allem Schleimhautblutungen durch orale Gabe des Antifibrinolytikum Tranexamsäure (z. B. Cyclokapron, 3 x 2 Tbl./Tag) vorgebeugt und somit die Zahl der zu transfundierenden Thrombozytenkonzentrate reduziert werden. Bei diffusen unstillbaren Blutungen sollte der Einsatz von aktiviertem Gerinnungsfaktor VII erwogen werden.

Der Einsatz von hämatopoetischen Wachstumsfaktoren beim hämatopoetischen Strahlensyndrom entspricht demjenigen nach der konditionierenden Therapie (Ganzkörperbestrahlung, Chemotherapie) zur Knochenmarks- oder Stammzelltransplantation. Derzeit stehen Granulozyten-Koloniestimulierender Faktor (G-CSF) (incl. der pegylierten Form Pelfilgrastim), Granulozyten-Makrophagen-Koloniestimulierender Faktor (GM-CSF) und Erythropoetin zur Verfügung, obwohl keiner dieser Faktoren für den Einsatz nach akzidenteller Strahlenexposition zugelassen ist. Es muss derzeit die Empfehlung ausgesprochen werden, dass bei der Therapie der *hämatopoetischen Form* des akuten Strahlensyndroms der Einsatz der „Wachstumsfaktoren“ in enger Konsultation mit klinischen Einrichtungen erfolgen sollte, die praktische Erfahrungen mit diesen Substanzen haben. Die systemische Gabe von G-CSF plus Erythropoetin sollte bei allen stationär

zu behandelnden Patienten mit Panzytopenie (Schweregrad des hämatopoetischen Syndroms > Grad 2) beginnen. Eine Ausnahme stellen Patienten mit irreversiblen, schwerem neurovaskulärem Syndrom sowie solche, bei denen nach 4-5 Tagen ein letales gastrointestinales Syndrom gesichert ist, dar. In beiden Fällen sollte dann die Gabe von hämatopoetischen Wachstumsfaktoren eingestellt werden.

Immer wieder wurde bei Personen nach akzidenteller Strahlenexposition mit schwerem akutem Strahlensyndrom die Möglichkeit der allogenen Stammzelltransplantation erörtert und in Einzelfällen durchgeführt, wobei bisher noch kein einziger Fall einer erfolgreichen allogenen Stammzelltransplantation nach akzidenteller Strahlenexposition berichtet worden ist. Das im Folgenden geschilderte Vorgehen entspricht dem Ergebnis einer Konsensuskonferenz der European Group for Blood and Marrow Transplantation (EBMT) im Jahre 2005 [18].

Erholt sich nach 14-21 Tagen trotz Therapie mit Wachstumsfaktoren die Hämatopoese nicht und zeigt sich auch in eventuell gewonnenen Knochenmarkpunktaten keine Hämatopoese, besteht prinzipiell die Indikation zur allogenen hämatopoetischen Stammzelltransplantation. Weitere notwendige Voraussetzungen sind das Fehlen von schwerwiegenderen gastrointestinalen oder pulmonalen Funktionsstörungen/Begleiterkrankungen und eine biologische und/oder physikalische Dosimetrie, die eine Gesamtkörperdosis von etwa 10 Gy (7 - 13 Gy) anzeigt. Ziel der Transplantation ist eine langfristige Übernahme der Blutbildung durch die allogenen Stammzellen, obwohl auch eine autologe Regeneration möglich und akzeptabel ist. Weiteres Ziel ist die Vermeidung einer Graft-versus-Host-Erkrankung. Die Konditionierung zur Vermeidung der Transplantatabstoßung sollte milde und nicht-myeloablativ sein (30 mg Fludarabin/m² für 3 Tage +/- Antilymphozytenglobulin), Methotrexat ist wegen seiner Nebenwirkungen kontraindiziert. Zur GvHD-Prophylaxe können Cyclosporin A und Mycophenolat eingesetzt werden. Das Transplantat sollte nach CD34-Anreicherung aus > 2 x 10⁶ CD34+ Zellen/kg Körpergewicht (vorzugsweise 6-8 x 10⁶/kg) bestehen und HLA-vollkompatibel (mindestens 9/10 bei Familienspender, 10/10 bei Fremdspender) sein. Bei geplanter allogener Stammzelltransplantation ist die Verlegung in ein Transplantationszentrum mit großer Erfahrung in der allogenen Stammzelltransplantation notwendig.

Die Symptomatik und Therapie der *hämatopoetischen* Form des akuten Strahlensyndroms ist im Folgenden zusammengefasst. Der Verlauf der Blutbildveränderungen ist in Abb. 5-8 illustriert.

Symptome und Therapie der hämatopoetischen Form des akuten Strahlensyndroms:

Symptome	Überbrückungstherapie
<ul style="list-style-type: none">• Frühsymptomatik (innerhalb weniger Stunden) – Übelkeit, gelegentlich Erbrechen• Vorübergehende Erholung zwischen 2. und 20. Tag nach Exposition• frühzeitige Lymphozytopenie (ab 1. Tag)• evtl. Granulozytose zwischen 1. und 3. Tag• Abortive (d. h. abgekürzt verlaufende) Granulozytenstabilisierung (zwischen 15. und 30. Tag), Granulozytopenie (zwischen 15. und 30. Tag)• Thrombozytopenie (zwischen 20. und 30. Tag)• Leichte Anämie• Haarausfall nach mehr als 14 Tagen	<ul style="list-style-type: none">– selektive und/oder totale mikrobielle Dekontamination– therapeutische Gabe von Zytokinen– Thrombozyten-, Erythrozyten-, evtl. Granulozytensubstitution– therapeutischer Ausgleich von Flüssigkeits- und Elektrolytverlusten

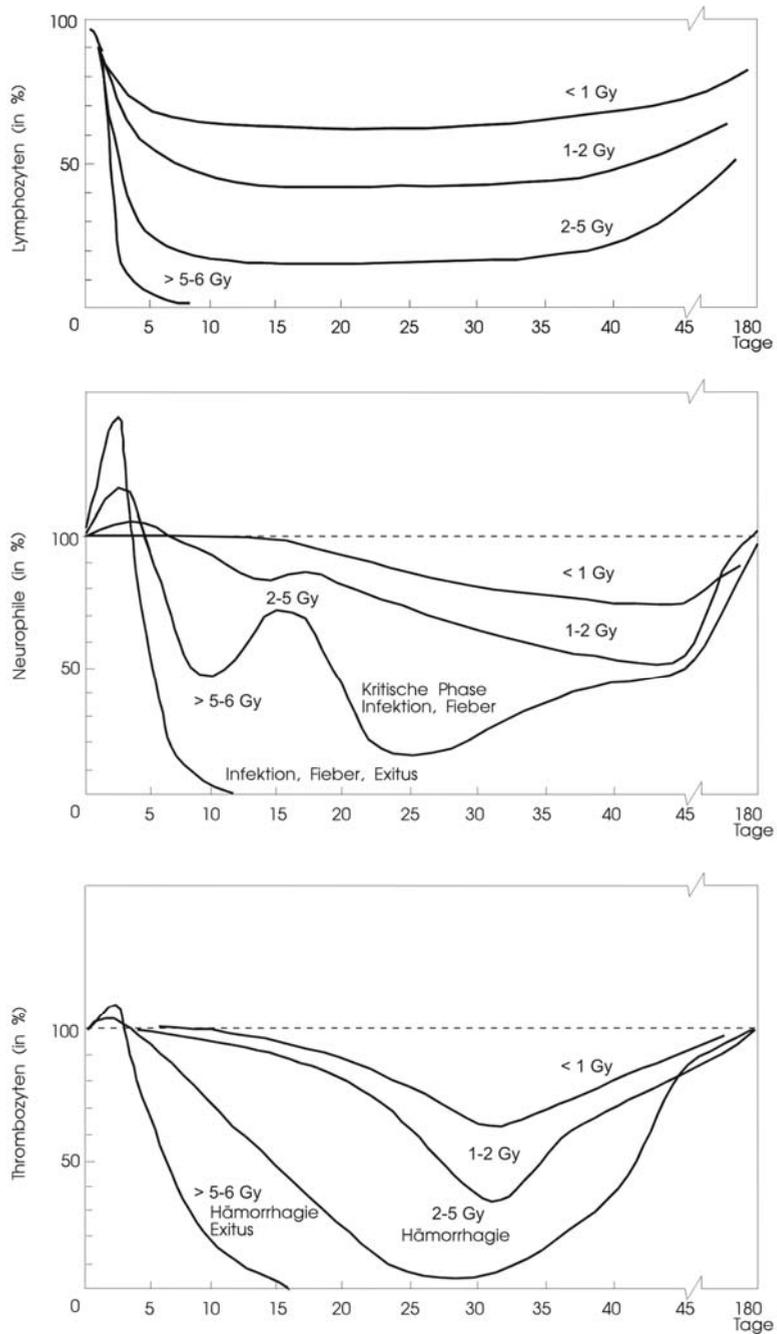


Abb. 5-8: Blutbildveränderungen nach Ganzkörperexposition

5.5.6 Sequentialdiagnostik

In diesem Abschnitt wird auf die Diagnostik und die ambulante Behandlung möglicherweise Strahlenexponierter eingegangen.

Bei einer größeren Anzahl Betroffener ist es zunächst erforderlich, die zur Verfügung stehende Kapazität an Krankenhausbetten für Personen, bei denen mit einem akuten Strahlensyndrom gerechnet werden muss, freizuhalten. Die übrigen Personen können zunächst in ambulante Betreuung entlassen werden. Bei entsprechend geringer Anzahl von Betroffenen kann diesen empfohlen werden, sich zur diagnostischen Abklärung und Dokumentation der Befunde vorübergehend in stationäre Beobachtung zu begeben.

Die ambulante Betreuung erstreckt sich primär auf die Durchführung der „Sequentialdiagnostik“, die Bewertung der Befunde in Bezug auf therapeutische Konsequenzen und die daraus folgenden Maßnahmen (z. B. Krankenhauseinweisung zur weiteren Abklärung der Gesundheitsstörung). Darüber hinaus sollte bei allen Personen, bei denen der Verdacht auf eine höhere Iodinkorporation besteht, eine Abschätzung der Schilddrüsendosis vorgenommen werden.

Der Begriff „Sequentialdiagnostik“ soll deutlich machen, dass erst eine sequentielle Erhebung von Befunden in zunehmendem zeitlichem Abstand von einer unfallbedingten Strahlenexposition den Verdacht auf die Entwicklung eines akuten Strahlensyndroms bestätigen kann. Eine Sequentialdiagnostik ist daher als eine Kette von momentdiagnostischen Erhebungen aufzufassen, die zu bestimmten Zeiten nach einer erhöhten Strahlenexposition durchgeführt werden.

Der Sequentialdiagnostik fällt dabei auch die Aufgabe zu – soweit sie außerhalb von Krankenhäusern durchgeführt wird – nur diejenigen von einer unfallbedingten Strahlenexposition betroffenen Personen herauszufinden, bei denen spezielle therapeutische Maßnahmen im Rahmen der stationären Betreuung erforderlich sind.

Der „fahrplanmäßige“ Ablauf des akuten Strahlensyndroms erlaubt es, jederzeit mit der Sequentialdiagnostik zu beginnen (siehe Tab. 5-9, Tab. 5-10). Voraussetzung ist, dass der Zeitpunkt der unfallbedingten Strahlenexposition in etwa bekannt ist und damit als Ausgangspunkt (Tag 0) betrachtet werden kann. Tabelle 5-9 illustriert, dass aufgrund subjektiver

Symptome („S“) und objektiver Laborbefunde („L“) entsprechende Empfehlungen zur Therapie („T“) und zur weiteren Beobachtung („B“) bzw. für weitere Maßnahmen zu geben sind.

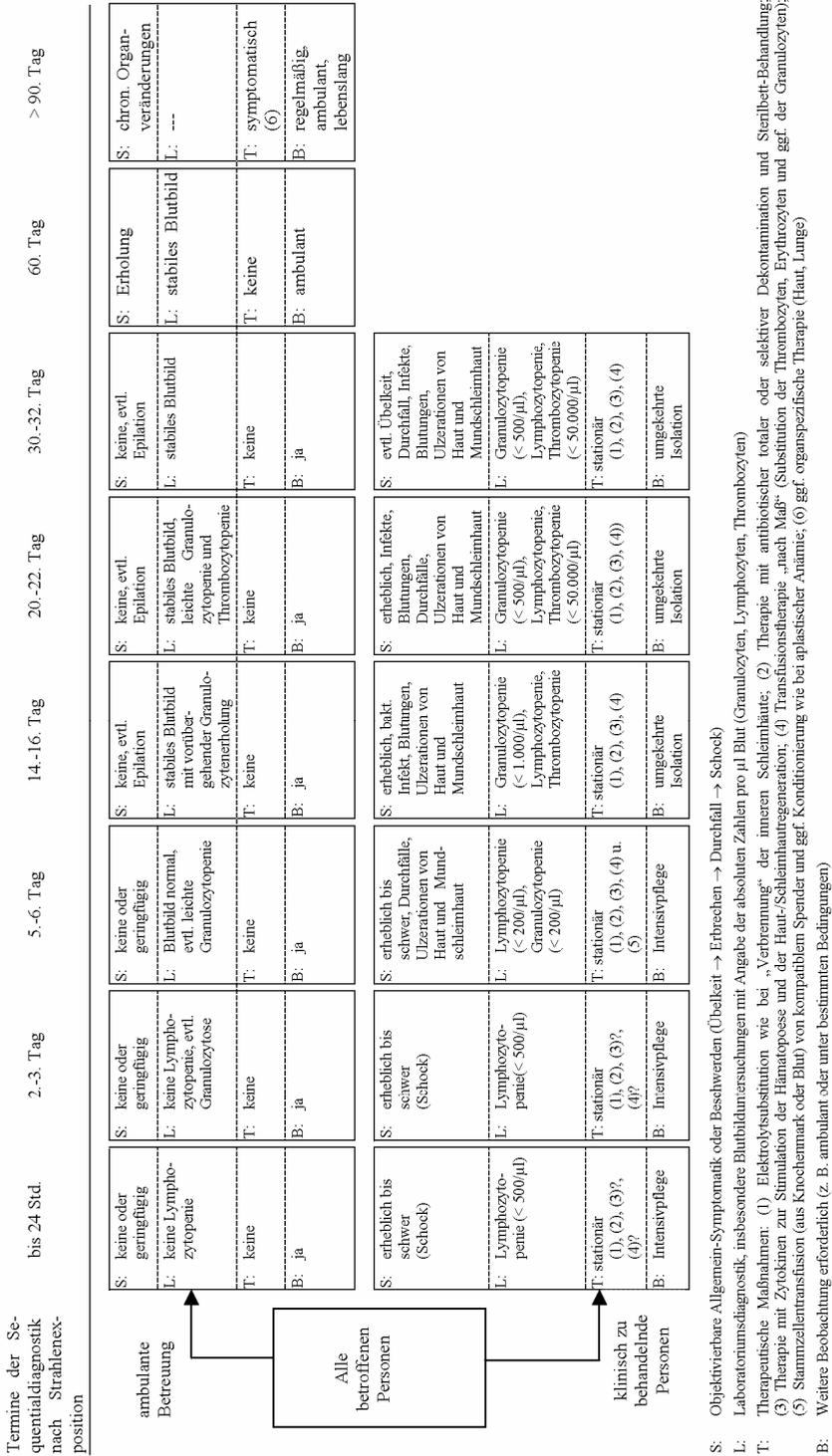
Für die Feststellung des Schadensumfanges besitzt die Untersuchung der Blutzellveränderungen als Funktion der Zeit nach dem vermuteten bzw. tatsächlichen Umfang der Strahlenexpositionen höchste Priorität, wobei die Lymphozyten-, Granulozyten- und Thrombozytenkonzentrationen (Zellzahl pro μl Blut) von besonderer Bedeutung sind: Die Bestimmung des Blutbilds muss mit modernen Blutzählautomaten erfolgen und immer auch das Differentialblutbild und möglichst auch die Retikulozyten umfassen. Zellen zur biologischen Dosimetrie müssen an ein Speziallabor eingesandt werden.

Beim gesunden Menschen findet man bei Einsatz von Blutbildautomaten folgende Leukozytenarten mit den angegebenen Normalwerten [19]:

Tab. 5-8: Normalwerte der Leukozytenarten bei Einsatz von Blutbildautomaten

Leukozytenart	Normalwert
Gesamtleukozyten	4.400-11.300/ μl
Neutrophile Granulozyten (einschl. stabkernige und segmentkernige)	1.300-6.700/ μl
Eosinophile Granulozyten	0-300/ μl ,
Basophile Granulozyten	0-90/ μl
Monozyten	100-600/ μl
Lymphozyten	1.000-3.500/ μl

Tab. 5-9: Ablaufschema Sequentialdiagnostik bei Verdacht auf Vorliegen einer erhöhten Strahlenexposition



Tab. 5-10: Klinische Frühsymptomatik beim Menschen nach akuter kurzzeitiger Ganzkörperexposition

Kriterium	Bereiche					
	0,1-0,3 Gy	0,3-1 Gy	1-3 Gy	3-6 Gy	6-15 Gy	über 15 Gy
Ganzkörperdosis	keine	vereinzelt leicht	leicht - mittel	mittel - schwer	äußerst schwer	lebensbedrohlich
Symptomatik						
Prognose:						
ohne Behandlung	sehr gut	sehr gut	gut	schlecht	geringe Überlebenschance	keine Überlebenschance
mit optimaler Behandlung	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut	unsicher	unsicher bzw. infaust
Frühsymptome:						
Abschlagigkeit	keine	vereinzelt leicht	mäßig	ausgeprägt	stark ausgeprägt	sehr schnell stark ausgeprägt
Übelkeit, Erbrechen (Zeit nach Exposition)	keine	vereinzelt (2-6 Std.)	mehrmals (2-6 Std.)	mehrmals stark (1/2-2 Std.)	häufig stark (ab 10 Min.)	unstillbar (ab 5 Min.)
Kopfschmerz	keiner	keiner	kurzzeitig	ständig	ständig bohrend	qualend
Bewusstsein	klar	klar	klar	klar	getrübt	verloren
Körpertemperatur	normal	normal	normal	normal/subfebril	subfebril	subfebril/febril
Früherythem	keines	keines	leicht (12-24 Std.)	deutlich (> 6 Std.)	ausgeprägt (> 6 Std.)	stark ausgeprägt (> 6 Std.)
Konjunktivale Injektion (Zeit nach Exposition)	keine	keine	leicht (48 Std.)	deutlich (> 6 Std.)	ausgeprägt (> 6 Std.)	stark ausgeprägt (> 6 Std.)
Hämatologische Diagnostik						
Blutwerte:						
Lymphozyten/µl	> 1.500	< 1.500	< 800	< 500	< 200	~ 0
(Zeit nach Exposition)	(2-72 Std.)	(2-72 Std.)	(2-72 Std.)	(2-72 Std.)	(2-72 Std.)	(24 Std.)

Zusätzlich ist zu beachten, dass eine Schädigung des Embryos oder Feten möglich ist, deren Schwere von dem Entwicklungsstadium abhängt [17, 20]. Bereiche unter 100 mSv werden hier nicht definiert, da bei ihnen deterministische Schäden auch beim Embryo bzw. Feten höchst unwahrscheinlich sind. Alle Werte der Tabelle wurden aus der international bekannten Literatur zusammengestellt.

Zeitpunkt: Bis 24 Stunden nach Exposition

Wurden keine oder nur geringe subjektive Symptome wie Übelkeit oder Erbrechen geäußert bzw. beobachtet und geht dieser Befund einher mit normalen Blutzellzahlen (bei 4-stündlicher Messung), insbesondere der Lymphozyten, so ist zu diesem Zeitpunkt keine Krankenhauseinweisung erforderlich.

Werden dagegen Befunde erhoben (S = erheblich bis schwer, womöglich kardiovaskulärer oder neurovaskulärer Schock) und findet sich eine schwere Lymphozytendepression bei normalen oder erhöhten Granulozytenzahlen, so ist eine Krankenhauseinweisung zwingend, da ggf. symptomatische oder kausale therapeutische Maßnahmen der Stufe T 1-5 (siehe Tab. 5-9) eingeleitet werden müssen.

Zeitpunkt: 2. oder 3. Tag nach Exposition

Sind auch jetzt keine weiteren Symptome (Übelkeit, Erbrechen) vorhanden, und zeigt das Blutbild keine Lymphozytopenie stärkeren Ausmaßes (Lymphozytenzahlen >500 pro μl Blut), so ist auch jetzt keine Indikation zur stationären Versorgung gegeben. Zu diesem Zeitpunkt müssen Leukozyten HLA-Klasse-I typisiert und weitere Leukozyten zur evtl. späteren HLA Klasse-II-Typisierung eingefroren werden.

Bei einem Verdacht auf hohe lokale Strahlendosen an Haut oder Schleimhäuten kann bereits jetzt eine Therapie mit Wachstumsfaktoren zur Unterstützung der epithelialen Regeneration eingeleitet werden.

Zeitpunkt: 5. - 6. Tag nach Exposition

Findet man noch eine gewisse Zahl von neutrophilen Granulozyten pro μl Blut (z. B. 200-500 oder mehr), so ist das ein Zeichen dafür, dass die Granulozytenproduktion nur partiell geschädigt ist. Somit kann davon ausgegangen werden, dass das Knochenmark im Prinzip zu einer spontanen Regeneration in der Lage ist. Deshalb ist höchstens eine „Überbrückungstherapie“ (siehe 5.5.5) erforderlich. Eine adäquate Zytokintherapie (G-CSF, Erythropoetin, Interleukin-11) kann die Regeneration des Knochenmarks unterstützen und damit das Infektions- bzw. Blutungsrisiko vermindern. Flüssigkeitsverluste (Durchfall, Ulzerationen) müssen ausgeglichen, Veränderungen an Haut und Schleimhäuten adäquat versorgt werden.

Dagegen sollten Personen, die deutliche subjektive Symptome zeigen, die an Durchfällen und schweren Haut-/Schleimhautveränderungen leiden oder die neben einer Lymphozytopenie auch eine schwere Granulozytopenie (< 200 pro μl Blut) aufweisen, sofort in ein Krankenhaus eingewiesen werden, das über alle Möglichkeiten der hämatologischen Intensivpflege verfügt. Da zu diesem Zeitpunkt das ganze Ausmaß der Strahlenschädigung noch nicht erkennbar ist, sollte so früh wie möglich eine Blutentnahme (heparinisiert) durchgeführt werden, um Lymphozyten zur Histokompatibilitätsprüfung verfügbar zu haben. Auch bei diesen Patienten sind Haut-/Schleimhautveränderungen adäquat zu versorgen.

Zeitpunkt: 14. - 16. Tag nach Exposition

Betroffene, die am 5.-6. Tag nicht zur stationären Therapie eingewiesen werden müssen, zeigen eine vorübergehende Erholung der hämatologischen Veränderungen. Dennoch kann es auch noch nach 2-3 Wochen zu einer behandlungsbedürftigen Symptomatik kommen.

Hautveränderungen (Ulzerationen, Haarausfall) sind ein Zeichen für eine erhebliche lokale oder generalisierte Strahleneinwirkung. Die Labordaten zeigen meist unspezifische Fluktuationen, die keine therapeutischen Konsequenzen haben.

Es kann aber auch sein, dass sich zwischen dem 6. und 16. Tag eine Granulozytopenie und Thrombozytopenie entwickelt, oder dass es zu Infekten und/oder thrombozytopenischen Blutungen kommt. Dann muss sofort eine Krankenhauseinweisung erfolgen und eine „Überbrückungstherapie“ eingeleitet werden (siehe Kap. 5.5.5).

Zeitpunkt: 20. - 22. Tag nach Exposition

Normale Granulozyten- und Thrombozytenwerte und ein bezüglich der klinischen Symptomatik unauffälliger Verlauf zeigen, dass keine schwere Strahlenkrankheit vorliegt. Im Gegensatz dazu können eine zunehmende Granulozytopenie und Thrombozytopenie, die erst zwischen dem 25. bis 30. Tag ihre Tiefpunkte haben, je nach dem „locus minoris resistentiae“ zu Infekten (Pneumonien, Abszessen) oder Blutungen (Haut, Schleimhäute, innere Organe, ZNS) führen, die therapeutisch gezielt zu versorgen sind. Es müssen ggf. Antibiotika (wenn möglich nach Antibiogramm) verabfolgt und/oder Thrombozyten- oder Granulozytentransfusionen durchgeführt

werden. Sollten die Neutrophilen erheblich unter 500/ μ l Blut absinken, kommt evtl. auch die Gabe von G-CSF in Frage.

Zeitpunkt: 30. - 32. Tag nach Exposition

Ist auch am 30.-32. Tag keine Symptomatik vorhanden, so können die betroffenen Personen aus der ambulanten Betreuung entlassen werden. Bis zum 60. Tag werden sich in der Regel auch die Personen weitgehend erholt haben, die einer erfolgreichen Intensivtherapie unterzogen worden sind, so dass die „Akutphase“ als abgeschlossen betrachtet werden kann. Damit ist allerdings noch keine Aussage darüber gemacht, ob nach Monaten oder Jahren Spätschäden auftreten werden oder nicht. Aus diesem Grund ist eine lebenslange regelmäßige Nachbeobachtung der Betroffenen zu empfehlen. Auftretende Organveränderungen (Lunge, Niere, Darm, Haut, Schleimhäute, Knochenmark, Augenlinse) sind symptomatisch zu behandeln.

5.5.7 Schlussbemerkungen

Die klinischen Konsequenzen bei jenen Personen, die Ganzkörperdosen von weniger als 1 Gy ausgesetzt waren, sind bisher nicht besonders dargestellt worden. Diese Personen brauchen unter Berücksichtigung der Ergebnisse der *Sequentialdiagnostik* auch nicht stationär aufgenommen zu werden, benötigen aber möglicherweise eine psychologische Betreuung. Eine Klinik-einweisung kommt hier jedoch in Frage bei vorbestehenden Erkrankungen oder zusätzlichen Verletzungen, die unter dem Aspekt eines gegenseitig komplizierenden Kombinationsgeschehens bedeutungsvoll werden könnten. Erfahrungsgemäß reagieren Personen mit an sich unproblematischen Ganzkörperexpositionen bei akut- oder chronisch-entzündlichen Krankheitsprozessen, nach operativen Eingriffen oder bei gleichzeitigen traumatischen oder toxischen Einwirkungen nicht selten mit unerwartet schweren Krankheitsverläufen. So kann – insbesondere im Zeitraum zwischen dem 15. und 35. Tag nach der unfallbedingten Strahlenexposition – beispielsweise eine erhöhte Infektions- oder Blutungsbereitschaft auftreten, die möglicherweise auf radiogene Änderungen im Immunstatus zurückzuführen ist. Gegebenenfalls muss bei solchen Patienten ein Konsilium aus Vertretern verschiedener medizinischer Fachgebiete beratend tätig werden.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass eine Differenzierung der Krankenhäuser, die sich bereithalten, Strahlenunfallpatienten aufzunehmen, notwendig ist. Es wird nur wenige Kliniken geben, die in der Lage sind, Patienten mit Verdacht auf das Vorliegen der *gastrointestinalen* oder aus-

geprägten (*muko*)kutanen Form des akuten Strahlensyndroms sachgerecht zu behandeln. Dagegen ist die Zahl der Krankenhäuser mit hämatologisch-onkologischen Stationen erheblich größer, so dass diese ohne Schwierigkeit in der Lage sein müssten, Patienten zu behandeln, die eine Strahlenexposition etwa zwischen 1 und 6 Gy erhalten haben. Noch größer ist die Zahl der Krankenhäuser, die Patienten aufnehmen können, wenn die Strahlenbelastung unter 1 Gy lag, aber sonstige komplizierende Krankheitszustände bestehen (Verletzungen, Allgemeinerkrankungen).

6 Kontamination und Inkorporation

6.1 Kontamination

Unter Kontamination versteht man hier eine durch radioaktive Stoffe verursachte „Verunreinigung“ der menschlichen Körperoberfläche. Kontaminationen der Haut haben nur selten direkte gesundheitliche *Auswirkungen* (Ausnahme: Läsionen der Haut infolge starker Kontamination mit β -Strahlern, sog. β -burns – diese entsprechen der (*muko*)kutanen Form des akuten Strahlensyndroms). Die Gefahr bei einer Kontamination besteht vielmehr darin, dass die radioaktive Substanz von der Körperoberfläche in den Körper selbst gelangt und damit eine Inkorporation darstellt. Starke, unfallbedingte Kontaminationen sind äußerst selten. Kleine, unbedeutende Kontaminationen hingegen kommen relativ häufig vor, z. B. in nuklearen Anlagen oder Forschungslabors. Sie werden im Betrieb in der Regel vom Strahlenschutzpersonal oder Sanitäter ohne ärztliches Zutun fachkundig entfernt. Sollte ein Patient aus einem Betrieb oben genannter Art spezifischer ärztlicher Hilfe bedürfen, so wird man davon ausgehen können, dass evtl. vorhandene Kontaminationen bereits im Betrieb entfernt worden sind, bzw. dort mindestens eine Grobdekontamination stattgefunden hat. Kontaminierte Personen bedürfen auf jeden Fall in folgenden Situationen der ärztlichen Behandlung:

1. Ärztliche Soforthilfe bei vitaler Indikation und zur Erhaltung von Organ- oder Extremitäten- Funktion
2. (Verdacht auf) Wundkontamination – v. a. bei Nukliden mit besonders hoher Folgedosis bei Inkorporation (Actiniden)
3. Verdacht auf nennenswerte Inkorporation durch Inhalation, Ingestion, Wunden oder gesunde Haut.

Im ersten Fall haben Dekontaminationsmaßnahmen zurückzustehen. In den beiden anderen Fällen ist zunächst eine fachgerechte Dekontamination der Hautoberfläche zur Vermeidung weiterer Inkorporation und Kontaminationsverschleppung vorzunehmen.

6.1.1 Dosisabschätzung bei Kontamination

Ausmaß und Ausdehnung von Kontaminationen der Körperoberfläche können ohne spezielle Messgeräte nicht beurteilt werden. Der behandelnde Arzt ist also in der Regel auf eine Zusammenarbeit mit Strahlenschutzfachkräften angewiesen, die über die entsprechenden Geräte verfügen. Häufig ist der Betrieb, aus dem der kontaminierte Patient stammt, in der Lage, die erforderlichen Messungen vorzunehmen und aufzuzeichnen; auch Rettungsorganisationen, wie die Feuerwehr, evtl. nuklearmedizinische Abteilungen können messtechnische Hilfe leisten. Je nach Stärke der Kontamination ist zu entscheiden, ob dekontaminiert werden soll.

Hautdosis H_H durch β -Strahlung:

$$H_H = A_F \cdot F_H \cdot \Delta t$$

Dabei ist A_F die flächenbezogene Aktivität (z. B. in Bq/cm^2), F_H der Haut-Dosisleistungsfaktor und Δt die Dauer der Kontamination. Diese vereinfachte Beziehung gilt, solange die Verweildauer auf der Haut kurz im Vergleich zur physikalischen Halbwertszeit der Radionuklide ist.

Der Dosisleistungsfaktor ist für β -Strahlung grob

$$F_H \approx 1 \text{ (}\mu\text{Sv/h)} / (\text{Bq}/\text{cm}^2)$$

Beispiel: Eine Kontamination der Haut mit $10 \text{ Bq}/\text{cm}^2$ führt in 24 h für den kontaminierten Bereich zu einer Hautdosis von $240 \mu\text{Sv}$.

6.1.2 Allgemeine Hinweise zur Dekontamination, insbesondere zur Personendekontamination

Dekontamination der Haut

⇒ Leicht anhaftende, geringe Kontaminationen lassen sich meist im ersten Waschgang mit Wasser entfernen.

Die Haut ist nur an den kontaminierten Stellen mit lauwarmem fließendem Wasser (ca. 30°C), wie beim normalen Waschen, bei Bedarf unter Benutzung einer schonenden, im schwach sauren pH-Bereich gepufferten Flüssigseife und eines Schwammes möglichst umgehend zu reinigen (ggf. mehrmals, evtl. unter messtechnischer Kontrolle).

Dabei ist zu beachten:

- So hautschonend wie möglich dekontaminieren!
- Kontamination nicht auf andere Körperteile verschleppen!
Von zentral nach peripher, ggf. unter Schutzabdeckung nicht kontaminierter Körperteile dekontaminieren.
- Spätestens bei beginnender Hautrötung die Dekontamination einstellen, Haut nicht durch Dekontaminationsmaßnahmen verletzen!
- Nach Ende der Dekontamination Hautpflegemittel benutzen! [21]

Dekontamination der Haare

⇒ Die Haare mit nach hinten geneigtem Kopf von einem Helfer (mit Handschuhen) waschen und gut nachspülen lassen.

Dabei beachten:

- Kein kontaminiertes Wasser ins Gesicht oder die Ohren gelangen lassen!

Dekontamination der Augen

Nur von einem Arzt, einem Sanitäter oder einer in Erster Hilfe ausgebildeten Person durchführen lassen:

⇒ Spülen der Augen mit geeigneter Spülflüssigkeit vom inneren Augenwinkel nach außen.

Dekontamination von Mund, Nase, Ohren

⇒ Ausspülen des *Mundes* mit reichlich Wasser!

⇒ Dekontamination der Nase durch Schneuzen!

⇒ Dekontamination der *Gehörgänge* – *Ohrspülung* bzw. *Austupfen mit Wasser unter otoskopischer Kontrolle* – nur durch einen Arzt!

Dabei beachten:

- Bei Kontamination von Mund, Nase und Ohren besteht immer Inkorporationsgefahr, ihre Behandlung hat Priorität! Zur Erfassung müssen ggf. nuklidabhängig erforderliche diagnostische Maßnahmen veranlasst werden.

Hautfalten, Nagelfalz und Fingernägel

⇒ Wenn in Hautfalten, im Nagelfalz oder unter den Fingernägeln Kontamination nachgewiesen wird, ist diese gezielt zu entfernen. Hierfür sind einfache Instrumente wie Nagelreiniger, weiche Bürste oder Klebestreifen geeignet.

6.1.3 Vorgehen bei verbleibender Kontamination

Falls der erste Dekontaminationsvorgang nicht zum Erfolg führt, ist die Dekontamination bis zu zweimal zu wiederholen und der jeweilige Dekontaminationseffekt zu messen.

Solange der Dekontaminationseffekt größer als 10 % ist, und der Zustand der Haut es erlaubt, sind weitere Waschvorgänge angezeigt.

⇒ Ist der Dekontaminationseffekt kleiner als 10 % und die verbleibende flächenbezogene Aktivität geringer als 10 Bq/cm^2 (gemittelt über 100 cm^2 bei einer überwiegend über die gesamte Fläche verteilten Kontamination), kann auf eine weitere Dekontamination verzichtet werden.

Falls eine vorzeitige Beendigung der Dekontamination nach den oben genannten Kriterien erforderlich ist und dennoch eine flächenbezogene Aktivität von mehr als 10 Bq/cm^2 verbleibt, ist wie folgt vorzugehen:

- Hinzuziehen des Strahlenschutzbeauftragten und des ermächtigten Arztes
- Abschätzung der Hautdosis
- Entscheidung über weitere Dekontaminationsmaßnahmen
- Aufzeichnung auf möglichst vorgefertigtem Protokoll mit folgenden Angaben:
 - Name / Abt.
 - Zeitpunkt der Kontamination und Dekontaminationsmaßnahme
 - kontaminierter Körperteil

- Fläche der Kontamination in cm^2
- Anfangs- und Restwert der flächenbezogenen Aktivität in Bq/cm^2
- Nuklidzusammensetzung
- verwendete Dekontaminationsmittel
- resultierende Hautdosis
- angeordnete Auflagen zur Freigabe.

An eine mögliche Inkorporation über die Haut muss gedacht werden, ebenso an die Möglichkeit einer Verschleppung von radioaktiven Stoffen bei großflächigen Kontaminationen. Auch bei hartnäckigen Kontaminationen bewirkt der rasche Zellumsatz der Haut eine Abstoßung des kontaminierten Areals in wenigen Tagen. Die Strahlenexposition in der Umgebung ist dabei zu vernachlässigen [21].

6.1.4 Mögliche Strahlenexposition der Ärzte und des medizinischen Assistenz- und Pflegepersonals

Kontaminationen erreichen in der Regel nur eine solche Höhe, dass die daraus resultierende äußere Exposition der Ärzte und des medizinischen Assistenz- und Pflegepersonals bei der Behandlung von kontaminierten Patienten *unterhalb 1 mSv/h* liegt, in den meisten Fällen ist sie wesentlich geringer [1].

6.1.5 Vorsorgemaßnahmen des Rettungs- und medizinischen Personals

Schutzmaßnahmen gegen Kontamination und Inkorporation beim medizinischen Personal sind im Allgemeinen angezeigt. Dazu sollte wie bei Infektionsgefährdung verfahren werden.

Das Entfernen der kontaminierten Kleidung des Patienten ist eine sehr wirksame Dekontaminationsmaßnahme. Kontaminierte Kleidung und möglicherweise kontaminierte Gegenstände müssen in geeigneten Behältnissen (Plastiksäcken) gesammelt werden.

6.1.6 Maßnahmen bei kontaminierten Wunden

Ersthelfende Ärzte oder das Rettungsdienstpersonal werden bisweilen im Zusammenhang mit der gezielten Hilfe bei sogenannten *kombinierten Unfällen*, d. h. konventionellen Verletzungen bei gleichzeitiger Kontamination oder anderweitiger Strahleneinwirkung, insbesondere bei kontaminierten Wunden, vor Probleme gestellt.

Bei einer Kombinationsverletzung hat die Behandlung der lebens- oder funktionsbedrohenden konventionellen Verletzung den Vorrang.

Grundsätzlich ist eine offene Verletzung in einem Kontrollbereich oder beim Umgang mit radioaktiven Stoffen wegen der damit erhöhten Inkorporationsgefahr als radioaktiv verunreinigt anzusehen, solange nicht durch Messung das Gegenteil feststeht.

Vorgehen bei gesicherter Kontamination: Die Wunde wird unter fließendem Wasser, eventuell mit steriler Kochsalzlösung ausgespült, erforderlichenfalls, z. B. bei tiefen Stichwunden, kommt eine Förderung der Wundblutung durch venöse Stauung infrage. Vor Dekontamination der eigentlichen Wunde wird zunächst die Umgebung unter Abdeckung der Wunde mit einem wasserdichten Pflasterverband mit saugender Unterlage gereinigt. Nach Dekontamination der Wundumgebung wird der Pflasterverband entfernt, die Wunde dekontaminiert und danach ebenso wie eine konventionelle Wunde versorgt.

Kontaminierte Wunden und Abschürfungen sollten mit einiger Dringlichkeit behandelt werden, die sorgfältige Überwachung und Bestimmung der Aktivität unter Berücksichtigung der Art der Radionuklide in der Wunde ist für die eigentliche Behandlung maßgebend.

Ob eine *chirurgische Intervention* indiziert ist, hängt weitgehend von dem durch die Wunde aufgenommenen radioaktiven Stoff und dem Zustand der Wunde ab. Radioaktive Stoffe, die leicht löslich sind und damit vom Körper schnell aufgenommen und gelöst in ihm transportiert werden, können eine lokale und eine allgemeine Behandlung erfordern. Im Gegensatz dazu ist bei schwer löslichen Radionukliden eine chirurgische Entfernung zu überlegen. Unter Umständen müssen stark kontaminierte Gewebeteile entfernt werden. Während operativer Maßnahmen müssen die Wunde und das entfernte Material fortlaufend messtechnisch kontrolliert werden.

⇒ Es ist grundsätzlich wichtiger, die Funktion der Organe und deren Struktur und Aussehen zu bewahren als die vollständige Entfernung der Kontamination anzustreben, sofern nicht im Einzelfall mit deterministischen Gesundheitsschäden durch eine Langzeitwirkung radioaktiver Stoffe im Körper gerechnet werden muss.

Bei allen Personen mit bedeutsamen Wundkontaminationen sollten abhängig von infrage kommenden Nukliden Proben von Urin und Stuhl und

das ggf. exzidierte Gewebe asserviert werden, um eine eventuelle Aktivitätsaufnahme aus den Ausscheidungen mit Hilfe einer geeigneten Inkorporationsmessstelle nachweisen zu können.

Wunden durch Hitze und *chemische Einflüsse* können ebenso wie Verletzungen nach Oberflächenkontamination das Eindringen radioaktiver Stoffe in den Körper ermöglichen. Wenngleich die Aufnahme der Aktivität dabei nicht so wahrscheinlich wie bei offenen Wunden ist, soll auch in solchen Fällen rasch gehandelt werden.

6.2 Inkorporation

Unter Inkorporation wird die Aufnahme radioaktiver Substanzen in den Körper verstanden. Sie ist auf folgenden Pfaden möglich

- durch Inhalation,
- durch Ingestion,
- über Hautverletzungen,
- durch perkutane Resorption bei intakter Haut (Iod, Tritium).

Die Gefährdung bei einer Inkorporation von radioaktiven Stoffen hängt von zahlreichen Faktoren ab:

- radioaktiver Stoff, Aktivität, Strahlungsart, physikalische Halbwertszeit;
- Art der chemischen Verbindung, bei flüchtigen Verbindungen Gas- oder Aerosolform, bei festen oder flüssigen Verbindungen Partikelgröße und Löslichkeit;
- bei Inkorporation durch Inhalation Atemrate, bei Ingestion Füllungszustand des Magen-Darm-Trakts, bei Aufnahme über Wunden Art und Größe der Verletzung;
- Verteilung der Radionuklide im Körper;
- Art und Geschwindigkeit der Ausscheidung des inkorporierten radioaktiven Stoffes (Niere/Darm, biologische Halbwertszeit).

Alle diesbezüglich verfügbaren Informationen sollten frühzeitig erfasst und dokumentiert werden, um gezielte Gegenmaßnahmen zu ermöglichen.

6.2.1 Präventive Maßnahmen zur Verhinderung einer Inkorporation beim beruflichen Umgang mit offenen Radionukliden

Eine wichtige Aufgabe des medizinischen und technischen Strahlenschutzes ist die Vermeidung von Inkorporationen.

Technische Vorsorgemaßnahmen zielen auf die Vermeidung von Inkorporationen durch dichten Einschluss des radioaktiven Materials.

Beim direkten Umgang mit offenen Nukliden ist auf das Tragen persönlicher Schutzausrüstung (Handschuhe, Kleidung, Atemschutz) zu achten.

Weiterhin sind regelmäßige ärztliche Untersuchungen erforderlich, die mit Sorgfalt die Intaktheit der Haut, die Funktionsfähigkeit der Ausscheidungs- und Entgiftungsorgane (Leber, Nieren) und die Lungenfunktion als Indikator zur Einschätzung der Fähigkeit der Lunge zur Selbstreinigung beurteilen (Erörterung in Richtlinie „Arbeitsmedizinische Vorsorge beruflich strahlenexponierter Personen durch ermächtigte Ärzte“, Abschnitte 3.3.3 und 3.3.4 [22]).

6.2.2 Inkorporationsmessung, Dosisabschätzung

Im weiteren Sinne gehören zu Vorsorgemaßnahmen bei der beruflichen Strahlenexposition auch regelmäßige Inkorporationsüberwachungen. Sie beinhalten die Bestimmung der Aktivitätszufuhr, und, soweit Grenzwerte überschritten werden, die Bestimmung der aus der Aktivitätszufuhr resultierenden Körperdosis.

Die rechtliche Grundlage für die Inkorporationsüberwachung beruflich strahlenexponierter Personen wird in der „Richtlinie für die Inkorporationsüberwachung“ umgesetzt [23].

Zur Ermittlung der Körperdosis ist die Aktivität der inkorporierten Radionuklide

- im Gesamtkörper bzw. in Körperbereichen (z. B. Lunge, Schilddrüse, Skelett),
- in den Ausscheidungen (z. B. Urin, Stuhl, ggf. Asservate),
- in der Raumluft am Arbeitsplatz

allein oder in Kombination zu bestimmen und anschließend dosimetrisch zu bewerten. Auch dies geschieht zweckmäßigerweise in Zusammenarbeit mit einer geeigneten Inkorporationsmessstelle.

Liegt ein Inkorporationsverdacht vor, so ist die „Inkorporationsüberwachung aus besonderem Anlass“ durchzuführen. Dabei sollen Auswahl und Anwendung der verschiedenen Messverfahren – in vivo – Ganz- oder Teilkörperzähler – in vitro – Urin-, Stuhlproben, Nasen-, Rachenabstrich, Wundexzidat, Messung der Aktivität im Blut, Raumluftüberwachung – sicherstellen, dass eine zwischenfallbedingte effektive Dosis größer 1 mSv sicher erkannt wird.

Grundsätzlich kann gelten, dass nach Inkorporation von γ -Strahlern bereits kurze Zeit nach dem Ereignis Dosisabschätzungen vorliegen können. Bei nicht γ -spektroskopisch nachweisbaren Nukliden (einige β - und α -Strahler) werden erste Dosisabschätzungen mit deutlich größeren Unsicherheitsfaktoren erst wesentlich später vorliegen. Im Einzelfall können Leitnuklidmessungen Ergebnisverbesserungen bringen.

Die Abschätzung der Körperdosis geschieht nuklidspezifisch im Prinzip folgendermaßen:

- Messung der zu einem bestimmten Zeitpunkt im Körper vorhandenen oder nach einer bestimmten Zeit im Urin oder Stuhl ausgeschiedenen Aktivität,
- Extrapolation der gemessenen Aktivität mit Hilfe von Retentions- und Ausscheidungsfunktionen auf den Zeitpunkt der Inkorporation,
- Berechnung der Körperdosis mit Hilfe von zeitabhängigen Dosiskoeffizienten.

Von der Zuverlässigkeit und zeitlichen Verfügbarkeit dieser von vielen Faktoren abhängigen Messergebnisse hängt es ab, ob und wieweit sie Grundlage für therapeutische Überlegungen sein können.

6.2.3 Dekorporationsbehandlung (Ausscheidungsintensivierung)

Inkorporationen sind trotz der Zunahme des Umgangs mit offenen Nukliden in der Medizin, Wissenschaft und Industrie relativ seltene Ereignisse. Sofern dort ein ermächtigter Arzt tätig und zuständig ist, sollte er wissen, welche Nuklide in seinem Verantwortungsbereich gebräuchlich sind, damit er

denkbare Inkorporationen durch entsprechende Vorsorge sachgerecht versorgen kann.

Die Entscheidung zur Durchführung der Dekorporationsbehandlung ist eine ärztliche Maßnahme!

Auf die prinzipiell möglichen, vom Inkorporationsweg und Nuklid abhängigen Dekorporationstherapien kann in diesem Rahmen nur cursorisch eingegangen werden: s. auch Tab. im Anhang C.

⇒ **Verminderung der gastrointestinalen Resorption oder Verkürzung der gastrointestinalen Verweildauer:**

- Magenspülung
- Auslösung von Erbrechen
- Gabe von Abführmitteln (z. B. isotone Lösung Magnesium sulfuric 4%)
- Alginat zur Resorptionsminderung
- Berliner Blau zur Resorptionsminderung (primär und sekundär – Vermeidung eines enterohepatischen Kreislaufs)
- Aluminiumhaltige Antacida
- Bariumsulfat

⇒ **Blockierung, isotonische Verdünnung und Verdrängung:**

- Schilddrüsenblockade mit stabilem Iod
- Wasserzufuhr zur Verkürzung der biologischen Halbwertszeit von Tritium (ggf. forcierte Diurese)
- Calciumgluconat zur Verringerung der Deposition von Strontium

⇒ **Mobilisierende und komplexbildende Substanzen**

- Expektorantien und Inhalationstherapie
- Chelatbildner, hier insbesondere DTPA (Diäthylentriaminpentaacetat) zur Ausscheidungsintensivierung von Schwermetallen, insbesondere von Plutonium und Americium

Ausscheidungsintensivierende Maßnahmen sind am wirkungsvollsten, wenn sie die Resorption in den Blutkreislauf und die Aufnahme in Organe und Gewebe verhindern.

Daraus folgen als erste Therapieprinzipien die wundnahe venöse Stauung bei kontaminierten Verletzungen und die Verringerung gastrointestinaler Resorption bei Aufnahme über den Ingestionspfad.

Ein zweites, ähnlich wirksames Prinzip besteht in der Blockierung der Aufnahme in ein Organ (Beispiel: Iodblockade der Schilddrüse), der isotonischen Verdünnung oder Verdrängung von Radionukliden, ein drittes in der Anwendung von Komplexbildnern (mobilisierender Substanzen), insbesondere von Chelatbildnern zur Erschwerung der Ablagerung in Organe.

Schwierig ist die Frage der Indikation und der Rechtzeitigkeit von Behandlungsmaßnahmen, weil das Ausmaß von Inkorporationen, besonders, wenn es sich um α - und β -Strahler handelt, zunächst nicht bekannt ist. Dosimetrische Auswertungen können Tage dauern. Die Entscheidung über therapeutisches Handeln muss deshalb vom erstbehandelnden Arzt schon aus den Erhebungen über den Unfallhergang, der Ermittlung der beteiligten Nuklide und der Inkorporationswege getroffen werden. Diese anamnestischen Daten werden durch erste Strahlenmessungen und Bestimmung der Aktivität im Blut ergänzt.

Aus diesen ersten, meist unsicheren Daten muss häufig schon die Indikation zu einer ausscheidungsintensivierenden Therapie gestellt werden.

Grundsätzlich sollte nach internationaler Übereinkunft eine Behandlung bei Überschreitung des 10-fachen von Grenzwerten erfolgen, beim 1- bis 10-fachen erwogen werden. Unterhalb von Grenzwerten ist sie nicht erforderlich.

Besonders bei Plutonium- und Americium-Inkorporation ist diese Abschätzung wegen des analytischen Aufwandes in praxi meist nicht rechtzeitig möglich. Andererseits käme eine medikamentöse Ausscheidungsintensivierung erst nach Vorlage von Ergebnissen der Ausscheidungsanalytik zu spät für die erforderliche Vermeidung der Deposition von Nukliden in nicht mehr erreichbaren Zielorganen (Leber, Knochenoberfläche). Die Indikation zur Einleitung einer Therapie mit Chelatbildnern ist also schon gegeben, wenn besonders bei kontaminierten Wunden ein entsprechender Verdacht, beispielsweise durch Messergebnisse von Wundsonden oder Überschreitung von Raumluftgrenzwerten, begründet ist. Dies gilt unabhängig davon, dass dadurch die Aussage der nachfolgenden Inkorporationsmessung und Dosisabschätzung unsicherer wird.

Dieses pragmatische Vorgehen ist gerechtfertigt, weil die sofortige Gabe des Chelatbildners (DTPA) bei Beachtung von medizinischen Kontraindikationen nach bisherigen internationalen Erfahrungen praktisch ohne Nebenwirkungen ist.

7 Unfallmanagement und Behandlungsmöglichkeiten

Die Rettungs- und Sanitätsdienste verfügen im Allgemeinen nicht über eine persönliche Schutzausrüstung wie Atemschutz oder Personendosimeter und sind nicht in der Handhabung dieser Ausstattung ausgebildet. In der Regel ist es daher so, dass Unfallopfer von der Feuerwehr aus dem Gefahrenbereich gerettet und an der Grenze des Gefahrenbereichs an den Rettungsdienst übergeben werden. Falls die Feuerwehr nicht verfügbar ist, muss diese Aufgabe auch vom Rettungs- bzw. Sanitätsdienst übernommen werden.

Bei Unfällen mit radioaktiven Stoffen soll dabei der Rettungsdienst auf die mögliche oder gemessene Kontamination des Betroffenen hingewiesen werden. Möglichst genaue Angaben über diese Kontaminationsmessungen oder das Strahlenfeld, aus dem die Rettung erfolgte, sind notwendig, damit der später behandelnde Arzt mit Kenntnissen im Strahlenschutz die Folgen abschätzen kann.

Bei kontaminierten Verletzten sind alle wichtigen, lebenserhaltenden Maßnahmen ohne Rücksicht auf die Kontamination durchzuführen.

⇒ Es sind keine Kontaminationen vorstellbar, die bei Beachtung der beschriebenen Schutzmaßnahmen zu einer nennenswerten Gefährdung des behandelnden Personals führen können.

Die Regionalen Strahlenschutzzentren (RSZ)

Um die Betriebe bei den Maßnahmen, die bei Unfällen im Umgang mit ionisierender Strahlung ergriffen werden müssen, zu unterstützen, haben die Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik und die Berufsgenossenschaft der Chemischen Industrie mit dem Institut für Strahlenschutz das System der Regionalen Strahlenschutzzentren aufgebaut (siehe Anhang B).

Die Erstversorgung eines Arbeitsunfallverletzten obliegt demjenigen Betrieb, in dem der Unfall geschehen ist. Dieser hat, gemäß den entsprechenden Vorschriften, Maßnahmen zur Ersten Hilfe zu treffen und Ausrüstung bereit zu halten.

Auch die Ausbildung von Ersthelfern und der Kontakt zu Ärzten, Kliniken und Rettungsdiensten gehört hierzu.

Sind in einem Betrieb besondere Gefährdungen vorhanden, z. B. durch spezielle Geräte, Verfahren oder Arbeitsstoffe, hat die Erste-Hilfe-Organisation des Betriebes auch dies zu berücksichtigen.

Im Falle erhöhter Einwirkung ionisierender Strahlung sollte stets ein Strahlenschutzarzt [1] hinzugezogen oder zumindest konsultiert werden. Dies kann der ermächtigte Arzt oder auch der Betriebsarzt sein, wenn er über besondere Kompetenz im Bereich der Strahlenschutzmedizin verfügt. Das folgende Ablaufschema (Abb. 7-1 [5]) gibt einen Überblick über Maßnahmen bei möglicher erhöhter Einwirkung ionisierender Strahlung.

Im Falle einer lebensbedrohenden Verletzung hat die intensivmedizinische Behandlung stets Vorrang vor der Dekontamination und der strahlenschutzmedizinischen Versorgung.

In Deutschland ist die Anzahl von Zwischenfällen mit ionisierender Strahlung, bei denen Personen betroffen sind, wegen des hohen Niveaus des Strahlenschutzes sehr gering. Allerdings führt dies auch dazu, dass weder Strahlenschutzbeauftragte noch Ärzte konkrete praktische Erfahrungen über die zu treffenden Maßnahmen sammeln können. Um dennoch allen Beteiligten im Ernstfall die notwendige Information und wenn nötig auch Hilfe anbieten zu können, ist es unabdingbar, das vorhandene Wissen zu bündeln und es im Falle eines Unfalles über Beratungs- und Leitstellen anzubieten.

Die Regionalen Strahlenschutzzentren sind solche Beratungs- und Leitstellen. Sie sind an Forschungszentren und Kliniken eingerichtet, die über Fachpersonal mit entsprechenden Erfahrungen verfügen.

Das Regionale Strahlenschutzzentrum steht allen Beteiligten als Beratungs- und Leitstelle zur Verfügung. Rund um die Uhr ist ein Ansprechpartner erreichbar, der zunächst telefonisch die notwendigen Auskünfte für das weitere Verfahren geben kann. Das Zentrum kann dann, in Absprache mit dem Betriebsarzt, dem ermächtigten Arzt oder dem Kliniker empfehlen, wo

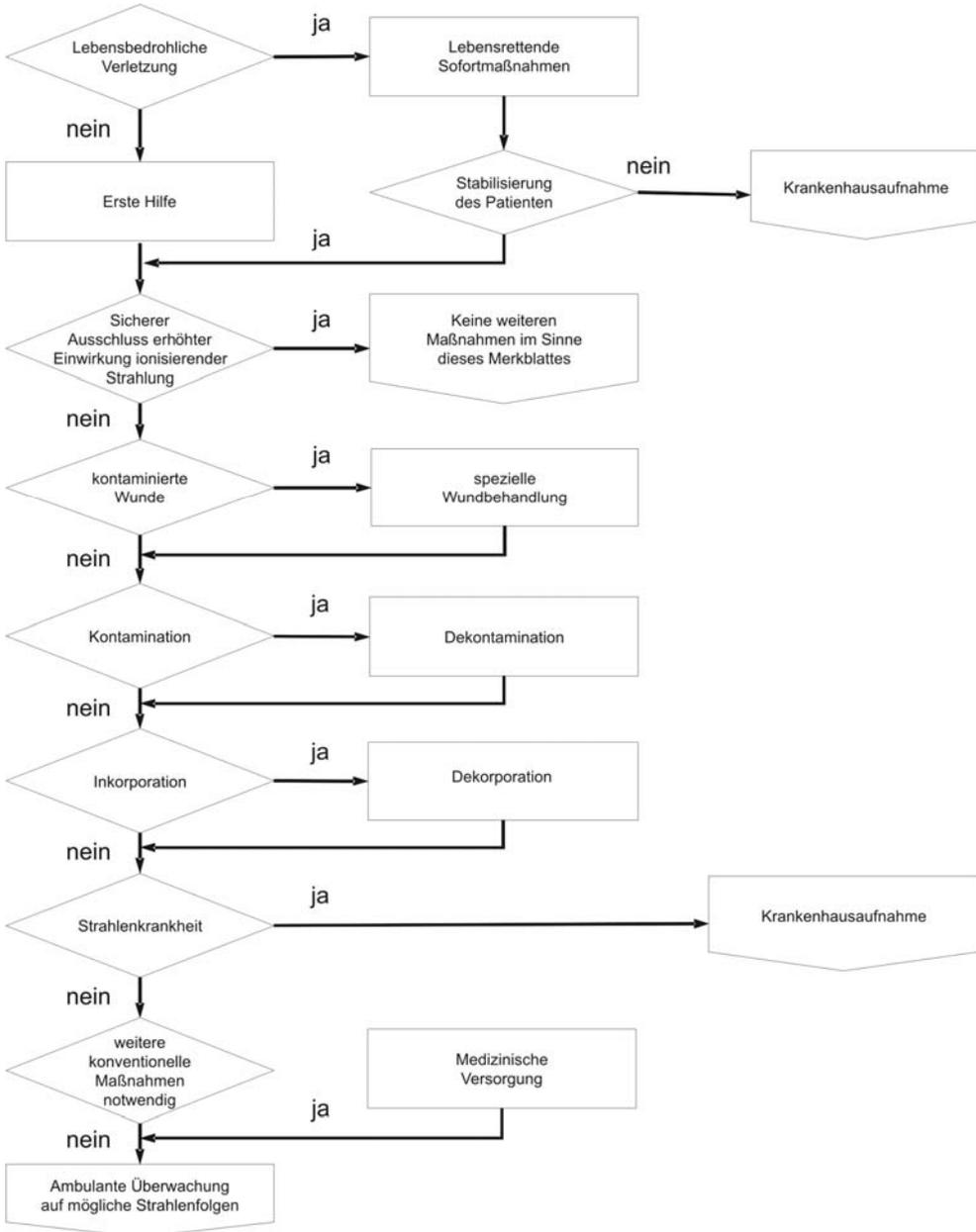


Abb. 7-1: Ablaufschema: Maßnahmen bei möglicher erhöhter Einwirkung ionisierender Strahlung [5]

dem Betroffenen die beste Hilfe zukommen kann. Es kann Hinweise zur Diagnostik und Therapie sowie zur strahlenschutztechnischen Beweissicherung geben. Im Anforderungsfall ist das RSZ oder eine mit ihm verbundene Einrichtung auch in der Lage, den Patienten selbst zu betreuen. Möglichkeiten zur Strahlungsmessung sind in den Zentren ebenfalls vorhanden.

Bei schweren Strahlenunfällen kann die Spezialstation der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik in Ludwigshafen-Oggersheim überbrückend in Anspruch genommen werden. Für den Fall einer schweren Hautreaktion, z. B. durch Röntgenstrahlung, stehen in der Fachklinik Hornheide bei Münster erfahrene Dermatologen und Chirurgen bereit. Die Einweisung in diese Kliniken erfolgt in jedem Fall über die Regionalen Strahlenschutzzentren.

8 Weitergehende diagnostische Maßnahmen

Über die Sequentialdiagnostik und die Diagnostik bei den einzelnen klinischen Formen des akuten Strahlensyndroms hinausgehende Untersuchungen haben das Ziel, die Höhe der Exposition abzuschätzen. Dazu kann eine Reihe von Veränderungen als biologische Dosis-Indikatoren herangezogen werden. Im Gegensatz zur physikalischen Dosimetrie erfolgt bei der Verwendung biologischer Indikatoren nicht die Erfassung der Dosis selbst, sondern der Wirkung dieser Dosis im Organismus. Damit werden individuelle Unterschiede in der Strahlenempfindlichkeit mit erfasst.

8.1 Chromosomenanalyse

Die Chromosomenanalyse liefert vor allem in Fällen, in denen keine physikalische Dosimetrie verfügbar ist, neben anderen biologischen Verfahren wertvolle Informationen. Sie wird üblicherweise an Lymphozyten durchgeführt.

Das Blut für eine Chromosomenanalyse kann direkt nach der Exposition entnommen werden. Vor allem nach hohen Expositionen ($\gg 1$ Gy) empfiehlt sich eine frühzeitige Abnahme, da sonst die Gefahr besteht, dass die Lymphozyten-Anzahl so stark abfällt, dass die Chromosomenanalysen sehr zeitaufwändig werden.

Wie aus Unfallsituationen bekannt ist, ändert sich die Häufigkeit der Chromosomenaberrationen pro Zelle innerhalb der ersten Wochen nach der Exposition kaum. Aus diesen Gründen sollte die Blutprobe für eine Chromosomenanalyse zwischen dem 1. und dem 20. Tag nach der Exposition entnommen werden. Dazu werden 5-10 ml venöses Blut (heparinisiertes Blut) benötigt. Vor der Blutentnahme sollte mit der Arbeitsgruppe, die die Chromosomenanalyse durchführen soll, Kontakt aufgenommen werden, um Modalitäten der Blutentnahme und des Blutversandes zu besprechen.

Im Labor werden Lymphozytenkulturen angelegt und nach 2 bis 3 Tagen die Chromosomenpräparate hergestellt. Daran schließt sich die morphologische Beurteilung der Chromosomen an.

Dizentrische Chromosomen sind in der Zellteilung an den zwei Zentromeren zu erkennen. Sie treten spontan nur selten auf. Die Häufigkeit dizentrischer Chromosomen nach Bestrahlung folgt einer linear-quadratischen Dosiswirkungskurve. Die Lymphozyten werden zur Zellteilung angeregt (unter Verwendung des sog. Phythämagglutinin), die Anzahl an dizentrischen Chromosomen wird in den mitotischen Zellen lichtmikroskopisch ausgewertet und das Dosisäquivalent dann durch Vergleich mit entsprechenden Eichkurven abgeschätzt. Der Dosisbereich, in dem das Verfahren anwendbar ist, liegt zwischen 0,1 bis zu ca. 4 Gy. Diese Methode ist derzeit die Standardmethode zur biologischen Dosisindikation.

Eine alternative Methode ist der Nachweis stabiler, d. h. auch an die Tochterzellen weitergegebener Translokationen durch die sog. Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (FISH). Dabei werden mit fluoreszierenden Farbstoffen markierte DNA-Sonden eingesetzt, die spezifisch an bestimmte Chromosomen binden und sie einheitlich mit einem Fluoreszenzfarbstoff markieren. Weitere Chromosomen des Genoms können mit anderen Sonden spezifisch angefärbt oder alle Chromosomen homogen markiert werden. Translokationen sind dann als Farbsprünge innerhalb der Chromosomen zu erkennen. Wiederum kann über entsprechende Kalibrierkurven das Dosisäquivalent bestimmt werden. Der zu bestimmende Dosisbereich ist breiter als für die Bestimmung dizentrischer Chromosomen. Jedoch sind Translokationen weniger spezifisch für die Einwirkung ionisierender Strahlung, dafür aber noch langjährig nachweisbar.

Bei steigenden Strahlendosen sinkt die Fähigkeit der Zellen zur Teilung, so dass zunehmend weniger Mitosen zur Auswertung zur Verfügung stehen.

Hier kann die sog. „Premature Chromosome Condensation“ (vorzeitige Chromosomenkondensation) eingesetzt werden, d. h. die Kondensation des Chromatins in Interphasekernen. Dies wird üblicherweise dadurch bewerkstelligt, dass die Lymphozyten mit mitotischen Zellen (in der Regel von etablierten Zellkulturen, z. B. vom Hamster) zusammengebracht werden. Letztere enthalten Faktoren, welche die Auflösung der Kernmembran und die Kondensation des Chromatins bewirken. Neben der Möglichkeit zur Auswertung nichtmitotischer Zellen kann mit dieser Methode auch die bei den anderen aufgeführten Verfahren notwendige Wartezeit zwischen Stimulation der Zellen und dem Eintreten von Mitosen (üblicherweise 2 Tage) vermieden werden.

Die Chromosomenanalyse kann für einzelne Patienten in entsprechenden Labors innerhalb weniger Tage durchgeführt werden. Ist die Zahl der Exponierten sehr hoch (einige Dutzend oder mehr), so sollte initial die Analyse von Mikronuklei (siehe 8.2) durchgeführt werden, da dieses Verfahren deutlich schneller und weniger aufwändig ist.

8.2 Mikronukleus-Test

Eine weniger spezifische, aber ebenso gut durchzuführende Methode zur biologischen Dosisindikation ist die Bestimmung von Mikronuklei. Diese entstehen, wenn Zellen mit Chromosomenaberrationen in die Mitose eintreten und die zentromerlosen Bruchstücke (seltener ganze Chromosomen) nicht zu den Zellpolen gelangen und deshalb nicht in die neu gebildeten Kerne integriert werden können. Die extranukleären Bruchstücke oder Chromosomen werden dann von einer eigenen Kernmembran umgeben und bilden so Mikronuklei.

Mikronuklei können somit nur dann beobachtet werden, wenn eine Teilung des Zellkernes erfolgt ist. Alle Zellkerne, die sich nicht teilen, „verdünnen“ gewissermaßen den Effekt, weil sie in vielen Fällen irrtümlich als Zellen mit „0“ Mikronuklei gezählt werden. Da gerade die Teilungsaktivität von Lymphozyten, die häufig in der biologischen Dosimetrie eingesetzt werden, nach Stimulation mit beispielsweise Phythämagglutinin (PHA) von Mensch zu Mensch sehr unterschiedlich ist, ist es unbedingt erforderlich, Mikronuklei nur in solchen Zellen zu zählen, die sich genau einmal geteilt haben. Man identifiziert solche Zellen, indem man der Zellkultur Cytochalasin B zusetzt. Cytochalasin B lässt zwar eine Kernteilung zu, nicht jedoch die Zellteilung. Als Ergebnis erhält man Zellen mit zwei Kernen (binukleate

Zellen), wenn eine Kernteilung erfolgt ist. Nur in diesen Zellen zählt man die Mikronuklei.

Der Dosisbereich, in dem der Mikronukleus-Test in Lymphozyten anwendbar ist, erstreckt sich in der Routine im individuellen Fall von etwa 0,3 bis 5 Gy. Unter Verwendung sehr aufwändiger Verfahren, die für ein Screening großer Fallzahlen sicher nicht in Frage kommen, kann dieser Bereich auf etwa 0,1 bis etwa 15 Gy erweitert werden.

8.3 Einzelschritte zur Veranlassung weiterführender diagnostischer Maßnahmen in peripheren Blutlymphozyten und praktische Hinweise

1. Telefonische Kontaktaufnahme mit der Stelle, die die Analyse durchführen soll.¹⁾
2. Entnahme von 5 - 10 ml venösem Blut zwischen dem 1. und 20. Tag nach der Strahlenexposition. Als Gerinnungshemmer muss das sterile Röhrchen Heparin enthalten.
3. Die Blutprobe kann in geeignetem Behälter (z. B. Kühltasche) per Eilpost verschickt werden.
4. Für die Zuordnung und Interpretation des Befundes sind folgende Angaben nötig:
 - Name der exponierten Person;
 - Zeitpunkt der Strahlenexposition;
 - Ganz- oder Teilkörperexposition;
 - Strahlenqualität;
 - Zeitpunkt der Blutentnahme;
 - Berufliche oder medizinische Strahlenexposition durch Röntgendiagnostik, Nuklearmedizin, Strahlentherapie, sonstiges;
 - Einnahme von Medikamenten (welche / Dosis);
 - akute oder bis 6 Wochen vor dem Ereignis zurückliegende Virusinfekte.

¹⁾ Bundesamt für Strahlenschutz, Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Oberschleißheim (Neuherberg), z. Hd. Frau Kulka / Herrn Romm, AG SG 1.1
Tel.: 01888 333-2210 / -2214,
Fax: 01888 333-2205,
E-Mail: UKulka@bfs.de / HRomm@bfs.de

9 Literatur

- [1] SSK:
Medizinische Maßnahmen bei Kernkraftwerksunfällen, Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 4, herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 3. überarbeitete Auflage, H. Hoffmann GmbH-Fachverlag, Berlin, 2007
- [2] Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf Straßen (Gefahrgutverordnung Straße - GGVS) vom 13. Nov. 1990, BGBl. I S. 2453
- [3] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV), in der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Juli 2001, BGBl. I S. 1714, ber. I 2002 S. 1459, geändert durch Verordnung zur Änderung der Röntgenverordnung und anderer atomrechtlicher Verordnungen vom 18. Juni 2002, BGBl. I S. 1869, 1903
- [4] Feuerwehr-Dienstvorschrift 500 (FwDV 500), Stand: 2003, Einheiten im ABC-Einsatz (In den Ländern eingeführte Dienstvorschrift der Feuerwehren)
- [5] BGI 668:
Erste Hilfe bei erhöhter Einwirkung ionisierender Strahlung. Institut für Strahlenschutz der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik und der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie, 2004
- [6] BMU:
UMWELTPOLITIK, Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 2004, Bonn 2005
- [7] Miska, H.:
Faustregeln für den Strahlenschutz, Fortschritte im Strahlenschutz FS-01-155AKN, S. 293, TÜV-Verlag Köln, 2001. (Der Autor weist auf einen Druckfehler in den Gleichungen 15a und 15b sowie der zugehörigen Textzeile hin: Bei H (SD) ist der Index „eff“ zu streichen.)

- [8] ICRP 60:
1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Oxford : Pergamon Press, 1991 (Deutsche Ausgabe: Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission 1990. ICRP Veröffentlichung 60. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1993)
- [9] UNSCEAR:
Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation for the General Assembly. UNSCEAR 1993 Report, Vienna, 1993
- [10] Arndt, D.:
Klinik der strahlenbedingten Hautschäden. In: Löster, W., Drexler, G., Stieve, F.-E. (Hrsg.): Die Messung des Dosisflächenproduktes in der diagnostischen Radiologie als Methode zur Ermittlung der Strahlenexposition, S. 218. Hoffmann Verlag, Berlin, 1995
- [11] Wagner, L.D., Eifel, P.J., Giese, R.A.:
Potential Biological Effects Following High X-ray Dose Interventional Procedures. *J. Vasc. Intervent. Radiol.* 72, p. 71, 1994
- [12] SSK:
Wirkungen nach pränataler Bestrahlung. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 2, 2. Auflage. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1989
- [13] ICRP:
Biological Effects after Prenatal Irradiation (Embryo and Fetus). Publication 90. Pergamon Press, Oxford, 2003
- [14] Doll, R., Wakeford, R.:
Risk of childhood cancer from fetal irradiation. *Brit. J. Radiol.* 70: 130-139, 1997
- [15] Fliedner, T.M., Friesecke, I., Beyrer, K. (Hrsg.):
Medical Management of Radiation Accidents. Manual on the Acute Radiation Syndrome, British Institute of Radiology, 2001

-
- [16] Dainiak, N., Waselenko, J.K., Armitage J.O., MacVittie T.J., Farese A.M.:
The hematologist and radiation casualties. *Hematology* 2003; S. 473-496
- [17] Waselenko, J.K., MacVittie, T.J., Blakely, W.F. et al.:
Medical management of the acute radiation syndrome: recommendations of the Strategic National Stockpile Radiation Working Group. *Ann Intern Med* 140:1037-1051, 2004
- [18] Gorin, N.C., Fliedner, T.M., Gourmelon, P., Ganser, A., Meineke, V., Sirohi, B., Powles, R.:
Apperley J. 2006. Consensus conference on European preparedness for haematological and other medical management of mass radiation accidents. *Ann Hematol.* 85:671-9.
- [19] Lee, G.R., Foerster, J., Lukens, J., Paraskavas, F., Greer, J.P., Rodgers G.M.:
Wintrobe's Clinical Hematology. Baltimore, Williams & Wilkins, 1999
- [20] Wendt, F.:
Behandlung des Strahlensyndroms. In: Messerschmidt, O., Feinendegen, L.E., Hunzinger, W. (Hrsg.): Industrielle Störfälle und Strahlenexposition. *Strahlenschutz in Forschung und Praxis*, Bd. XXI, S. 230, Thieme Verlag, Stuttgart, 1980
- [21] SSK:
Maßnahmen nach Kontamination der Haut mit radioaktiven Stoffen. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 18, herausgegeben vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1992
- [22] Richtlinie zur Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) und zur Röntgenverordnung (RöV), Arbeitsmedizinische Vorsorge beruflich strahlenexponierter Personen durch ermächtigte Ärzte (GMBI. Nr. 19 vom 27.02.2004, S. 350)

- [23] Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosen, Teil 2: „Ermittlung der Körperdosis bei innerer Strahlenexposition (Inkorporationsüberwachung) (§§ 40, 41 und 42 StrlSchV) (GMBI. im Druck)

Zitierte Literatur des Anhangs

- [A1] Institut für Strahlenschutz der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik und der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie:
Handbuch für Regionale Strahlenschutzzentren. Köln
- [A2] Gerber, G.B., Thomas, R.G.:
Guidebook for the treatment of accidental internal radionuclide contamination of workers, Radiation Protection Dosimetry Vol. 41 No.1 1992 (ISBN 1870965221)

Weiterführende Literatur

AFFRI:

Medical Management of Radiological Casualties, 2nd Ed. AFFRI Special Publication 03-1, Bethesda, 2003

Barabanova, A., Osanov, D.P.:

The Dependence of Skin Lesions on the Depth-dose Distribution from β -Irradiation of People in the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident. Int. J. of Radiation Biology 57/4, p. 783, 1990

Crosbie, W.A., Gittus, J.H. (ed):

Medical Response to Effects of Ionizing Radiation. London: Elsevier, 1989

Dörr, W., Herrmann, Th., Riesenbeck, D.:

Prävention und Therapie von Nebenwirkungen in der Strahlentherapie. Bremen: UNI-MED Science, 2005

BfS:

Bekanntmachung der diagnostischen Referenzwerte für radiologische und nuklearmedizinische Untersuchungen, BAnz. Nr. 143, S. 17503/17504, 2003

Henge-Napoli, M.H., Stradling, G.N., Taylor, D.M.:

Decorporation of radionuclides from the human body. Radiation, Protection, Dosimetry, Vol.87, No. 1, 2000

Hopewell, J.W.:

The Skin: Its Structure and Response to Ionizing Radiation. Int. J. of Radiation Biology 57/4, p. 751, 1990

IAEA:

Strahlenunfälle. Was der Arzt über medizinische Maßnahmen bei strahlenexponierten Personen wissen sollte. Informationsschrift der Internationalen Atomenergiebehörde, Februar 1986

IAEA:

Medical Handling of Accidentally Exposed Individuals. Safety Series No. 88, IAEA, 1988

IAEA:

Manual for first responders to a radiological emergency. Vienna, October 2006

ICRP:

Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. In: Annals of the ICRP, Vol. 18, Publication 53. Smith, H. (ed.). Pergamon Press, Oxford, 1988

ICRP:

Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. Addendum to ICRP 53. In: *Annals of the ICRP*, Vol. 28, Publication 80. Valentin, J. (ed.). Pergamon Press, Oxford, 1998

ICRP:

Radionuclide Transformations. Energy and Intensity of Emissions. ICRP Publication 38, *Annals of the ICRP* 11-13, 1983

Institut für Strahlenschutz der Berufsgenossenschaft Feinmechanik und Elektrotechnik und der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie:

Handbuch für Regionale Strahlenschutzzentren. Stand 2005

Mettler, F.A. & Voelz, G.L.:

Major radiation exposure – What to expect and how to respond. *N Engl J Med* 346:1554-1561, 2002

NCRP:

Developing Radiation Emergency Plans for Academic, Medical or Industrial Facilities. Recommendation, August 30, 1991

Nénot, J.C.:

Medical and Surgical Management for Localized Radiation Injuries. *Int. J. of Radiation Biology* 57/4, p. 783, 1990

Nosske, D., Minkov, V., Brix, G.:

Establishment and application of diagnostic reference levels for nuclear medicine procedures in Germany. *Nuklearmedizin*. 43(3):79-84, 2004

Peter, R. U.:

Cutaneous radiation syndrome in multi-organ failure. *British Journal of Radiology* (2005) Supplement 27, 180-184, 2005

Scherer, E., Streffer, Ch., Trott, K.-R. (Ed.):

Radiopathology of Organs and Tissues. Springer Verlag, Berlin, 1991

Trott, K.-R., Herrmann, Th., Dörr, W.:

Strahlenwirkungen auf Normalgewebe. Urban&Vogel, München, 2002

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung RöV) vom 8. Januar 1987, BGBl. I S. 114, zuletzt geändert durch § 50 des Gesetzes über Medizinprodukte (Medizinproduktegesetz – MPG) vom 2.8.1994, BGBl. I S. 1963

Vogt, H.-G., Schulz, H.:

Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes, 3., vollständig neu bearbeitete Auflage, Hanser Verlag, München, Wien, 2004

Weickardt, U.:

Der Strahlenunfall. Informationsschrift zur Behandlung von Strahlenverletzten. 2. Auflage, Schweizerische Unfallversicherungsanstalt, 2001

Anhang A

Unfallmeldung, Strahlenunfallerhebungsbogen

Strahlenunfallerhebungsbogen 2

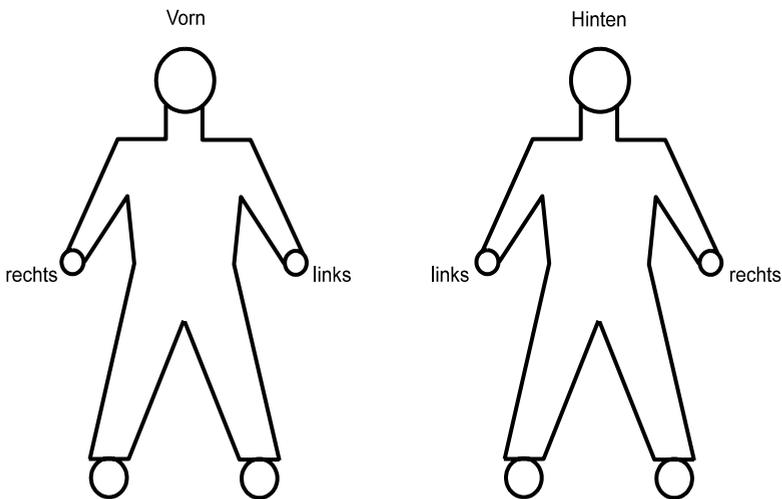
Angaben des BETRIEBLICHEN STRAHLENSCHUTZES/ERSTHELFERS/SANITÄTERS

1. Personenkontamination keine Kontamination

Messgerät und Sonde _____

 α -Aktivität $\alpha + \beta$ -AktivitätImp/min. oder Bq/cm²: _____(Unterhalb eines Wertes von 10 Bq/cm² sind keine Strahlenschutzmaßnahmen erforderlich)

Lokalisation:

Kontaminierte Flächen als Schraffur unter Angabe der Höhe der Kontamination eintragen (Imp/min. oder Bq/cm²).

Wurde Kontamination beseitigt?

ja

nein

Falls Restkontamination, wo _____

Imp/min oder Bq/cm² _____

Kontaminierte Verletzung

ja

nein

Lokalisation: _____

2. Inkorporation

Inkorporationsverdacht

ja

nein

Vermutete Radionuklide _____

Inkorporationsüberwachung veranlasst
(welche) _____

ja

nein

Dekorporationstherapie eingeleitet
(welche) _____

ja

nein

Ort, Datum, Uhrzeit _____

Unterschrift

Strahlenunfallerhebungsbogen 3
Angaben des ARZTES

1. Erhebungen zur Befindlichkeit des Patienten:

Verletzungen
Frakturen
Weichteilverletzungen
Allgemeine Symptomatik ja nein wenn ja, gering stark schwach
Schwächegefühl
Kopfschmerzen
Übelkeitsgefühl
Erbrechen
Befunderhebungen
Blutdruck _____ mm Hg
Puls _____ pro min.
Atemfrequenz _____ pro min.
Körpertemperatur _____ °C
Wahrnehmungsfähigkeit gestört? (Bewusstlosigkeit) ja nein
wenn ja, kurze Beschreibung _____

Hautbefund (z. B. Erythem) (wenn ja, Beschreibung) _____

Augenbefund (z. B. Conjunctivitis) (wenn ja, Beschreibung) _____

Schleimhäute (wenn entzündliche Veränderungen, Beschreibung) _____

Stuhlgang (geformt, Durchfall, wässrig, blutig?) _____

Sonstige Beschwerden (allgemein, lokal) _____

2. Ärztliche Beurteilung:

Keine weitere Beobachtung erforderlich
Ambulante Überwachung empfohlen
Stationäre Abklärung und Behandlung erforderlich

3. Rücksprache mit Regionalem Strahlenschutzzentrum

- wann _____
- mit welchem _____

Ergebnis der Rücksprache:

- Durchführung weiterer ambulanter Maßnahmen _____
(an wen überwiesen?) _____
- Durchführung stationärer Maßnahmen _____
(an wen überwiesen?) _____

Ort, Datum, Uhrzeit _____

Unterschrift

Anhang B

Liste der Regionalen Strahlenschutzzentren



✦ Berufsgenossenschaftliche Unfallklinik Ludwigshafen

Regionale Strahlenschutzzentren der Berufsgenossenschaften ¹

Charité – Universitätsklinikum Berlin, Campus Benjamin Franklin Institut für Nuklearmedizin Hindenburgdamm 30 12200 Berlin	Telefon: (030) 84 45-21 71 (030) 84 45-39 92 ²
Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin Universitätsklinikum Carl Gustav Carus an der Technischen Universität Dresden Fetscherstraße 74 01307 Dresden	Telefon: (03 51) 4 58-22 26
Universitätsklinikum Greifswald Klinik für Nuklearmedizin Fleischmannstraße 42-44 17487 Greifswald	Telefon: (0 38 34) 86-6989 (0 38 34) 86-7001 ²
Asklepios-Klinik St. Georg Abt. für Nuklearmedizin Lohmühlenstraße 5 20099 Hamburg	Telefon: (040) 181 885 -23 71 (040) 181 885 -22 56 ²
Medizinische Hochschule Abt. Nuklearmedizin/Biophysik Carl-Neuberg-Str. 1 30625 Hannover	Telefon: (05 11) 5 32-20 20
Universitätskliniken des Saarlandes Abt. für Nuklearmedizin Gebäude 50 66421 Homburg/Saar	Telefon: (0 68 41) 16-2 22 01 (0 68 41) 16-2 33 05 ²

¹ Für weitere Hinweise steht auch das Institut für Strahlenschutz der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Telefon: (0221) 3778 -6231/ -6232, http://www.bgetf.de/praev/praev_strahlenschutz_strahlenschutzzentren.html zur Verfügung. Dort sind auch aktualisierte Telefonnummern zu erfragen.

² = außerhalb der üblichen Dienstzeit

Heinrich-Heine-Universität-Düsseldorf Nuklearmedizinische Klinik Leo-Brandt-Straße 52428 Jülich	Telefon: (0 24 61) 61-57 63
Forschungszentrum Karlsruhe Medizinische Abteilung Hermann-von-Helmholtz-Platz 1 76344 Eggenstein-Leopoldshafen	Telefon: (0 72 47) 82-33 33
Städtisches Klinikum München GmbH Krankenhaus München-Schwabing Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz Kölner Platz 1 80804 München	Telefon: (089) 30 68-35 00 (089) 30 68-31 23
Helmholtz Zentrum München Institut für Strahlenschutz Ingolstädter Landstr. 1 85764 Oberschleißheim	Telefon: (089) 31 87-3 33
Universitätsklinikum Würzburg Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin Haus D5 Josef-Schneider-Straße 2 97080 Würzburg	Telefon: (0931) 2 01-3 58 70 (0931) 2 01-0 ²

Stand: 03.06.2008

² = außerhalb der üblichen Dienstzeit

Anhang C

Angaben für häufig verwendete Nuklide

Tab. C1: Beispiele für Radionuklide in Form umschlossener Strahler in technischen/industriellen Anwendungen

Radionuklid	Strahlungsart	Physikalische Halbwertszeit (Jahre)	Dosisleistungskonstante für die Gammastrahlung ($Sv \cdot m^2 / (h \cdot Bq)$)	Beispiele für Anwendungen / Vorkommen	beispielhafte Anwendungsaktivitäten (Bereiche)	Inkorporation limitiert durch den Dosisgrenzwert für	Dosiskoeffizient für Inhalation (Sv/Bq)
Am-241	α, γ	4,32E+02	4,20E-15	Ionisationsrauchmelder, Flächengewichtsmessung	kBq - GBq	Knochenoberfläche	1,10E-03
Co-60	$(\beta^-), \gamma$	5,30E+00	3,40E-13	Prüfstrahler, ZFP-Strahlungsquellen, Bestrahlungsanlagen	kBq - TBq kBq - TBq $\leq 1,0E+17$ Bq	effektiv	1,70E-08
Cs-137	$(\beta^-), \gamma$	3,00E+01	8,50E-14	ZFP-Strahlungsquellen, Prüfstrahler	kBq - MBq	effektiv	6,7E-09
Ir-192	EC, γ	2,03E-01	1,20E-13	ZFP-Strahlungsquellen	GBq - TBq	effektiv	4,90E-09
Kr-85	β^-	1,06E+01	./.	Flächengewichtsmessung	MBq - GBq		
Ra-226	α, γ	1,60E+03	2,20E-13	Strahlungsquellen/Prüfstrahler, Ionisationsrauchmelder	MBq - GBq	Lunge	1,70E-05

Radionuklid	Strahlungsart	Physikalische Halbwertszeit (Jahre)	Dosisleistungskonstante für die Gammastrahlung (Sv*m ² /(h*Bq))	Beispiele für Anwendungen / Vorkommen	beispielhafte Anwendungsaktivitäten (Bereiche)	Inkorporation limitiert durch den Dosisgrenzwert für	Dosiskoeffizient für Inhalation (Sv/Bq)
Se-75	EC, γ	1,20E+02	4,80E-14	ZFP-Strahlungsquellen	GBq - TBq	effektiv	1,70E-09
Sr-90	β^-	2,85E+01	3,63E-21	Flächengewichtsmessung, Radiometrie, Isotopenbatterien	GBq - TBq	Lunge	6,30E-07
Yb-169	(EC), γ	3,20E+01	6,70E-14	ZFP-Strahlungsquellen	GBq - TBq	effektiv	2,40E-09
Pm-147	β^- , γ	2,63E+00	8,10E-19	Flächengewichtsmessungen	MBq - GBq	effektiv	3,50E-09
Po-210	α	3,78E-01	1,50E-18	Statik-Eliminatoren	GBq	Lunge	1,70E-05

Bemerkung: Bei intakten umschlossenen Strahlungsquellen ist die Gefährdung im Allgemeinen nur durch externe Exposition gegeben. Im Fall einer Beschädigung oder Zerstörung der Quelle muss mit Kontamination und daher mit folgender Inkorporation gerechnet werden. In einem solchen Fall können die alpha- oder beta-Komponenten der Strahlungsemission dosisbestimmend sein.

Tab. C2: Beispiele für Radionuklide in der nuklearmedizinischen Anwendung (als offene radioaktive Stoffe)

Radionuklid	Strahlungsart	physikalische Halbwertszeit (Tage)	Dosisleistungskonstante für die γ -Strahlung ($Sv \cdot m^2 / (h \cdot Bq)$)	Anwendung	Inkorporation limitiert durch den Dosisgrenzwert für	Dosiskoeffizient für Inhalation (Arbeitsschutz!) (Sv/Bq)	Typische Anwendungsaktivität am Patienten (MBq)
C-11	β^+	1,40E-02	1,59E-13	Diagnostik	effektiv	2,20E-12	200-370
F-18	β^+	7,60E-02	1,59E-13	Diagnostik	effektiv	9,30E-11	200-370
Co-57	EC, γ	2,70E+02	2,43E-14	Diagnostik	effektiv	6,00E-10	0,03
Ga-67	β^- , γ	3,30E+00	2,10E-14	Diagnostik	effektiv	2,80E-10	111,00
Ga-68	β^+	4,70E-02	1,51E-13	Diagnostik	effektiv	8,10E-11	50-100
Se-75	EC, γ	1,20E+02	4,80E-14	Diagnostik	effektiv	1,70E-09	0,40
Sr-89	β^- , γ	5,10E+01	1,70E-17	Therapie	rotes Knochenmark	5,40E-09	185,00
Y-90	β^-	2,70E+00	/.	Therapie	effektiv	1,70E-09	500-1.500

Radionuklid	Strahlungsart	physikalische Halbwertszeit (Tage)	Dosisleistungskonstante für die γ -Strahlung ($Sv \cdot m^2 / (h \cdot Bq)$)	Anwendung	Inkorporation limitiert durch den Dosisgrenzwert für	Dosiskoeffizient für Inhalation (Arbeitsschutz!) (Sv/Bq)	Typische Anwendungsaktivität am Patienten (MBq)
Mo-99	β^- , γ	2,70E+00	3,80E-14	Generator	effektiv	1,10E-09	20.000-100.000 ¹
Tc-99m	γ	2,50E-01	1,60E-14	Diagnostik	effektiv	2,90E-11	50-1.000
In-111	EC, γ	2,80E+00	8,70E-14	Diagnostik	effektiv	3,10E-10	50-150
I-123	EC, γ	5,50E-01	4,40E-14	Diagnostik	Schilddrüse	3,70E-09	10-150
I-124	β^+	4,20E+00	1,73E-13	Diagnostik	Schilddrüse	2,30E-07	75-200
I-125	β^- , γ	5,90E+01	3,90E-14	Therapie	Schilddrüse	2,70E-07	10
I-131	β^- , γ	8,00E+00	5,90E-14	Therapie	Schilddrüse	3,90E-07	100-10.000
Sm-153	β^- , γ	2,00E+00	1,88E-14	Therapie	effektiv	6,80E-10	1.850-3.700
Re-186	β^- , γ	3,70E+00	3,80E-15	Therapie	effektiv	1,20E-09	1.285

¹ Hierbei handelt es sich um die Gesamtaktivität des Molybdän-Technetium-Generators. Sie wird nicht am Patienten angewendet. Zur Anwendung kommt nur die beim Zerfall von Mo-99 entstandene Tc-99m Aktivität.

Radionuklid	Strahlungsart	physikalische Halbwertszeit (Tage)	Dosisleistungskonstante für die γ -Strahlung ($Sv \cdot m^2 / (h \cdot Bq)$)	Anwendung	Inkorporation limitiert durch den Dosisgrenzwert für	Dosiskoeffizient für Inhalation (Arbeitsschutz!) (Sv/Bq)	Typische Anwendungsaktivität am Patienten (MBq)
Re-188	β^- , γ	7,00E-01	8,44E-15	Therapie	effektiv	7,40E-10	3.300
Tl-201	β^- , γ	3,00E+00	1,20E-14	Diagnostik	effektiv	7,60E-11	75
Ra-224	α , γ	3,70E+00	2,29E-15	Therapie	Lunge	2,00E-05	bis 10

Hinweise:

Bei der Inkorporation diagnostisch verwendeter Radionuklide in typischer Einzelaktivität für den Patienten wird – unabhängig von der chemischen Bindung – eine effektive Dosis von 15 mSv in der Regel nicht überschritten.

Bei therapeutisch verwendeten Radionukliden ist es nicht sinnvoll, effektive Dosen zu betrachten; die Organosen können bei der Applikation der genannten Aktivitäten bis zu einigen 100 Gy betragen. Aufgrund des gezielten Einsatzes in der Therapie wird es nicht zum akuten Strahlensyndrom kommen.

Bei Transport und Beförderung von Radionukliden für Diagnostik und Therapie sowie in den Lagerräumen der Kliniken oder Praxen können höhere Aktivitäten vorhanden sein.

Die angegebenen Dosiskoeffizienten sind hinsichtlich Löslichkeitsklasse und Zufuhrweg konservativ betrachtet, da sie für eine obere Abschätzung im Falle eines Unfalls dienen sollen. Sie dienen nicht der Berechnung der Patientendosis.

Tab. C3: Beispiele für Radionuklide in der strahlentherapeutischen Anwendung (als umschlossene radioaktive Stoffe)

Radionuklid	Strahlungsart	physikalische Halbwertszeit (Tage)	Dosisleistungskonstante für die Gamma-Strahlung ($S_v \cdot m^2 / (h \cdot Bq)$)	Anwendungsbeispiele	Einzelaktivität verwendeter Strahler	beispielhafte Anwendungsaktivität am Patienten
Co-60	β^- , γ	1,93E+03	3,54E-13	Teletherapie	370 TBq	–
				man. Brachytherapie	200 MBq	2 GBq
				Remote Afterloading	700 MBq	10 GBq
Cs-137	β^- , γ	1,10E+04	9,23E-14	Teletherapie	75 GBq	–
				Augenapplikatoren Intravasculär	55 TBq	(wird kaum noch genutzt)
Sr-90/Y-90	β^- , (γ)	1,05E+04	3,63E-21	Remote Afterloading	1 GBq	–
				Intravasculär	100 MBq	1,5 GBq
Ir-192	β^- , γ	7,38E+01	1,39E-13	Remote Afterloading	370 GBq	–
				Intravasculär	20 MBq	600 MBq
				Intravasculär	70 MBq	1 GBq

Radionuklid	Strahlungsart	physikalische Halbwertszeit (Tage)	Dosisleistungskonstante für die Gamma-Strahlung ($S_v \cdot m^2 / (h \cdot Bq)$)	Anwendungsbeispiele	Einzelaktivität verwendeter Strahler	beispielhafte Anwendungsaktivität am Patienten
I-125	β^- , γ	5,94E+01	3,53E-14	Permanentimplantate	20 MBq	1,5 GBq
Pd-103	β^+ , γ	1,70E+01	1,17E-17	Permanentimplantate	60 MBq	6 GBq
Ru-106/Rh-106	β^- , γ	3,74E+02	5,34E-14	Augenapplikatoren	37 MBq	–

Tab. C4: In der Praxis wichtige Dekorporationsmittel nach G.B. Gerber, R.G. Thomas – Guidebook, 1992 [A2]

Dekorporationsmittel Wirkstoff	Anwendungsfall Radionuklide	Wirkungsart und -stärke		Medikamente, Applikation und Dosis
		Resorptions- minderung	Aus- scheidungs- intensivierung	
Aluminium- hydroxid	F, Hg, K, P, Po	Adsorption	+	Aludrox Susp. oral 6 g Gel Beutel
Aluminium- phosphat	Ba, P, Ra, Sr	Adsorption Neutralisation	+	Phosphalugel oral 13 g Gel Beutel
Ca-Phosphat	Ba, P, Ra, Sr	Adsorption	+	Tri-Ca-Phosphat (Merck) oral 1x 10 g
Ba- Sulfat	Ba, Ra, Sr	Adsorption	+ - +++	Mikropaque oral 1x 100 ml
Alginat	Ba, Ra, Sr	Adsorption	++	Gaviscon, 2 Tbl. tgl.,
Berliner Blau- Ferrihexacyano- ferrat	Cs, Th, Rb	Adsorption	++++	Radiogardase Heyl 6x 0,5 g Kps. tgl.
Mg-Sulfat	Ba, Pb, Po, Ra, Sr	Laxans	++	Bittersalz, oral 10- 30 g gelöst in 500 ml H ₂ O
Ca -Glukonat	Ca, Sr	Verdünnung	+	Ca- Sandoz, 2 Amp. 20 % per infusionem in 500 ml
K-Iodid	I-131	Verdünnung	++++	Kaliumiodatum 65 mg Tbl, tgl. ¼-1 Tbl.
Na-Perchlorat	I-131	Antithyreoid. Substanz	++	Na- Irenat 5-6 x 5 Tr. (100 mg) mit Wasser verdünnt
Ca- DTPA, Zn- DTPA	Transurane (bes. Am, Pu) Lanthaniden, Fe, Ni, Cr, Co, Pb, Zn	Komplexierung	+++	Ditripentat 1 x 1g Amp. tgl. auf 250 ml NaCl als Kurzinfus. Akut- subakut (Tage); Zinknatriumditripentat in gleicher Dosis bei Langzeit- Therapie
DMPS	Hg, Pb, Po	Komplexierung	+	Dimaval Heyl 3-4x 100mg Hartkps. tgl.
Penicillamin	Au, Cu, Co, Ga, Hg, Po, Pb	Komplexierung	+	Metalcaptase Film- tbl., 1-3x 300 mg tgl.
Na-Hydrogen- karbonat	U	Komplexierung	(+)	z. B. Fresenius 1,4% 250 ml Infusion

Verzeichnis aller Publikationen der Strahlenschutzkommission

Nach einem Verlagswechsel im Jahr 2006 sind alle Publikationen der SSK zu beziehen über den H. Hoffmann Fachverlag Berlin (Tel.: 033203/305810 bzw. Telefax: 033203/305820).

In der Reihe „*Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission*“ sind bisher erschienen:

- Band 1 Empfehlungen der Strahlenschutzkommission zu speziellen Fragen des Strahlenschutzes in den Jahren 1974-1984
1985, 279 Seiten, 31 Tabellen, ISBN 3-437-11034-9, 34,00 EUR
- Band 2 Wirkungen nach pränataler Bestrahlung
Effects of Prenatal Irradiation
1989, 2. Auflage, deutsch/englisch, 378 Seiten, 5 Abbildungen, 7 Tabellen, ISBN 3-437-11293-7, 39,95 EUR
- Band 3 Berechnungsgrundlage für die Ermittlung von Körperdosen bei äußerer Strahlenexposition durch Photonenstrahlung und Berechnungsgrundlage für die Ermittlung von Körperdosen bei äußerer Strahlenexposition durch Elektronen, insbesondere durch Beta-Strahlung
1991, 2. durchges. Auflage, 93 Seiten, 41 Abbildungen, 20 Tabellen, ISBN 3-437-11412-3, 18,00 EUR
Dieser Band wird ersetzt durch Band 43 dieser Veröffentlichungsreihe
- Band 4 Medizinische Maßnahmen bei Kernkraftwerksunfällen; Leitfaden für: Ärztliche Berater der Katastrophenschutzleitung, Ärzte in Notfallstationen, Ärzte in der ambulanten und stationären Betreuung
2007, 3., überarbeitete Auflage, 75 Seiten, 2 Abbildungen, 7 Tabellen, ISBN 978-3-87344-131-6, 15,50 EUR
- Band 5 Auswirkungen des Reaktorunfalls in Tschernobyl in der Bundesrepublik Deutschland
Empfehlungen der Strahlenschutzkommission zur Abschätzung, Begrenzung und Bewertung
1986, 93 Seiten, 1 Abbildung, 7 Tabellen, ISBN 3-437-11084-5, 13,00 EUR

- Band 5A Impact of the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident on the Federal Republic of Germany
Recommendations of the Commission on Radiological Protection: Assessment, Limitation and Valuation
1988, englisch, 98 Seiten, ISBN 3-437-11184-1, 19,95 EUR
- Band 6 Empfehlungen der Strahlenschutzkommission 1985/1986
1987, 212 Seiten, 2 Abbildungen, 27 Tabellen, ISBN 3-437-11138-8, 29,95 EUR
- Band 7 Auswirkungen des Reaktorunfalls in Tschernobyl auf die Bundesrepublik Deutschland
Aktivitätskonzentrationen in der Bundesrepublik Deutschland. Empfehlungen zur Begrenzung der Strahlenexposition. Strahlenexposition der Bevölkerung und Bewertung. Zusammenfassender Bericht der Strahlenschutzkommission 1987, 237 Seiten, 61 Abbildungen, 40 Tabellen, ISBN 3-437-11147-7, 14,50 EUR
- Band 7A Impact of the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident on the Federal Republic of Germany
1988, englisch, 237 Seiten, 61 Abbildungen, 40 Tabellen, ISBN 3-437-11241-4, 34,95 EUR
- Band 8 Zur beruflichen Strahlenexposition in der Bundesrepublik Deutschland
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 6.-8. November 1985
1988, 353 Seiten, 91 Abbildungen, 48 Tabellen, ISBN 3-437-11187-6, 29,95 EUR
- Band 9 Radionuklide in Wasser-Schwebstoff-Sediment-Systemen und Abschätzung der Strahlenexposition
1988, 300 Seiten, 83 Abbildungen, 52 Tabellen, ISBN 3-437-11196-5, 24,00 EUR
- Band 10 Empfehlungen der Strahlenschutzkommission 1987
Recommendations of the Commission on Radiological Protection 1987
1988, deutsch/englisch, 114 Seiten, 1 Abbildung, 7 Tabellen, ISBN 3-437-11233-3, 14,95 EUR
- Band 11 Strahlenschutzfragen bei Anfall und Beseitigung von radioaktiven Reststoffen
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 6./7. November 1986
1988, 223 Seiten, 60 Abbildungen, 21 Tabellen, ISBN 3-437-11238-4, 24,95 EUR

- Band 12 Aktuelle Fragen zur Bewertung des Strahlenkrebsrisikos
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 5./6. November 1987
1988, 291 Seiten, 31 Abbildungen, 41 Tabellen, ISBN 3-437-11239-2,
29,95 EUR
- Band 13 Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophen-
schutzleitung bei kerntechnischen Notfällen
1995, 2. überarbeitete Auflage, 296 Seiten, 21 Abbildungen, 37 Tabellen,
ISBN 3-437-11639-8, 44,95 EUR
*Dieser Band wird ersetzt durch die Hefte 37 und 38 der Veröffentlichungsreihe
„Berichte der Strahlenschutzkommission“*
- Band 14 Strahlenexposition und Strahlengefährdung durch Plutonium
1989, 177 Seiten, 12 Abbildungen, 23 Tabellen, ISBN 3-437-11258-9,
24,95 EUR
- Band 15 Empfehlungen der Strahlenschutzkommission 1988/1989
*Recommendations of the Commission on Radiological Protection
1988/1989*
1991, deutsch/englisch, 233 Seiten, 2 Abbildungen, 9 Tabellen, ISBN 4-347-
11278-3, 29,95 EUR
- Band 16 Nichtionisierende Strahlung
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 7.-9. Dezember 1988
1990, 421 Seiten, 71 Abbildungen, 29 Tabellen, ISBN 3-437-11279-1,
39,95 EUR
- Band 17 Modelle, Annahmen und Daten mit Erläuterungen zur Be-
rechnung der Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver
Stoffe mit Luft oder Wasser zum Nachweis der Einhaltung der
Dosisgrenzwerte nach § 45 StrlSchV
1992, 194 Seiten, 13 Abbildungen, 9 Tabellen, ISBN 3-437-11419-0,
29,95 EUR
- Band 18 Maßnahmen nach Kontamination der Haut mit radioaktiven
Stoffen
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
Manuskripte des Fachgespräches des Ausschusses „Medizin und Strahlen-
schutz“
1992, 144 Seiten, 7 Abbildungen, 12 Tabellen, ISBN 3-437-11450-6,
29,95 EUR

- Band 19 Die Exposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte in Wohnungen in der Bundesrepublik Deutschland und deren Bewertung
1992, 114 Seiten, 43 Abbildungen, 17 Tabellen, ISBN 3-437-11451-4, 29,95 EUR
- Band 20 Risiken durch ionisierende Strahlung und chemotoxische Stoffe
Quantifizierung, Vergleich, Akzeptanz
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 7./8. Dezember 1989
1992, 200 Seiten, 18 Abbildungen, 13 Tabellen, ISBN 3-437-11452-2, 29,95 EUR
- Band 21 Die Strahlenexposition durch den Bergbau in Sachsen und Thüringen und deren Bewertung
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 7.-9. November 1990
1993, 208 Seiten, 42 Abbildungen, 24 Tabellen, ISBN 3-437-11453-0, 34,95 EUR
- Band 22 Schutz vor elektromagnetischer Strahlung beim Mobilfunk
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
Manuskripte des Fachgesprächs „Mögliche gesundheitliche Auswirkungen durch die moderne Telekommunikation“
1992, 137 Seiten, 23 Abbildungen, 14 Tabellen, ISBN 3-437-11438-7, 29,95 EUR
- Band 23 Strahlenschutzgrundsätze für die Verwahrung, Nutzung oder Freigabe von kontaminierten Materialien, Gebäuden, Flächen oder Halden aus dem Uranerzbergbau
Radiological Protection Principles Concerning the Safeguard, Use or Release of Contaminated Materials, Buildings, Areas or Dumps from Uranium Mining
1992, deutsch/englisch, 198 Seiten, 4 Abbildungen, ISBN 3-437-11495-6, 34,95 EUR
- Band 24 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1990/1991
Recommendations and Statements of the Commission on Radiological Protection 1990/91
1993, deutsch/englisch, 357 Seiten, 2 Abbildungen, 6 Tabellen, ISBN 3-437-11519-7, 39,95 EUR

- Band 25** Notfallschutz und Vorsorgemaßnahmen bei kerntechnischen Unfällen
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 7./8. November 1991
1993, 347 Seiten, 112 Abbildungen, 46 Tabellen, ISBN 3-437-11520-0,
39,95 EUR
- Band 26** Strahlenschutzüberlegungen zum Messen und Bergen von radioaktiven Satellitenbruchstücken
1994, 160 Seiten, 23 Abbildungen, 14 Tabellen, ISBN 3-437-11629-0,
29,95 EUR
- Band 27** Medizinische Maßnahmen bei Strahlenunfällen
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 11.-13. November 1992
1994, 372 Seiten, 51 Abbildungen, 31 Tabellen, ISBN 3-437-11633-9,
39,95 EUR
- Band 28** Wirkungen niederfrequenter Felder
Symposium des Bundesamtes für Strahlenschutz und der Strahlenschutzkommission, 3./4. Dezember 1992
1994, 306 Seiten, 64 Abbildungen, 34 Tabellen, ISBN 3-437-11634-7,
34,95 EUR
- Band 29** Ionisierende Strahlung und Leukämieerkrankungen von Kindern und Jugendlichen
1994, 98 Seiten, 10 Abbildungen, 6 Tabellen, ISBN 3-437-11635-5, 19,95 EUR
- Band 30** Strahlenexposition in der medizinischen Diagnostik
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 18./19. Oktober 1993
1995, 462 Seiten, 80 Abbildungen, 127 Tabellen, ISBN 3-437-11659-2,
39,95 EUR
- Band 31** Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1992/1993
Recommendations and Statements of the Commission on Radiological Protection 1992/93
1997, deutsch/englisch, 324 Seiten, 5 Abbildungen, 12 Tabellen, ISBN 3-437-25406-5, 43,00 EUR
- Band 32** Der Strahlenunfall
Ein Leitfaden für Erstmaßnahmen
2008, 2. überarbeitete und aktualisierte Auflage, 151 Seiten, 18 Abbildungen, 18 Tabellen, ISBN 978-3-87344-139-2, 22,00 EUR

- Band 33 Molekulare und zelluläre Prozesse bei der Entstehung stochastischer Strahlenwirkungen
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 13./14. Oktober 1994
1995, 253 Seiten, 61 Abbildungen, 9 Tabellen, ISBN 3-437-11685-1, 39,95 EUR
- Band 34 Environmental UV-Radiation, Risk of Skin Cancer and Primary Prevention
Internationaler Kongress und Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 6.-8. Mai 1996
1996, 443 Seiten, 126 Abbildungen, 33 Tabellen, ISBN 3-437-25188-0, 54,95 EUR
- Band 35 Sicherheitsaspekte der Sonographie
Sachverständigenanhörung der Strahlenschutzkommission, 2./3. März 1995
1998, 244 Seiten, 58 Abbildungen, 27 Tabellen, ISBN 3-437-25187-2, 39,95 EUR
- Band 36 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1994
Recommendations and Statements of the Commission on Radiological Protection 1994
1997, deutsch/englisch, 210 Seiten, 4 Abbildungen, 17 Tabellen, ISBN 3-437-25189-9, 34,95 EUR
- Band 37 Aktuelle radioökologische Fragen des Strahlenschutzes
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 12./13. Oktober 1995
1998, 288 Seiten, 85 Abbildungen, 29 Tabellen, ISBN 3-437-25199-6, 44,95 EUR
- Band 38 Funkanwendungen
Technische Perspektiven, biologische Wirkungen und Schutzmaßnahmen
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 15./16. Mai 1997
1999, 272 Seiten, 18 Abbildungen, 26 Tabellen, ISBN 3-437-21458-6, 54,95 EUR
- Band 39 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1995
1998, 120 Seiten, 6 Tabellen, ISBN 3-437-21448-9, 44,95 EUR
- Band 40 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1996
1998, 100 Seiten, 3 Tabellen, ISBN 3-437-21439-X, 39,95 EUR

- Band 41 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1997
1998, 200 Seiten, 2 Abbildungen, 12 Tabellen, ISBN 3-437-21438-1, 44,95 EUR
- Band 42 Methoden, Probleme und Ergebnisse der Epidemiologie
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 13.-15. Mai 1998
1999, 258 Seiten, 36 Abbildungen, 41 Tabellen, ISBN 3-437-21459-4, 49,95 EUR
- Band 43 Berechnungsgrundlage für die Ermittlung von Körperdosen bei äußerer Strahlenexposition
2006, 2., überarbeitete Auflage, 190 Seiten, 82 Abbildungen, 12 Tabellen
ISBN 3-87344-129-2, 28,40 €
Ersetzt Band 3 dieser Veröffentlichungsreihe
- Band 44 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1998
1999, 208 Seiten, 10 Tabellen, ISBN 3-437-21449-7, 39,95 EUR
- Band 45 Bedeutung der genetischen Prädisposition und der genomischen Instabilität für die individuelle Strahlenempfindlichkeit (Konsequenzen für den Strahlenschutz)
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission, 20./21. Januar 2000
2001, 184 Seiten, 21 Abbildungen, 16 Tabellen, ISBN 3-437-21469-1, 24,95 EUR
- Band 46 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1999/2000
2002, 160 Seiten, 4 Abbildungen, 10 Tabellen, ISBN 3-437-21479-9, 19,00 EUR
- Band 47 Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten
2002, 180 Seiten, 35 Abbildungen, 8 Tabellen, ISBN 3-437-21478-0, 14,95 EUR
- Band 48 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 2001
2003, 220 Seiten, 6 Abbildungen, 16 Tabellen, ISBN 3-437-21488-8, 23,00 EUR

- Band 49 **Aktuelle und zukünftige Aufgaben in der Radioökologie**
Klausurtagung des Ausschusses "Radioökologie" der Strahlenschutzkommission, 25./26. Juli 2001
2003, 368 Seiten, 96 Abbildungen, 52 Tabellen, ISBN 3-437-21489-6, 31,25 EUR
- Band 50 **Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 2002**
2003, 182 Seiten, 35 Abbildungen, 8 Tabellen, ISBN 3-437-21498-5, 21,25 EUR
- Band 51 **Medizinische Strahlenexposition in der Diagnostik und ihre Bewertung**
Gemeinsame Klausurtagung der Strahlenschutzkommission und der Eidgenössischen Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität, 21./22. Januar 2002
2004, 144 Seiten, 24 Abbildungen, 22 Tabellen, ISBN 3-437-21499-3, 19,25 EUR
- Band 52 **Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 2003**
2005, 334 Seiten, 35 Abbildungen, 2 Tabellen, ISBN 3-437-22326-7, 28,75 EUR
- Band 53 **Vergleichende Bewertung der biologischen Wirksamkeit verschiedener ionisierender Strahlungen**
Evaluation of the Relative Biological Effectiveness of Different Types of Ionising Radiation
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung, Anhang: englische Übersetzung der Stellungnahme
2005, 222 Seiten, deutsch/englisch, 23 Abbildungen, 27 Tabellen, ISBN 3-437-22327-5, 22,75 EUR
- Band 54 **Neue Technologien: Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern**
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission am 1./2. Dezember 2003
2005, 278 Seiten, ISBN 3-437-22328-3, 26,26 EUR
- Band 55 **Realistische Ermittlung der Strahlenexposition**
Klausurtagung des Ausschusses "Radioökologie" der Strahlenschutzkommission am 25./26. September 2003
2005, 376 Seiten, 77 Abbildungen, 58 Tabellen, ISBN 3-437-22329-1, 31,50 EUR

- Band 56 Abschätzung, Bewertung und Management von Risiken
Klausurtagung des Ausschusses „Strahlenrisiko“ der Strahlenschutzkommission am 27./28. Januar 2005
2005, 284 Seiten, 15 Abbildungen, 24 Tabellen, ISBN 3-437-22336-4,
26,50 EUR
- Band 57 Neue Techniken in der Strahlendiagnostik und Strahlentherapie
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission am 11./12. November 2004
2005, 157 Seiten, 28 Abbildungen, 3 Tabellen, ISBN 3-437-22337-2,
19,75 EUR
- Band 58 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 2004
2007, 217 Seiten, 3 Abbildungen, 23 Tabellen, ISBN 987-3-87344-133-0,
22,50 EUR
- Band 59 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 2005
2007, 212 Seiten, 1 Abbildung, 5 Tabellen, ISBN 978-3-87344-137-8,
22,50 EUR
- Band 60 Notfallschutz bei Schadenslagen mit radiologischen Auswirkungen
Klausurtagung der Strahlenschutzkommission am 10./11. November 2005
2007, 317 Seiten, 45 Abbildungen, 9 Tabellen, ISBN 978-3-87344-140-8,
45,00 EUR
- Band 61 Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 2006
2007, 335 Seiten, 8 Abbildungen, 14 Tabellen, ISBN 987-3-87344-141-5,
27,50 EUR

In der Reihe „*Berichte der Strahlenschutzkommission*“ sind bisher erschienen:

- Heft 1 Die Ermittlung der durch kosmische Strahlung verursachten
Strahlenexposition des fliegenden Personals
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
1997, 2. ergänzte Auflage, 88 Seiten, ISBN 3-437-25466-9, 17,95 EUR
- Heft 2 20 Jahre Strahlenschutzkommission 1974-1994
– Eine Bilanz –
1995, 57 Seiten, ISBN 3-437-11671-1, 13,25 EUR

- Heft 3 Kriterien für die Alarmierung der Katastrophenschutzbehörde durch die Betreiber kerntechnischer Einrichtungen
Gemeinsame Empfehlung der Reaktor-Sicherheitskommission und der Strahlenschutzkommission. Mit Erläuterungen
1995, 38 Seiten, ISBN 3-437-11688-6, 10,25 EUR
Dieses Heft wird ersetzt durch Heft 39 der „Berichte der Strahlenschutzkommission“
- Heft 4 10 Jahre nach Tschernobyl
Information der Strahlenschutzkommission zu den radiologischen Auswirkungen und Konsequenzen insbesondere in Deutschland
1996, 32 Seiten, ISBN 3-437-11730-0, 13,00 EUR
- Heft 5 Atmosphärische Ausbreitung bei kerntechnischen Notfällen
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
1996, 183 Seiten, ISBN 3-437-11731-9, 23,25 EUR
- Heft 6 Konzepte und Handlungsziele für eine nachhaltige, umweltgerechte Entwicklung im Strahlenschutz in Deutschland
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
1996, 22 Seiten, ISBN 3-437-25288-7, 9,95 EUR
- Heft 7 Schutz vor niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern der Energieversorgung und –anwendung
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
1997, deutsch/englisch, 124 Seiten, ISBN 3-437-25436-7, 19,95 EUR
- Heft 8 Jahresbericht 1996 der Strahlenschutzkommission
1997, 33 Seiten, ISBN 3-437-25438-3, 14,95 EUR
- Heft 9 Interventionelle Radiologie
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
1997, 40 Seiten, ISBN 3-437-25458-8, 10,25 EUR
- Heft 10 Strahlenexposition an Arbeitsplätzen durch natürliche Radionuklide
Radiation exposure at working places by natural radionuclides
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
1997, deutsch/englisch, 48 Seiten, ISBN 3-437-21336-9, 14,95 EUR
- Heft 11 Auswirkungen der Einführung neuer Dosismessgrößen im Strahlenschutz
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
1998, 60 Seiten, ISBN 3-437-25557-6, 12,95 EUR

-
- Heft 12 Jahresbericht 1997 der Strahlenschutzkommission
1998, 56 Seiten, ISBN 3-437-25558-4, 14,95 EUR
- Heft 13 Wissenschaftliche Begründung für die Anpassung des Kapitels 4
„Berechnung der Strahlenexposition“ der Störfallberechnungs-
grundlagen für Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktor
1999, 96 Seiten, ISBN 3-437-21508-6, 17,95 EUR
- Heft 14 Empfehlungen zur Patientensicherheit bei Anwendungen der
Ultraschalldiagnostik in der Medizin
Empfehlung der Strahlenschutzkommission einschließlich wissenschaftlicher
Begründung
1998, 74 Seiten, ISBN 3-437-25559-2, 14,00 EUR
- Heft 15 Grundsätze für die Anwendung radioaktiver Stoffe oder ionisie-
render Strahlen am Menschen in der medizinischen Forschung
(Grundsätze nach § 41 StrlSchV)
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
1998, 46 Seiten, ISBN 3-437-25568-1, 12,95 EUR
- Heft 16 Freigabe von Materialien, Gebäuden und Bodenflächen mit ge-
ringfügiger Radioaktivität aus anzeige- oder genehmigungs-
pflichtigem Umgang
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
1998, deutsch/englisch, 124 Seiten, ISBN 3-437-21306-X, 19,95 EUR
- Heft 17 Radon-Statusgespräch 1998
Neuherberg, 18./19. Mai 1998
Festveranstaltung zum 70. Geburtstag von Prof. Dr. W. Jacobi
1998, 242 Seiten, ISBN 3-437-25569-X, 24,95 EUR
- Heft 18 Empfehlungen zur Vermeidung gesundheitlicher Risiken bei
Anwendung magnetischer Resonanzverfahren in der medizini-
schen Diagnostik
1998, 74 Seiten, ISBN 3-437-25579-7, 14,95 EUR
- Heft 19 UV-Strahlung und malignes Melanom
Bewertung epidemiologischer Studien von 1990-1996
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission und wissenschaftliche Be-
gründung
1998, 86 Seiten, ISBN 3-437-25599-1, 14,95 EUR
- Heft 20 Jahresbericht 1998 der Strahlenschutzkommission
1999, 60 Seiten, ISBN 3-437-25589-4, 12,95 EUR

- Heft 21 Anforderungen an die Kontaminationskontrolle beim Verlassen eines Kontrollbereiches (§ 64 Abs. 2 StrlSchV)
Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit Originalarbeiten
1999, 252 Seiten, ISBN 3-437-21507-8, 44,95 EUR
Dieses Heft wird ersetzt durch Heft 34 der „Berichte der Strahlenschutzkommission“
- Heft 22 Der Einsatz von SODAR-Geräten bei kerntechnischen Anlagen
Empfehlung der Strahlenschutzkommission und Statusbericht
1999, 170 Seiten, ISBN 3-437-21509-4, 22,95 EUR
- Heft 23 Schutz der Bevölkerung bei Exposition durch elektromagnetische Felder (bis 300 GHz)
Empfehlung der Strahlenschutzkommission und wissenschaftliche Begründung
1999, 120 Seiten, ISBN 3-437-21516-7, 19,95 EUR
- Heft 24 Radiologische Grundlagen für Entscheidungen über Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei unfallbedingten Freisetzungen von Radionukliden
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
2000, 158 Seiten, ISBN 3-437-21517-5, 22,95 EUR
- Heft 25 Jahresbericht 1999 der Strahlenschutzkommission
einschließlich eines Rückblicks auf 25 Jahre Strahlenschutzkommission
2000, 86 Seiten, ISBN 3-437-21519-1, 17,95 EUR
- Heft 26 Bestimmung der Personendosis des Begleitpersonals bei Transporten von abgebrannten Brennelementen und hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
2000, 34 Seiten, ISBN 3-437-21518-3, 12,95 EUR
- Heft 27 Jahresbericht 2000 der Strahlenschutzkommission
einschließlich CD-ROM mit dem gesamten Internet-Angebot der SSK
2001, 72 Seiten, ISBN 3-437-21519-1, 12,95 EUR
- Heft 28 Vermeidung gesundheitlicher Risiken bei Anwendung magnetischer Resonanzverfahren in der medizinischen Diagnostik
Fachgespräch vom 3. Mai 2000 in Oberschleißheim
2001, 228 Seiten, 44 Abbildungen, 23 Tabellen, ISBN 3-437-21528-0, 22,75 EUR

-
- Heft 29 Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern
Empfehlung der Strahlenschutzkommission und wissenschaftliche Begründung
2001, 74 Seiten, ISBN 3-437-21527-2, 13,75 EUR
- Heft 30 Jahresbericht 2001 der Strahlenschutzkommission
einschließlich CD-ROM mit dem gesamten Internet-Angebot der SSK
2002, 84 Seiten, ISBN 3-437-21529-9, 14,50 EUR
- Heft 31 Mammographie-Screening in Deutschland: Bewertung des Strahlenrisikos
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung
2002, 68 Seiten, 10 Abbildungen, 5 Tabellen, ISBN 3-437-21166-3, 13,50 EUR
- Heft 32 Stand der Forschung zu den "Deutschen Uranbergarbeiterstudien"
1. Fachgespräch am 7./8. Mai 2001 in Sankt Augustin
2002, 128 Seiten, 4 Abbildungen, 22 Tabellen, ISBN 3-437-22167-1, 17,50 EUR
- Heft 33 Jahresbericht 2002 der Strahlenschutzkommission
einschließlich CD-ROM mit dem gesamten Internet-Angebot der SSK
2003, 84 Seiten, 2 Abbildungen, ISBN 3-437-22168-X, 15,75 EUR
- Heft 34 Anforderungen an die Kontaminationskontrolle beim Verlassen eines Kontrollbereiches (§ 44 StrlSchV)
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
2003, 82 Seiten, 3 Abbildungen, 6 Tabellen, ISBN 3-437-22169-8, 14,75 EUR
Dieses Heft ersetzt Heft 21 der „Berichte der Strahlenschutzkommission“
- Heft 35 Ermittlung der durch kosmische Strahlung verursachten Strahlenexposition des fliegenden Personals
Vorschlag zur Umsetzung des § 103 StrlSchV
Empfehlung der Strahlenschutzkommission und wissenschaftliche Begründung
2003, 64 Seiten, 12 Abbildungen, 1 Tabelle, ISBN 3-437-22176-0, 13,00 EUR
- Heft 36 Empfehlungen zur sicheren Anwendung magnetischer Resonanzverfahren in der medizinischen Diagnostik
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
2003, 64 Seiten, 5 Abbildungen, 2 Tabellen, ISBN 3-437-22177-9, 13,00 EUR

- Heft 37 Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen
2004, 154 Seiten, 59 Abbildungen, 45 Tabellen, ISBN 3-437-22178-7, 19,75 EUR
Dieses Heft ersetzt im Zusammenhang mit Heft 38 dieser Veröffentlichungsreihe den Band 13 der „Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission“
- Heft 38 Erläuterungsbericht zum Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen
- Begründungen, Modelle, Daten und Programme -
2004, 162 Seiten, 19 Abbildungen, 79 Tabellen, ISBN 3-437-22179-5, 19,75 EUR
Dieses Heft ersetzt im Zusammenhang mit Heft 37 dieser Veröffentlichungsreihe den Band 13 der „Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission“
- Heft 39 Kriterien für die Alarmierung der Katastrophenschutzbehörde durch die Betreiber kerntechnischer Einrichtungen
2004, 42 Seiten, 1 Abbildung, 16 Tabellen, ISBN 3-437-22186-8, 10,50 EUR
Dieses Heft ersetzt Heft 3 der „Berichte der Strahlenschutzkommission“
- Heft 40 Jahresbericht 2003 der Strahlenschutzkommission
einschließlich CD-ROM mit dem gesamten Internet-Angebot der SSK
2004, 82 Seiten, ISBN 3-47-22187-6, 15,75 EUR
- Heft 41 Elektromagnetische Felder neuer Technologien
Empfehlung der Strahlenschutzkommission zum Schutz der Bevölkerung und Statusbericht der Strahlenschutzkommission
2004, 56 Seiten, 1 Tabelle, ISBN 3-437-22188-4, 12,25 EUR
- Heft 42 Brustkrebs- und Zervixkarzinom-Screening
Stand der Forschung, Strategien, Kontroversen
9. Fakultätskolloquium, Fakultät für Gesundheitswissenschaften, Universität Bielefeld, in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe „Mammographie-Screening“ der Strahlenschutzkommission, 6.-7. April 2001
2004, 156 Seiten, 15 Abbildungen, 9 Tabellen, ISBN 3-437-22189-2, 18,50 EUR

- Heft 43 Strahlenexposition durch Radon-222, Blei-210 und Polonium-210 im Trinkwasser
Empfehlung / Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
2004, 74 Seiten, 11 Abbildungen, 13 Tabellen, ISBN 3-437-22196-5, 14,00 EUR
- Heft 44 Störfallberechnungsgrundlagen zu § 49 StrlSchV, Neufassung des Kapitels 4: Berechnung der Strahlenexposition
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
2004, 60 Seiten, 6 Abbildungen, 16 Tabellen, ISBN 3-437-22197-3, 12,25 EUR
Ersetzt Heft 13 dieser Veröffentlichungsreihe
- Heft 45 Vergleich deutscher Freigabekriterien mit denen anderer Länder am Beispiel ausgewählter Radionuklide
Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
2005, 78 Seiten, 2 Abbildungen, 16 Tabellen, ISBN 3-437-22198-1, 14,50 EUR
- Heft 46 Grundsätze und Methoden zur Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten für die Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivität von Rückständen
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
2005, 164 Seiten, 35 Abbildungen, 37 Tabellen, ISBN 3-437-22199-X, 20,00 EUR
- Heft 47 Jahresbericht 2004 der Strahlenschutzkommission
einschließlich CD-ROM mit dem gesamten Internet-Angebot der SSK
2005, 122 Seiten, ISBN 3-437-22216-3, 18,00 EUR
- Heft 48 Strahlenschutz für das ungeborene Kind
Empfehlung der Strahlenschutzkommission und wissenschaftliche Begründung
2006, deutsch/englisch, 93 Seiten, 2 Abbildungen, 14 Tabellen, ISBN 3-87344-128-4, 14,50 EUR
- Heft 49 Jahresbericht 2005 der Strahlenschutzkommission
einschließlich CD-ROM mit dem gesamten Internet-Angebot der SSK
2006, 104 Seiten, 2 Abbildungen, ISBN 3-87344-126-8, 16,00 EUR
- Heft 50 20 Jahre nach Tschernobyl – Eine Bilanz aus Sicht des Strahlenschutzes
20 Years after Chernobyl – A Radiation Protection Perspective
2006, 224 Seiten, 40 Abbildungen, 15 Tabellen, ISBN 3-87344-127-6, 24,00 EUR

- Heft 51 **Orientierungshilfe für radiologische und nuklearmedizinische Untersuchungen**
2006, 120 Seiten, 2 Tabellen, ISBN 3-87344-130-6, 10,00 EUR
- Heft 52 **Strahlenschutz in der Röntgentherapie**
Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit Anhang „Richtlinie Fachkunde und Kenntnisse im Strahlenschutz bei dem Betrieb von Röntgeneinrichtungen in der Medizin oder Zahnmedizin vom 22. Dezember 2005“
2007, 71 Seiten, 2 Tabellen, ISBN 3-87344-132-2, 16,50 EUR
- Heft 53 **Jahresbericht 2006 der Strahlenschutzkommission**
2007, 104 Seiten, ISBN 978-3-87344-136-1, 10,00 EUR
- Heft 53CD **Jahresbericht 2006 der Strahlenschutzkommission**
2007, CD-ROM, ISBN 978-3-87344-138-5, 10,00 €
- Heft 54 **Freigabe von Stoffen zur Beseitigung**
2007, 58 Seiten, 2 Abbildungen, 3 Tabellen, ISBN 978-3-87344-135-4, 11,50 EUR

In der Reihe „*Informationen der Strahlenschutzkommission*“ sind bisher erschienen:

- Nummer 1 **Strahlenunfall**
Ein Leitfaden für Erstmaßnahmen, Kurzfassung
2007, 2., überarbeitete Auflage, 54 Seiten, 9 Abbildungen, 11 Tabellen
- Nummer 2 **Verzeichnis aller Publikationen der Strahlenschutzkommission**
Mit Kurzbeschreibung der einzelnen Veröffentlichungen
2004, 66 Seiten
- Nummer 3 **The German Commission on Radiological Protection**
Objectives, Recommendations and Statements
In Überarbeitung
- Nummer 4 **Schutz des Menschen vor solarer UV-Strahlung**
Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1995-1997
1998, 120 Seiten

- Nummer 5 **Strahlenschutz und Strahlenbelastung im Zusammenhang mit
Polizeieinsätzen anlässlich von CASTOR-Transporten**
Stellungnahmen und Empfehlungen der Strahlenschutzkommission sowie
Erläuterungen zum Strahlenrisiko
1998, 60 Seiten
- Nummer 6 **Schutz des Menschen vor den Gefahren der UV-Strahlung in
Solarien**
Empfehlung der Strahlenschutzkommission einschließlich wissenschaft-
licher Begründung
2001, 60 Seiten

Als gemeinsame Veröffentlichung des Bundesamtes für Strahlenschutz und
der Strahlenschutzkommission ist erschienen:

Zehn Jahre nach Tschernobyl, eine Bilanz

Seminar des Bundesamtes für Strahlenschutz und der Strahlenschutzkommission, Mün-
chen, 6./7. März 1996

Herausgegeben von Prof. Dr. A. Bayer, Prof. Dr. A. Kaul und Prof. Dr. Chr. Reiners
1996, 594 Seiten, ISBN 3-437-25198-8, 54,95 EUR

Dezimale Vielfache und Teile von Einheiten

Faktor	Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor	Vorsatz	Vorsatzzeichen
10^{-18}	Atto	a	10^3	Kilo	k
10^{-15}	Femto	f	10^6	Mega	M
10^{-12}	Piko	p	10^9	Giga	G
10^{-9}	Nano	n	10^{12}	Tera	T
10^{-6}	Mikro	μ	10^{15}	Peta	P
10^{-3}	Milli	m	10^{18}	Exa	E

In der Reihe *Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission (SSK)* sind zuletzt erschienen:

Band 4

Medizinische Maßnahmen bei Kernkraftwerksunfällen

2007, 3., überarbeitete Auflage,
75 Seiten, 2 Abbildungen, 7 Tabellen,
ISBN 978-3-87344-131-6, 15,50 EUR

Band 43

Berechnungsgrundlage für die Ermittlung von Körperdosen bei äußerer Strahlenexposition

2006, 2., überarbeitete Auflage, 188 Seiten,
82 Abbildungen, 12 Tabellen, ersetzt Band 3
dieser Veröffentlichungsreihe
ISBN 3-87344-129-2, 28,40 EUR

Band 52

Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 2003

2005, 334 Seiten, 35 Abbildungen, 2 Tabellen,
ISBN 3-437-22326-7, 28,75 EUR

Band 53

Vergleichende Bewertung der biologischen Wirksamkeit verschiedener ionisierender Strahlungen

Stellungnahme der
Strahlenschutzkommission mit
wissenschaftlicher Begründung
2005, 222 Seiten, 23 Abbildungen, 27 Tabellen,
ISBN 3-437-22327-5, 22,75 EUR

Band 54

Neue Technologien: Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern

Klausurtagung der
Strahlenschutzkommission am
1./2. Dezember 2003
2005, 285 Seiten, 78 Abbildungen, 10 Tabellen,
ISBN 3-437-22328-3, 26,25 EUR

Band 55

Realistische Ermittlung der Strahlenexposition

Klausurtagung des Ausschusses
„Radioökologie“ der
Strahlenschutzkommission,
25./26. November 2003
2005, 376 Seiten, 77 Abbildungen, 58 Tabellen,
ISBN 3-437-22329-1, 31,50 EUR

Band 56

Abschätzung, Bewertung und Management von Risiken

Klausurtagung des Ausschusses
„Strahlenrisiko“ der
Strahlenschutzkommission,
27./28. Januar 2005
2005, 284 Seiten, 15 Abbildungen, 24 Tabellen,
ISBN 3-437-22336-4, 26,50 EUR

Band 57

Neue Techniken in der Strahlendiagnostik und Strahlentherapie

Klausurtagung der
Strahlenschutzkommission,
11./12. November 2004
2005, 157 Seiten, 28 Abbildungen, 3 Tabellen,
ISBN 3-437-22337-2, 19,75 EUR

Band 58

Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 2004

2007, 218 Seiten, 3 Abbildungen, 23 Tabellen,
ISBN 978-3-87344-133-0, 22,50 EUR

Band 59

Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 2005

2007, 212 Seiten, 1 Abbildung, 5 Tabellen,
ISBN 978-3-87344-137-8, 22,50 EUR

Band 60

Notfallschutz bei Schadenslagen mit radiologischen Auswirkungen

Klausurtagung der
Strahlenschutzkommission am
10./11. November 2005
2007, 317 Seiten, 45 Abbildung, 9 Tabellen,
ISBN 978-3-87344-140-8, 45,00 EUR

Band 61

Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 2006

2007, 335 Seiten, 8 Abbildung, 14 Tabellen,
ISBN 987-3-87344-141-5, 27,50 EUR

Eine stets aktuelle Liste der SSK-Publikationen ist auch im Internet-Angebot der Strahlenschutzkommission enthalten (www.ssk.de)

ISBN 978-3-87344-139-2

ISSN 0179-2075