

KARL RUDOLF SCHMIDT

NUTZENERGIE AUS ATOMKERNEN • BAND II

NUTZENERGIE AUS ATOMKERNEN

EINFÜHRUNG

IN PHYSIK UND TECHNIK VON KERNREAKTOR UND ATOMKRAFTWERK

Von

Dr. KARL RUDOLF SCHMIDT

Dipl.-Physiker

Mit Beiträgen von

Dipl.-Chem. HANS GÜNTER HEITMANN · Dipl.-Ing. BERND LOGERMANN

RA. Dr. jur. LUDWIG SCHREIER

BAND II

mit 510 z.T. farbigen Abbildungen und Figuren

sowie 1 Falttafel



WALTER DE GRUYTER & CO.

**vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung · J. Guttentag, Verlags-
buchhandlung · Georg Reimer · Karl J. Trübner · Veit & Comp.**

Berlin 1960

© Copyright 1960 by Walter de Gruyter & Co., vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung
J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung — Georg Reimer — Karl J. Trübner — Veit & Comp.,
Berlin W 35, Genthiner Straße 13

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der photomechanischen Wiedergabe,
der Herstellung von Mikrofilmen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany. — Archiv-Nr. 52 112 60

Satz: Walter de Gruyter & Co., Berlin W 35 · Druck: Franz Spiller, Berlin SO 36

Inhaltsübersicht zu Band I

	Seite
Vorwort zu Band I und II in Band I	V
A. Einleitung	1
I. Atom- und Kernphysik	1
B. Grundlagen der Kernphysik	5
II. Die Elementarteilchen	7
III. Die allgemeinen Eigenschaften des Atomkerns	15
IV. Die Radioaktivität	28
V. Kernreaktionen	41
VI. Der Aufbau der Atomkerne	56
VII. Besondere endotherme und exotherme Kernreaktionen	58
VIII. Die Kettenreaktion	80
C. Kernreaktoren	93
IX. Aufbau von Kernreaktoren	93
X. Elementare Reaktortheorie (stationärer Zustand des Reaktors)	99
a) Reaktorordnung unendlicher Ausdehnung	107
b) Reaktorordnung endlicher Ausdehnung	130
c) Der homogene Reaktor mit thermischer Spaltung	149
d) Der heterogene Reaktor mit thermischer Spaltung	168
e) Experimentelle Ermittlung der kritischen Größe heterogener und homogener, langsamer und schneller Reaktoren	182
f) Anwendung der Theorie auf verschiedene heterogene thermische Reaktortypen	187
g) Verbrauch von spaltbarer Substanz, Entstehung von neuer Spaltsubstanz, das Breeding	197
D. Werkstoffe und Betriebsmittel	216
XI. Eigenschaften	216
XII. Verwendung von Werkstoffen und Betriebsmitteln	339
E. Die Wärmekraftanlage [B. Logermann, W. Mayer, K. R. Schmidt]	361
XIII. Übertragung, Abführung und Ausnutzung der erzeugten Wärme	361
XIV. Apparate und Maschinen	406
XV. Thermodynamik des Gesamtprozesses	462
F. Spezielle chemische Probleme [H. G. Heitmann]	512
XVI. Atombau und periodisches System der Elemente	512
XVII. Chemie der Aktiniden	519
XVIII. Aufbereitung der spaltbaren Füllung	554

Inhaltsübersicht zu Band II

	Seite
G. Strahlenauswirkungen, Gesundheitsschutz	595
XIX. Allgemeines	596
§ 96. Strahlungs-Maßeinheiten	596
§ 97. Auswirkung von Strahlenschädigungen	600
§ 98. Höchst zulässige Bestrahlungsdosen	611
XX. Radioaktive Verseuchung von Atmosphäre und Erdoberfläche	624
§ 99. Wetter- und Klimabeeinflussung	624
§ 100. Radioaktive Verseuchung	629
§ 101. Allgemeine Überwachungs- und Schutzmaßnahmen	634
XXI. Kernreaktor und Atomkraftwerk im Betrieb	637
§ 102. Überwachungs- und Schutzmaßnahmen	637
§ 103. Beseitigung radioaktiver Abfälle	647
XXII. Katastrophenschutz	656
§ 104. Nahauswirkungen einer ungesteuerten Kettenreaktion	656
§ 105. Verhalten beim Ablauf einer ungesteuerten Kettenreaktion	657
H. Die Strahlenabschirmung	660
XXIII. Grundlagen	660
§ 106. Wirksame Absorptionsprozesse	660
§ 107. Einfluß von Geometrieverhältnissen und Build-up-Faktor bei γ -Strahlen	666
§ 108. Wirkungsquerschnitte gegenüber γ -Strahlen	671
§ 109. Streuung von γ -Strahlen	682
§ 110. Abschirmung von Neutronen	685
XXIV. Reaktorabschirmung	688
§ 111. Kombiniertes γ - und Neutronenschutz	688
§ 112. Abschirmung eines Reaktors	689
§ 113. Abschirmmaterialien	696
§ 114. Temperaturen in der Abschirmung	706
I. Regelungstechnik	709
XXV. Reaktorkinetik	709
a) Das Kurz- und Langzeitverhalten eines thermischen Reaktors.	709
§ 115. Kurzzeitverhalten ohne Berücksichtigung der verzögerten Neutronen	709
§ 116. Kurzzeitverhalten unter Berücksichtigung der verzögerten Neutronen	712
§ 117. Das Langzeitverhalten	721
b) Reaktivität und Kühlung bei thermischen Reaktoren	729
§ 118. Zeitlich nichtlineares Reaktorverhalten	731
§ 119. Räumlich nichtlineares Reaktorverhalten	732
§ 120. Nichtlineares Verhalten beim prompt kritischen Reaktor	734
§ 121. Temperaturanstieg bei Ausfall der Kühlung	735
XXVI. Die Regelung eines Kernreaktors	743
§ 122. Regelmethode und Sicherungen, das Anfahren	743
§ 123. Meßgeräte, Regler, Warte	756
§ 124. Abnahme der Regelimpulse, Regelschaltbilder	779

	Seite
XXVII. Regelung eines Atomkraftwerkes	790
§ 125. Regelung der Dampferzeuger	790
§ 126. Turbinen- und Generatorregelung.	794
§ 127. Gesamtregelung eines Blockes	797
J. Anderweitige Spezial- und chemische Verfahrenstechnik	802
XXVIII. Nachträge zur Sondertechnik	802
§ 128. Spezialpumpen [B. Logermann]	802
§ 129. Armaturen [B. Logermann]	812
§ 130. Meßgeräte für flüssige Metalle [B. Logermann].	824
§ 131. Reaktorfüllungen und Füllelemente.	827
XXIX. Spezielle chemische Betriebsfragen. [H. G. Heitmann]	853
§ 132. Rekombination von Zersetzungsprodukten des Wassers	853
§ 133. Wasserprobleme	855
§ 134. Behandlung und Lagerung von spaltbarem und stark radioaktivem Material.	864
§ 135. Einrichtung eines Laboratoriums für Wasser-, Werkstoff- und radio- aktive Chemie	873
§ 136. Chemische Betriebsüberwachung	881
K. Kombinationstechnik bei Kernenergieanlagen	885
XXX. Auswahlgesichtspunkte für Kraftwerksreaktoren.	885
§ 137. Allgemeine Gesichtspunkte und Überblick	885
§ 138. Der Homogenreaktor	904
§ 139. Der Druckwasserreaktor.	911
§ 140. Der Boiling Water Reaktor	918
§ 141. Thermische, fremdgekühlte Graphit- und Berylliumreaktoren	934
§ 142. Schnelle Reaktoren mit Fremdkühlung	961
§ 143. Eigengekühlte Reaktoren mit einer geschmolzenen Metallfüllung	973
XXXI. Anlagentechnik bei Kernkraftwerken.	981
§ 144. Standort und Lage	981
§ 145. Äußere Gestaltung	986
§ 146. Projektierung und Aufbau.	1002
XXXII. Anlagen für Sonderzwecke	1004
§ 147. Reaktoren für den Fahrzeugantrieb.	1004
§ 148. Versuchs- und Sonderzweck-Reaktoren	1018
L. Rohstoff-Fragen	1045
XXXIII. Die Energievorräte der Erde	1045
§ 149. Kohle, Wasser, Öl und Gas	1045
§ 150. Uran und Thorium, Vorräte und Lagerstätten	1057
XXXIV. Aufbereitung und Reindarstellung von Erzen [H. G. Heitmann]	1061
§ 151. Uran	1061
§ 152. Thorium	1073
M. Wirtschaftlichkeit und Rechtslage	1078
XXXV. Kosten und Rentabilität	1078
§ 153. Stromerzeugungskosten bei herkömmlichen Dampfkraftwerken.	1081
§ 154. Stromerzeugungskosten bei Kernkraftwerken.	1087
XXXVI. Organisatorisches und Rechtslage [L. Schreier und K. R. Schmidt].	1093
§ 155. Deutschland	1093
§ 156. Andere Länder.	1114
Anhang I Die gebauten und geplanten Kernreaktoren	1135
II Geschichtlicher Überblick.	1254
III Fachbücher, Quellen.	1257
Gesamtregister für Band I und Band II	1287
I Kennbuchstaben	1287
II Namenverzeichnis	1293
III Sachverzeichnis	1296
IV Berichtigungen	1337

G. Strahlenauswirkungen, Gesundheitsschutz¹⁾

Kaum ein im Rahmen dieser Arbeit behandeltes oder angeschnittenes Thema hat in den letzten Jahren eine so breite Diskussion in der Öffentlichkeit hervorgerufen wie die Frage der Strahlungsauswirkungen und des Gesundheitsschutzes. Die Beiträge hierzu stammen von allen nur denkbaren Stellen und aus allen Kreisen der Bevölkerung, von berufenen Fachleuten der verschiedensten Disziplinen bis zum Rats- und Interessenvertreter der kleinsten Gemeinde. Die Gefahr, daß das Thema zerredet wird, daß sich die Diskussion somit ins Uferlose verliert, und daß selbst ein Fachmann die Übersicht verlieren könnte, ist nicht mehr von der Hand zu weisen, zumal die Argumente aus allen Bereichen des Wissens beigesteuert werden. Ein besonderes Unglück bedeutet dabei die Verquickung der bei den Atomkernbomben-Versuchsexplosionen entstehenden mit den bei der Nutzenergiegewinnung aus Atomkernen resultierenden Folgen. Darüber hinaus spielt aber auch die diagnostische und therapeutische Anwendung ionisierender Strahlen eine in den Betrachtungen meist übersehene bzw. nicht hinreichend bedeutungsvoll eingeschätzte Rolle. Immer mehr verschärften Maßstäben auf der einen Seite steht auf der anderen teilweise ein nicht mehr zu billigender und in den Diskussionen stillschweigend übergangener übermäßiger Gebrauch ionisierender Strahlen, z. B. bei den Durchleuchtungsgeräten für die Anpassung von Schuhen, gegenüber, die vom einzelnen immer wieder und in einem bei weitem nicht mehr vertretbarem Maße benutzt werden. In Anbetracht dieser Lage geht das Bestreben in den nachfolgenden Kapiteln nicht nur dahin, den Sachverhalt klar aufzuzeigen; darüber hinaus sollen auch die Größenordnungen der verschiedenen Anteile der Strahlenbelastung miteinander verglichen werden.

¹⁾ Hinweis auf: Schriftenreihe des Bundesministers für Atomfragen, Bad Godesberg:

„Strahlenschutz“ Heft 1: „Wissenschaftliche Referate und Berichte der zweiten Tagung der Strahlenschutzärzte des Deutschen Roten Kreuzes, Bonn 28.—30. 11. 1956“, Bergisch Gladbach (1957).

„Strahlenschutz“ Heft 2: „Die biologischen Wirkungen ionisierender Strahlen“, Übersetzung einer Studie der National Academy of Sciences (1956), mit dem Titel „The biological effects of atomic radiation“, Bonn (1957). Siehe auch *Science* **123**, 1157 (1956).

„Strahlenschutz“ Heft 3: „Strahlenwirkung auf menschliche Erbanlagen“, Übersetzung des Berichtes von der Kopenhagener Tagung der internationalen Studiengruppe der Weltgesundheitsorganisation vom 7.—11. 8. 1956, Leer (1957).

„Strahlenschutz“, Heft 5: „Deutsche Atomkommission Fachkommission IV Referatesammlung“, Braunschweig (1958).

Deutsches Rotes Kreuz und Interparlamentarische Arbeitsgemeinschaft (Herausgeber): „Die Strahlengefährdung des Menschen“, Koblenz (1957), Übersetzung des Berichtes des britischen Medical Research Council: „The hazards to man of nuclear and allied radiations“, London, Her Majesty's Stationary Office (1956); siehe auch *Science* **124**, 112 (1956).

British J. of Radiology, Suppl. 6, London (1955) und deutsche Übersetzung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig in Zusammenarbeit mit dem MPI für Biophysik, Frankfurt/Main (1956).

H. Langendorf: Atomkernenergie **1**, 135 (1956); „Symposium über die Grundlagen des Strahlenschutzes in Frankfurt/Main“, Karlsruhe (1957); „General health physics: information bibliography“, IGRL — IB/R — 21 (1957);

XIX. Allgemeines

§ 96. Strahlungs-Maßeinheiten¹⁾

In Paragraph 16 wurden bereits verschiedene Einheiten der Radioaktivität eingeführt. Die Zusammenfassung aller in Kernphysik und Radiologie gebräuchlichen Maßeinheiten soll jedoch erst an dieser Stelle erfolgen. Als Maß für eine vorhandene Radioaktivität, für eine vorhandene Menge an radioaktivem Material, wird die Anzahl der pro Zeiteinheit zerfallenden Atome (Zerfallsakte²⁾ und daraus resultierende Zerfallsteilchen) verwendet. Gemäß Paragraph 16 und Tabelle IV, 2 entspricht

$$1 \text{ Curie (C)} = 3,700 \cdot 10^{10} \text{ Teilchen/s } ^3),$$

$$1 \text{ Rutherford (rd)} = 10^6 \text{ Teilchen/s.}$$

Die Aktivität von Gasen wird manchmal in der Radiumtherapie in der Einheit Stat (St) bzw. der Untereinheit Millistat (mSt) angegeben. 1 Stat ist diejenige Menge an reiner Radiumemanation (also ohne Zerfallsprodukte), die in Normalluft sekundlich eine absolute elektrostatische Einheit an Ionen beider Vorzeichen erzeugt. Das kommt bei voller Ausschöpfung der Teilchenenergie einem Ionenstrom von $3,3 \cdot 10^{-10}$ Ampère gleich. Es entspricht

$$1 \text{ St} = 3,64 \cdot 10^{-7} \text{ C.}$$

Die Konzentration radioaktiver Gase (z. B. Radiumemanation) in Wasser oder Luft gibt man in Mache-Einheiten (M. E.) oder Eman an. Eine Mache-Einheit ist mit der Lösung von 1 Millistat Radiumemanation in 1 Liter Luft oder Wasser äquivalent. Es entspricht

$$1 \text{ M. E.} = 3,64 \cdot 10^{-10} \text{ C/Liter,}$$

$$1 \text{ Eman} = 10^{-10} \text{ C/Liter.}$$

Bei reiner γ -Strahlung⁴⁾ wird die Aktivität auch häufig durch die Strahlungsintensität in einem bestimmten Abstand von einer Strahlungsquelle, also ohne Bezugnahme auf die Zerfallsmenge, angegeben. Hierfür wurde vom National Bureau of Standards die Einheit rhm vorgeschlagen. 1 rhm ist diejenige Ionisierungsintensität, die, in 1 m Entfernung von der Quelle gemessen, ein Röntgen pro Stunde beträgt⁵⁾; anders ausgedrückt: Eine Angabe in rhm besagt direkt, wie viele Röntgeneinheiten (r) stündlich in 1 m Abstand von der Quelle erzeugt werden.

H. J. Melching: „Der Einfluß ionisierender Strahlen auf den menschlichen Organismus und die Möglichkeiten eines Strahlenschutzes“, ETZ-A 78, 36 (1957), Nr. 2; R. J. Sherwood und H. J. Dunster (Herausgeber): „A short course in radiological protection by the Health Physics Division and Isotope School“, AERE HP/L-23; „Aussprache über Atomgefahren“, Phys. Bl. 13, 361 (1957), 14, 26 (1958); 2. Sonderheft der Zeitschrift Medizinische Klinik, Nr. 34 (1957). Grundlegende deutsche Werke: B. Rajewsky: „Strahlendosis und Strahlenwirkung“, 2. Auflage, Stuttgart (1956); B. Rajewsky und H. Schön: „Biophysik“. 2 Tle. Wiesbaden (1949).

¹⁾ Hinweis auf R. G. Jaeger: „Die Einheiten der Strahlendosimetrie und ihrer Zusammenhänge“, Atomkernenergie 3, 21 (1958), Nr. 1.

²⁾ Englisch: Desintegration.

³⁾ Neuerdings ist „c“ statt „C“ als Abkürzung für die Einheit Curie vorgeschlagen, c soll r (für Röntgen) entsprechen.

⁴⁾ Angaben über die Dosimetrie bei γ -Strahlen finden sich z. B. bei Laughlin u. a.: A/Conf 8/P 70.

⁵⁾ Gemäß NU 2, 44 (1948), Nr. 10 entspricht etwa

1 rhm	20	3,4	2,2	1,8	1,3	1,1	0,85	0,71	[Curie]
Bei einer γ -Energie von . . .	0,2	0,5	0,8	1	1,5	2	3	4	[MeV]

Dabei ist angenommen, daß je Zerfallsakt nur ein γ -Quant frei wird. Siehe auch Luise Meyer-Schützmeister: Naturw. 87, 501 (1950).

Außer in der Einheit rhm erfolgt die Angabe der Stärke von (punktförmigen) Strahlungsquellen auch häufig in erg, Watt oder MeV pro Zeiteinheit.

Die bisher aufgeführten Einheiten dienen zur Messung der Radioaktivität, also der Anzahl der pro Zeiteinheit zerfallenden Atome bzw. auftretenden Zerfallsteilchen. Für die biologischen Auswirkungen einer Strahlung hingegen sind andere Maßgrößen besser geeignet. Der Effekt, der an irgendeiner Stelle, z. B. in einem Organismus, durch eine Strahlung bewirkt wird, ist von der an dieser Stelle pro Volumen- oder Masseneinheit absorbierten Energie, also von der spezifischen Energieabsorption, abhängig, die man als Strahlungs- oder Strahlendosis bezeichnet. Die gebräuchlichste biologische Einheit ist das Röntgen¹⁾. Gemäß Paragraph 16 entspricht²⁾

$$1 \text{ r} = 83,7 \text{ erg/Gramm Normalluft} = 6,77 \cdot 10^4 \text{ MeV/cm}^3 \text{ Normalluft}^3).$$

Die Röntgeneinheit geht in ihrer ursprünglichen Definition auf den Energieverlust einer γ -Strahlung in Luft⁴⁾ zurück. Der Energieverlust in irgendeiner Substanz ist aber von der Natur des Stoffes abhängig und darum von Stoff zu Stoff verschieden. Z. B. entspricht

$$\text{in Wasser oder Gewebe: } 1 \text{ r} = 93 \text{ erg/g,}$$

$$\text{in Knochensubstanz: } 1 \text{ r} = 150 \text{ erg/g.}$$

Außerdem ist die Röntgeneinheit streng genommen nur für Photonenstrahlung, und zwar nur bis zu etwa 3 MeV Quantenenergie, verwendbar, da oberhalb dieses Wertes Meßschwierigkeiten auftreten. Daher strebt man neuerdings für sämtliche Strahlenarten die Verwendung der Einheit rad (radiation absorption dose) an, und man definiert als absolute Dosis einer beliebigen ionisierenden Strahlung diejenige Energiemenge, die durch die ionisierenden Teilchen pro Masseneinheit bestrahlten Materials an der betrachteten Stelle abgegeben wird. Für jede einzelne Substanz entspricht

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g.}$$

Neben der Einheit rad⁵⁾ ist als Maß für die Menge einer ionisierenden Strahlung die Einheit rep (röntgen equivalent physical) gebräuchlich, deren Definition in gleicher Weise wie die der Einheit rad auf die spezifische Energieabsorption zurückgeht. Gemäß der ursprünglichen Definition entsprach

$$1 \text{ rep} = 83 \text{ erg/cm}^3 \text{ Gewebe.}$$

Seit 1953 gilt die auch in dieser Arbeit ausschließlich verwendete Beziehung

$$1 \text{ rep} = 93 \text{ erg/g Gewebe.}$$

Ein rep ist also in etwa diejenige Strahlendosis, die in einer bestimmten Substanz (Gewebe) die gleiche Energieabsorption hervorruft wie ein Röntgen in einem Gramm Luft vom Normalzustand ($1 \text{ r} \approx 1 \text{ rep}$).

¹⁾ Auf die älteren Einheiten soll nicht eingegangen werden. Die Umrechnungswerte sind stark energieabhängig. Als grober Maßstab sei angegeben:

$$\begin{array}{lll} 1 \text{ R} \approx 1,066 \text{ r;} & 1 \text{ F} \approx 1 \text{ bis } 4 \text{ r;} & 1 \text{ X} \approx 25 \text{ r;} \\ 1 \text{ H} \approx 50 \text{ r;} & 1 \text{ S.-N.} \approx 250 \text{ r.} & \end{array}$$

²⁾ Siehe auch Gleichung (XXIII/8) und (XXIII/9) sowie **Abb. XXIII, 3.**

³⁾ Trockene Luft bei 0° C, unter 760 mm Quecksilberdruck, $e = 0,001293 \text{ g/cm}^3$.

⁴⁾ Hinweis auf Failla: "Dosimetry of ionizing particles", A/Conf 8/P 71.

⁵⁾ Für Luft ist 1 r äquivalent mit 0,88 rad. für weiches Körpergewebe mit etwa 0,98 rad.

Für schnelle Neutronen¹⁾ ist die Einheit 1 n gebräuchlich. 1 n ist diejenige Quantität schneller Neutronen, die in einer 100 r-Victoreen-Ionisationskammer²⁾ die gleiche Ionisation erzeugt wie 1 r Photonen-Strahlung³⁾. Es entspricht in weichem Gewebe

$$1 n \approx 2 \text{ bis } 2,5 \text{ rep} \approx 190 \text{ erg/g.}$$

Ein Maß für die rein biologischen Auswirkungen einer Strahlung ist das rem (Röntgen equivalent man). 1 rem ist diejenige Quantität einer beliebigen Strahlung, mit welcher — unter gleichen sonstigen Bedingungen — im bestrahlten Gewebe die gleiche biologische Wirkung erzielt wird wie mit 1 r Röntgenstrahlen hoher Erzeugungsspannung. Um die gleiche biologische Wirkung zu erzielen, sind — je nach Art der Strahlung — recht unterschiedliche Strahlenmengen erforderlich. Das Verhältnis einer Röntgen- oder γ -Dosis zu derjenigen Dosis einer beliebigen anderen Strahlungsart, die den gleichen biologischen Effekt hervorruft, nennt man die relative biologische Wirksamkeit⁴⁾ dieser Strahlungsart:

$$\text{RBW} = \frac{\text{Dosis an Radium-}\gamma\text{-Strahlen zur Erzielung der biologischen Wirkung W}}{\text{Dosis der Strahlenart S zur Erzielung der biologischen Wirkung W}}$$

Als Bezug hat man sich dahingehend geeinigt, daß man die biologische Wirkung von Radium- γ -Strahlen als Standard betrachtet und gleich Eins setzt. Darüber hinaus hat man — wie ausgeführt — die RBW für alle γ -Strahlen im gesamten Energiebereich gleich Eins gesetzt, so daß 1 rem für γ -Strahlen gleich 1 rep⁵⁾ ist. Das gilt selbstverständlich nicht ohne weiteres für die anderen Strahlungsarten. Für jedes einer bestimmten Strahlungswirkung ausgesetzte Objekt und für jede dabei ausgelöste Wirkung ist die RBW verschieden und von der Strahlenart abhängig. Der Vorteil der Einheit rem liegt darin, daß sie eine auf einer meßbaren physikalischen Größe (rep bzw. rad) beruhende Berechnung der biologischen Wirkung bei gleichzeitiger oder aufeinanderfolgender Bestrahlung mit gleichen und verschiedenen Strahlungsarten gestattet. Die Strahlendosis in rem erhält man durch Multiplikation der in rep bzw. rad gemessenen Dosis mit der relativen biologischen Wirksamkeit RBW. Tabelle XIX, 1 gibt Mittelwerte für die RBW und für die Umrechnung von rep in rem, die als grobe Anhaltspunkte dienen können.

Tab. XIX, 1. Zusammenhang zwischen verschiedenen Strahlungseinheiten⁶⁾ für kleine Dosisleistungen bei Dauereinwirkung

Strahlung	[r]	[rem]	RBW	[rep]
Röntgen- und γ -Strahlung (0,1—3 MeV) . .	1	1	1	1
β -Strahlung		1	1	1
Schnelle Neutronen ($E < 20$ MeV)		1	10	0,1
Thermische Neutronen		1	5	0,2
Protonen		1	10	0,1
α -Strahlung (im Körperinnern)		1	10—20	0,05—0,1

¹⁾ Siehe P. C. Aegersold und G. A. Anslow: Phys. Rev. **69**, 1 (1946); P. C. Aegersold und W. H. Crocker: J. appl. Phys. **12**, 345 (1941); Arbeiten über Neutronen-Dosismessungen finden sich in A/Conf 8/P 60, 63, 154 und 386.

²⁾ Die in USA gleichfalls noch gebräuchl. Einheit 1 N ist auf die 25 r-Victoreen-Ionisationskammer bezogen.

³⁾ Es sei angeführt, daß die Dosisleistung von 1 n/s durch einen Fluß von $\Phi \approx 5,8 \cdot 10^8$ schnellen Neutronen pro Quadratcentimeter und Sekunde bewirkt wird. Dieser Angabe, die bedeutet, daß 0,1 mrep/h mit etwa 7 n/cm² s äquivalent sind, liegt ein schneller Fluß aus einem Kernreaktor zugrunde.

⁴⁾ Im englischen Schrifttum: Relative biological effectiveness (rbe).

⁵⁾ Bzw. 1 rad. Der Unterschied liegt innerhalb der Abschätzgenauigkeit auf Grund der in Tab. XIX, 1 gegebenen Werte, die streng genommen nur für überschlägliche Ermittlungen geeignet sind. Hinweis auf Seite 597, Fußnote ⁵⁾.

⁶⁾ Internationaler Radiologen-Kongreß, Kopenhagen (1953).

Zur Beurteilung einer Strahlenschädigung spielt außer Art und Menge der Strahlung auch die zeitliche Verteilung der Dosis eine große Rolle. So wird in der Regel bei einer Dosisleistung mit zeitlicher Unterbrechung (fraktionierte Bestrahlung) oder bei kontinuierlicher Bestrahlung mit kleiner Dosisleistung (Protrahierung) eine geringere Wirkung hervorrufen als bei einer Kurzzeit¹⁾-Verabreichung der gleichen Dosis. Diesen Unterschied zwischen fraktionierter, protrahierter und einmaliger Kurzzeitbestrahlung führt man auf eine Erholung des Gewebes zurück. Ein Maß hierfür gibt der sogenannte Zeitfaktor ZF, der außer von der zeitlichen Verteilung der Bestrahlung auch noch von der zur Beurteilung gewählten Wirkung abhängt:

$$\text{ZF} = \frac{\text{fraktionierte Dosis zur Erzielung einer bestimmten Wirkung } W}{\text{einmalige kurzzeitige Dosis zur Erzielung der gleichen Wirkung } W}$$

Ist $\text{ZF} = 1$, so ist eine zeitliche Verteilung der Dosis ohne Einfluß, d. h., die Bestrahlung kommt auch bei einer Fraktionierung voll zur Wirkung. Hat das bestrahlte Objekt eine gewisse Erholungsfähigkeit, so ist $\text{ZF} > 1$. Eine kontinuierlich verabreichte Dosis von z. B. 0,3 r pro Woche ergibt während 40 Jahren insgesamt rund 600 r. Würden diese 600 r während einiger Minuten wirksam, so wären die Folgen sehr ernstlich. Es ist daher in jedem Falle darauf zu achten, daß keine größeren Dosen — auch nur kurzfristig — einwirken können. Es kann aber auch vorkommen, daß eine fraktionierte Bestrahlung wirksamer ist als eine einmalige Kurzzeitbestrahlung, also $\text{ZF} < 1$. Diese Möglichkeit führt man auf eine natürliche, also unabhängig von der Bestrahlung verlaufende Änderung der Strahlenempfindlichkeit innerhalb eines längeren Bestrahlungszeitraumes zurück.

Außer von der Intensität und der Bestrahlungszeit, also der Strahlenmenge, sowie der Durchdringungsfähigkeit einer Strahlung hängt ihre biologische Wirkung von der Größe des durchstrahlten Körpervolumens ab. Diese Größe — und damit die räumliche Verteilung der Strahlung im Körper und auf seiner Oberfläche — ergibt sich aus der geometrischen Anordnung des Körpers relativ zur Strahlenquelle und aus der Durchdringungsfähigkeit der Strahlung. Die hervorgerufenen Strahlenwirkungen sind somit, je nach den anatomischen Gegebenheiten, verschieden. Die spezifische Energieabsorption ist ihrerseits eine Funktion der Ionisierungsdichte der Strahlung an der betrachteten Stelle, also der Anzahl der pro Längeneinheit an dieser Stelle gebildeten Ionenpaare. Je größer diese Ionisierungsdichte ist, eine um so höhere Wirksamkeit zeitigt die Bestrahlung. Schnelle Neutronen, bzw. die durch sie ausgelösten Rückstoßprotonen, α -Teilchen und thermische Neutronen, die innerhalb des Gewebes gleichfalls Protonen sowie α -Teilchen auslösen, stellen die wichtigsten Arten dichtionisierender Strahlen dar²⁾.

Es ist nach diesen Ausführungen klar, daß in die Berechnung der biologischen Wirksamkeit einer fraktioniert oder protrahiert aufgenommenen Gesamtdosis, also in die BRW, sowohl der Zeitfaktor eingehen muß als auch das geometrische Ausmaß der Bestrahlung. Dieser Zusammenhang ist nun so kompliziert, und das experimentelle Material schwankt — wegen der praktisch nicht erfaßbaren Erholung des Gewebes und wegen der individuellen Strahlenempfindlichkeit — in so weiten Grenzen, daß man zwischen einer RBW für die lokale (Teilkörper-) und die Ganzkörpereinwirkung einer Strahlung, die entsprechenden fraktionierten Expositionen und für die Dauerbelastung unterscheiden muß. Die in **Tabelle XIX, 1** angegebenen Werte gelten streng genommen nur für die Ganzkörperbestrahlung mit relativ kleinen Strah-

¹⁾ Definition folgt in § 98.

²⁾ Spaltbruchstücke können kaum ins Gewebe gelangen.

lungsquantitäten in der Größenordnung der zugelassenen Höchstdosen¹⁾ (frühere Bezeichnung „Toleranzdosen“) bei Dauereinwirkung. Weitere Einzelheiten werden z. B. bei *Rajewsky*²⁾ angegeben. Um feststellen zu können, ob eine bestimmte Dosis erreicht ist, muß, wie ausgeführt, die Art der Strahlung bekannt sein. Für eine Strahlenwirkung auf die Körperoberfläche kommen in erster Linie Photonen- und Neutronen-Strahlen in Frage, da diese eine sehr große Durchdringungsfähigkeit (Reichweite) besitzen. Z. B. ist eine starke γ - oder Neutronenstrahlung in Luft noch in mehreren hundert Metern Entfernung nachweisbar. Nur wenn der Abstand von der Strahlenquelle sehr gering ist, können auch α -, β - oder Protonenstrahlen erhebliche Schäden hervorrufen. Einen Anhaltspunkt für die Reichweite wichtiger geladener Korpuskularstrahlen bei verschiedenen Energien in Luft gibt **Tabelle XIX, 2.**

Tab. XIX, 2. Reichweiten verschiedener Strahlen in Normalluft

	0,1 MeV	1 MeV	10 MeV	100 MeV
α -Strahlen	1,1 mm	6 mm	10,5 cm	5,5 m
β -Strahlen	10 cm	3,5 m	40 m	240 m
Protonen-Strahlen . . .	1,6 mm	2,5 cm	1,1 m	70 m

Aus den vorstehenden Ausführungen ist zu ersehen, daß eine Berechnung von biologischen Strahlenschädigungen nur in beschränktem Umfange möglich ist. Jede Abschätzung beruht zum Großteil auf Erfahrungswerten, die teils in der Röntgenologie, bei Abwürfen von Atomkernbomben (z. B. Hiroshima und Nagasaki) sowie teils bei kernphysikalischen Untersuchungen (z. B. an Zyklotrons, an Reaktoren) usw. gewonnen wurden.

§ 97. Auswirkung von Strahlenschädigungen³⁾

Sämtliche biologischen Strahlenreaktionen beruhen, wie ausgeführt, auf einer Ionisation bzw. Anregung der im Gewebe vorhandenen Atome, durch die Gewebezellen zerstört werden können. Diese Wirkung wird in der Strahlentherapie zur Vernichtung von Wucherungen⁴⁾ usw. im menschlichen Körper und zur Beeinflussung gewisser Drüsenfunktionen ausgenutzt. Andererseits können bei einer Bestrahlung von gesundem Gewebe eben durch diese Wirkungen Schäden verschiedenen Grades auftreten. Außerdem verkürzen alle Bestrahlungen die Lebensdauer des Betroffenen⁵⁾. Eine untere Schwelle für die Dosis, ab der diese Verkürzung einsetzt, konnte bisher noch nicht ermittelt werden und scheint nicht zu bestehen. Bei der Betrachtung von biologischen Strahlenschädigungen unterscheidet man zwischen⁶⁾:

¹⁾ Siehe § 98.

²⁾ B. Rajewsky: „Strahlendosis und Strahlenwirkung“, 2. Aufl., Stuttgart (1956).

³⁾ Hinweis auf H. J. Cursis: „The biological effects of radiations“, *Advances in Biological and Medical Physics* **2**, 1 (1951). Siehe auch A/Conf 8/P 392, 478, 616, 617 und A/Conf 15/P 2068 sowie D. S. Grosch: „Biological response to mixed radiations“, *NU* **15**, 64 (1957), Nr. 12; H. Langendorff: „Der gegenwärtige Stand der Radiobiologie“, *Atomkernenergie* **3**, 438 (1958), Nr. 11; F. J. Rein: „Strahlenwirkung auf den lebenden Organismus“, *Phys. Bl.* **S**, 358 (1959), Nr. 8.

⁴⁾ Hinweis auf Liselotte Schachinger: *Atomkernenergie* **1**, 321 (1956); F. Wachsmann: *Atomkernenergie* **1**, 56 (1956), Nr. 2.

⁵⁾ Hinweis auf: *Atomic Energy Clearing House* **1**, 5 (1956), Nr. 49; H. A. Blair: „A formulation of the injury, life span, dose relations for ionizing radiations“, Teil I: „Application to the mouse“, UR-206 (1952); Teil II: „Application to Guinea pig, rat and dog“, UR-207 (1952). Siehe auch R. F. Kallman und H. J. Kohn: *Science* **128**, 301 (1958).

⁶⁾ Siehe M. Westergaard: *Kopenhagen, Bull. of the Atomic Scientists* **S**, 318 (1955); W. Seelentag: „Die Strahlenbelastung des Menschen und ihre Bewertung“, *Atomkernenergie* **2**, 102 (1957), Nr. 3.

1. Körperschäden

- a) durch lokale oder Ganzkörperbestrahlung von außen¹⁾,
- b) durch innere Bestrahlung infolge Aufnahme einer Aktivität mit der Nahrung, dem Wasser, der Atemluft usw.²⁾.

2. Erbschäden.

Außerdem muß man bei den nachweisbaren funktionellen Störungen und morphologischen Veränderungen einzelner Organe und Organsysteme zwischen den durch die direkte Bestrahlung hervorgerufenen Primär- und den Sekundäreffekten differenzieren, die sich infolge der Allgemeinschädigung des Körpers in dem betreffenden Organ ergeben. Bei allen feststellbaren Effekten kann es sich sowohl um die Auswirkungen der direkten Schädigungen bestimmter Organe oder Organsysteme handeln als auch um Anpassungs- und Abwehrreaktionen unspezifischer Art, deren Steuerung durch nervöse oder humorale Zentren erfolgt. Auf Grund von Tierversuchen kann man eine Empfindlichkeitsreihenfolge der verschiedenen Organe aufstellen. Die größte Strahlenempfindlichkeit weisen die lymphatischen Gewebe, also Lymphknoten (ab 25 r deutliche, jedoch schnell wieder ausheilende Schäden), Milz, Thymus und die lymphatischen Gewebe in anderen Organen auf, wie z. B. die Lymphfollikel des Darmtraktes. Danach folgt das Knochenmark, in dem die ersten eindeutigen Veränderungen bei Dosen ab 50 bis 100 r auftreten; stärkere Dosen führen zu einer Verringerung der Anzahl der Zellen im Blute; bei akuten Schädigungen können sich chronische Blutkrankheiten wie Anämie und Leukämie³⁾ einstellen. Alsdann sind die Gonaden, also Hoden und Ovarien, mit etwa gleicher Empfindlichkeit zu nennen; zum dauernden Ausschalten der Eierstöcke sind etwa 350 r erforderlich. Die sich schnell wieder regenerierenden Schleimhäute des Magen-Darmtraktes, bei denen im Tierversuch Schäden ab 100 r beobachtet wurden, nehmen die nächste Stufe der Empfindlichkeitsreihenfolge ein. Darauf folgt die Haut, deren individuelle Strahlenempfindlichkeit um ± 30 Prozent schwankt. Die Reihe wird durch die drüsigen Organe — wie Leber, Nebenniere, Niere, Bauchspeicheldrüse —, die Lunge, das Zentralnervengewebe und die Skelettmuskulatur abgeschlossen.

Bei einer Strahlenschädigung größeren Ausmaßes sind die Veränderungen des Blutbildes charakteristisch für den Umfang des Schadens. Die zirkulierenden Blutzellen selbst sind relativ strahlenunempfindlich, jedoch zeigt das Blut⁴⁾ in seiner Gesamtheit nach einer stärkeren Bestrahlungsdosis Gerinnungsstörungen. Die hauptsächlichsten Schädigungen des Blutbildes werden auf dem Umweg über die Blutbildungsstätten bewirkt. Das rote Blutbild wird erst ab etwa 200 bis 400 r (Ganzkörperbestrahlung) beeinflußt. Stärkere Dosen führen zur völligen Erschöpfung der Bluterzeugung und damit notwendig zur Blutarmut. Auf Grund des Fehlens der weißen Blutkörperchen stellen sich infektiöse Erscheinungen ein wie geschwürige Entzündungen im Mund, im Kehlkopf, in der Speiseröhre und im Darm. Bei einer Dauerbelastung sind Veränderungen des Blutbildes ab 1 bis 10 r/Tag Dosisleistung sicher festgestellt. Die bekannteste Strahlenschädigung ist das Röntgenerythem der Haut, die in den meisten Fällen die größte Strahlenbelastung erfährt. Unter einem Erythem versteht man eine Rötung der Haut, die schon bei einer einmaligen Verabreichung von

¹⁾ Hinweis auf: H. A. Blair: "Biological effects of external radiation", New York (1954).

²⁾ Hinweis auf: E. H. Graul: Umschau 58, 12 (1958), Nr. 1.

³⁾ Hinweis auf L. Rausch: „Leukämie und ionisierende Strahlen“, Referat in Atomwirtschaft 3, 31 (1958), Nr. 1.

⁴⁾ Hinweis auf J. Becker und T. Flieder: „Aufgaben und Erkenntnisse der Strahlenhämatologie“, Medizin. Klinik 52, 264 (1957), Nr. 7; M. Tsuzuki: Münchener Med. Wochenschrift 97, 988 (1955), Nr. 31.

800 r auftritt. Wird diese von der bestrahlten Fläche abhängige Dosis auf 1200 bis 1500 r erhöht, so zeigen sich schon wesentlich unangenehmere Erscheinungen, die als Epitheliolyse bezeichnet werden. Es tritt eine sehr schmerzhafte und nässende Auflösung der Haut ein. Bei noch weiterer Steigerung der Dosis kommt es zu einer völligen Zerstörung des Gewebes, und es entstehen mehr oder weniger tiefgreifende Röntgeneschwüre, deren Heilungsprozeß sehr langwierig werden kann. Die Ursache der Bösartigkeit derartiger Hautverbrennungen liegt im Eiweißzerfall innerhalb der Gewebe. Es entstehen sogenannte Noxine, die in den Organismus eindringen und das vegetative Nervensystem schädigen. Daher ist in jedem Falle eine möglichst schnelle Beseitigung der Verbrennungsnekrose geboten. Eine Zersetzung der Noxine soll durch Trypsin¹⁾ möglich sein, das die Giftstoffe bis zu den ungefährlichen Aminosäuren abbaut. Ein Mittel gegen die Schädigung des vegetativen Nervensystems soll in Novocain-Injektionen bestehen. Ein weiteres charakteristisches Symptom, das bei einer Bestrahlung auftritt, ist vollständiger Haarausfall an den betroffenen Stellen, der durchschnittlich 2 bis 3 Wochen nach der Bestrahlung eintritt. Zu Anfang dieses Jahrhunderts wurden sämtliche Formen bösartiger Geschwülste, die durch Photonen- oder Korpuskularstrahlen hervorgerufen werden, mit der Bezeichnung „Strahlenkrebs“²⁾ belegt. Diese Art von Krebs kann sowohl die Folge einer einmaligen starken Verbrennung als auch einer langdauernden Strahlenbelastung sein. Die meisten Fälle wurden bei einer beruflichen Dauereexposition beobachtet, wie sie bei Wissenschaftlern, Ärzten, medizinischem Pflegepersonal, technischen Röntgenarbeitern und insbesondere beim Uranbergbau (Lungenfibrose)³⁾ vorkommt.

Die auf eine stärkere Ganzkörperbestrahlung folgende Strahlenkrankheit ist besonders tückisch; die ausgelösten biologischen Reaktionen machen sich nicht nur unmittelbar nach der Bestrahlung, sondern zum Teil erst nach einer längeren Latenzzeit bemerkbar. Als Allgemeinreaktion nach einer schwachen lokalen oder Ganzkörperbestrahlung sei der sogenannte Röntgenkater angeführt, für den Kopfschmerzen, Übelkeit, Appetitlosigkeit und Schwindelanfälle charakteristisch sind. Bei einer Ganzkörperbestrahlung werden praktisch alle Organe betroffen. Daher weist die Strahlenkrankheit eine Vielfalt von Symptomen auf. Man unterscheidet zwischen den Frühsymptomen, die einige Stunden nach der Bestrahlung eintreten, und den Spätreaktionen, die sich erst nach einem auf die Frühreaktionen folgenden symptomarmen Intervall von Tagen bis zu drei Wochen bemerkbar machen. Außer von der individuellen Strahlenempfindlichkeit, von der Strahlenart und der Bestrahlungsweise sind Beginn, Verlauf und Schwere der akuten Strahlenkrankheit, des Strahlensyndroms, in erster Linie von der Strahlendosis abhängig⁴⁾.

Bei einer Ganzkörperbestrahlung mit mäßiger⁵⁾ Strahlendosis stellt sich — außer den für einen Röntgenkater charakteristischen Symptomen — meist innerhalb von 24 Stunden Erbrechen ein. Nach 3 bis 5 Wochen treten Entzündungen der Mund- und Rachenschleimhaut auf. Außerdem tritt Diarrhöe und Haarausfall ein. Unter Umständen ist eine vollständige Heilung — allerdings nach einem langen

¹⁾ Ferment der Bauchspeicheldrüse.

²⁾ Näheres siehe z. B. B. Rajewsky a. a. O.

³⁾ „Frankfurter Zeitschrift für Pathologie“ 42 (1931), Nr. 1/3 und 50 (1936), Nr. 1; „Berufsschädigungen durch radioaktive Substanzen“, H. 1 der Sammlung „Arbeitsmedizin“ von Neitzel, Leipzig (1935); Berichte der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie.

⁴⁾ Hinweis auf E. H. Graul: „Die Strahlenkrankheiten“, I „Akute Schäden durch radioaktive Strahlung“, Umschau 57, 353 (1957), Nr. 13; II „Behandlungsmöglichkeiten akuter Strahlenschäden“, Umschau 57, 458 (1957), Nr. 15; III „Chronische Leiden“, Umschau 57, 714 (1957), Nr. 23; Atompraxis 2, 131 (1956).

⁵⁾ Siehe Tab. XIX, 3 und XIX, 4.

und schweren Leiden — möglich. Nach etwa 2 bis vier Monaten jedoch kann auch der Exitus durch Knochenmarklähmung eintreten.

Bei einer stärkeren¹⁾ Strahlungs-dosis folgt nach dem Erbrechen am ersten Tag zunächst eine leichte Besserung. Nach 14 Tagen treten dann Hautblutungen, Diarrhöe, Haarausfall und steigendes Fieber auf. Der Exitus ist nach etwa 3 bis 6 Wochen zu erwarten. Unter Umständen steht dem Betroffenen aber auch ein langes Krankenlager mit Anämie und mit Geschwulstbildungen bevor.

Bei einer größeren¹⁾ Strahlungs-dosis tritt das Erbrechen in den ersten 12 Stunden und die Diarrhöe nach den ersten 24 Stunden ein. Nach 5 Tagen zeigen sich Blut-flecken und sinkt der Blutdruck. Weitere Symptome sind blutige Durchfälle und Abnahme der Leukozyten. Der Exitus erfolgt nach etwa einer Woche.

Zusammengefaßt kann man sagen, die Frühsymptome der Strahlenkrankheit bestehen in Kopfschmerzen, Übelkeit, Erbrechen, Diarrhöe, Geweblutung und Verminderung der Zahl der weißen Blutkörperchen. Als Spätsymptome kann man Infektionen, Leberschäden und Strahlungstod ansprechen. Personen, die die achte Woche überleben, haben meist gute Heilungsaussichten. Da das Ausmaß jeder Strahlenschädigung — wie ausgeführt — eine Funktion der Strahlenempfindlichkeit, und der Körperkonstitution²⁾ ist, lassen sich für den Ablauf des Krankheitsbildes nach einer Bestrahlung nur grobe Angaben machen, und daher sind alle Übergänge fließend. Das gleiche gilt hinsichtlich der Reversibilität und der Irreversibilität vieler Schädigungen. Besonders empfindlich sind Kinder³⁾ und überhaupt alle Teile

Tab. XIX, 3. Charakteristische Dosiswerte für die Schäden nach einer kurzzeitigen Ganzkörper-Bestrahlung des Menschen mit γ -Strahlen*)

Dosis	Charakterisierung
25 r	Grenz-Dosis, bis zu der im allgemeinen keine klinisch erkennbaren Schäden auftreten (cortical dosage)
25—100 r	Lymphopenie, weitere leichte Symptome
50 r	nur Reduktion der Lymphozyten zu erwarten
75 r	kritische Dosis (emergency dose)
100 r	Nausea, Erbrechen, Müdigkeit bei einem großen Teil der Menschen
100—200 r	stärker und länger anhaltende Lymphopenie, ernste Strahlenkrankheit, erste Todesfälle
150 r	Strahlenkater bei 50%
200 r	Depression aller Blutelemente, verminderte Vitalität; die meisten überleben jedoch. 5% Mortalität
225 r	Strahlenkater bei 100%
250 r	5% Mortalität
400 r	50% Mortalität (innerhalb von 30 Tagen)
600 r	100% Mortalität; 95% Mortalität innerhalb von 14 Tagen
200—800 r	kurzzeitig wirksame Letaldosis für das Körperringere

*) Nach B. Rajewsky a. a. O.

¹⁾ Siehe Tab. XIX, 3 und XIX, 4.

²⁾ Hinweis auf Z. H. Baeq und P. Alexander: "Fundamentals on radiobiology", London (1955).

³⁾ Hinweis auf A/Conf 8/P 242.

Tab. XIX, 4. Versuch einer Schematisierung der einzelnen Typen beim Strahlensyndrom unter Angabe charakteristischer Symptome¹⁾

Einteilung in 4 Dosisbereiche ($LD_{100} = 100\%$ tödliche Dosis)

Zeit nach Strahlenschädigung	I. Größenordnung: 100000 r ²⁾ (hyperakutes Strahlensyndrom)	II. Bereich der LD_{100} : 600 bis 800 r (akutes Strahlensyndrom)	III. Bereich der LD_{50} : ~ 400 r (akutes und/oder subakutes Strahlensyndrom)	IV. Größenordnung: 200 r ³⁾ (chronisches Strahlensyndrom)
1. Woche	Tod tritt praktisch unter der Bestrahlung ein. Hamster: exitus letalis bei 110000 r (540 r/min) in $3\frac{1}{4}$ Std.; Maus bei 200000 r (2200 r/min) in $1\frac{3}{4}$ Std. Alternierende „Wellen“ von Mattigkeit und Übererregbarkeit. Tonisch-klonische Krämpfe; ausgedehnte Blutungen („Molekularchemischer“ Tod)	Übelkeit und Erbrechen, Durchfall, Appetitlosigkeit, Abgeschlagenheit, Vernichtungsgefühl, Fieber, Verminderung der weißen Blutkörperchen (Leukozyten), Hautblutungen, Schleimhautentzündungen (bes. Rachen, Mund)	Symptome usw. wie bei Gruppe II; aber häufiger wieder abklingend; oft nach leichtem Erbrechen zunächst ein asymptomatisches Latenzstadium, gelegentlich anfänglicher Rückgang der Leukozyten	Bei Dosen von ~ 150 bis 200 r Brechreiz (evtl. auch Erbrechen), mäßige vorübergehende Verminderung der Leukozyten, evtl. auch später irreversibler Rückgang der weißen Blutkörperchen)
2. Woche		Wie in der ersten Woche; besonders ausgeprägter Verlust der Regenerationsfähigkeit des Knochenmarks, Geschwulstbildungen im Mund, Appetitlosigkeit, Fieber, septische Zustandsbilder, Lungenentzündungen usw., rascher Kräfteverfall, Stuhl- und Harnrang, Geistesverwirrung (Exitus meist in Mitte der 2. Woche)	Müdigkeit, Mattigkeit, beginnende Enthaarung, Blutbildveränderungen, insbesondere Verminderung der Leukozyten. Beginn von Anämien, Anfälligkeit gegen Infektionserkrankungen	
3. Woche		~ 100% Mortalität	Wie in der 2. Woche. Bei einigen beginnende Bildung roter Blutkörperchen, Enthaarung, bei Fortschreiten des Syndroms Fieber, schwere Entzündungen im Mund und Rachen; Geschwürbildung, blutige Durchfälle, Appetitlosigkeit, rascher Kräfteverfall, Exitus letalis (Sepsis, Pneumonien)	

¹⁾ Nach E. H. Graul: Umschau 57, 386 (1957), Nr. 13.

Tab. XIX, 4 (Fortsetzung)

Zeit nach Strahlenschädigung	I. Größenordnung: 100 000 r ²) (hyperakutes Strahlensyndrom)	II. Bereich der LD ₁₀₀ : 600 bis 800 r (akutes Strahlensyndrom)	III. Bereich der LD ₅₀ : ~ 400 r (akutes und/oder subakutes Strahlensyndrom)	IV. Größenordnung: 200 r ³) (chronisches Strahlensyndrom)
4. Woche			50% Mortalität. Überlebende zeigen einige der sog. Spät- schäden (s. Gruppe IV), große Varia- tionsbreite	Verkürzung der Le- bensspanne, Trübung der Augenlinse, bö- sartige Geschwülste, insbes. Leukämien, Fertilitätsstörungen, Menstruationsstö- rungen, Mutationen. Kinder: Wachstums- störungen, vor allem Atrophien und Hem- mungen im Skelett- system, Kleinköpfig- keit (mikrozephalie Mißbildungen)

²⁾ Tierexperimentelle Erfahrungen (Angaben nach Rugh, Rajewsky u. a.).

³⁾ In dieser Gruppe wären aus didaktischen Gründen auch Überlebende der Gruppe III einzuordnen.

des Organismus, die in der Bildung (Blut) oder im Wachsen begriffen¹⁾ sind. Bei Tieren ist eine Herabsetzung der Strahlenempfindlichkeit durch Sulphydrilkörper gelungen. U. a. soll eine Herabsetzung der Strahlenempfindlichkeit um etwa 50 Prozent durch Cystein-Cysteamin-Komplexe erreicht worden sein²⁾; einen zusammenfassenden Überblick gibt *Graul*³⁾. Zum Abschluß der Betrachtungen über die Schäden durch Ganzkörperbestrahlung seien in den Tabellen XIX, 3 und XIX, 4 noch einmal diejenigen Symptome zusammengestellt, die im Mittel nach einer kurzzeitigen γ -Strahlen-Exposition auftreten.

Die durch 1-n-Neutronen hervorgerufenen Effekte sind im allgemeinen erheblich stärker als die durch 1 r Röntgenstrahlung bewirkten⁴⁾. Für eine deutliche Rötung der Haut braucht man bei harter Röntgenstrahlung rund 1000 r. Die gleiche Wirkung wird schon durch 100 bis 200 n-Einheiten hervorgerufen⁵⁾. Besonders empfindlich sind die Augen; durch Neutronenstrahlungen werden Linsentrübungen, sogenannte Katarakte, hervorgerufen, die jahrelang bestehen bleiben.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß auch nach kleineren und mittleren Strahlenbelastungen, die einen Röntgenkater oder eine leichte Strahlenkrankheit zur Folge haben, jegliche zusätzliche physische oder psychische Belastung des Geschädigten vermieden werden muß, da sonst eine merkliche Beeinträchtigung der Erholungsfähigkeit bewirkt wird.

Außer den bisher fast ausschließlich besprochenen akuten Strahlenschäden können auch chronische Erkrankungen — zum Teil erst nach vielen Jahren —

¹⁾ Hinweis auf A. R. Gopal-Ayengar: Atomkernenergie 1, 352 (1956), Nr. 10.

²⁾ Hinweis auf A. Catch: „Therapeutische Möglichkeiten bei Vergiftung mit Radioisotopen“, Atomkernenergie 1, 225 (1956), Nr. 6.

³⁾ E. H. Graul a. a. O.

⁴⁾ Hinweis auf: Umschau 57, 262 (1957).

⁵⁾ Siehe auch J. T. Brenna u. a.: „The biological effectiveness of thermal neutrons on mice“, NU 12, 48 (1954), Nr. 2 und 12, 31 (1954), Nr. 4.

auftreten. Zu diesen Spätschäden zählen Tumore im blutbildenden System, die zu einer anomalen Steigerung der weißen Blutkörperchen, also zur Leukämie, führen, sowie andere maligne Tumore und die schon erwähnten Katarakte. Außerdem ist mit weiteren Formen von Blutkrankheiten — mit aplastischen Anämien —, einer Verkürzung der Lebensspanne, mit Fruchtbarkeitsstörungen, einer allgemeinen Schwächung der Konstitution, also einer größeren Krankheitsbereitschaft, und mit Fruchtschäden zu rechnen. Berücksichtigt man auch die über längere Zeiten aufgenommenen Aktivitäten, so kann man folgende chronische Strahlenschäden zusammenstellen, deren Ausprägung von Fall zu Fall verschieden ist:

Allgemeiner Kräfteverfall,
 vorzeitiges Altern, Verkürzung der Lebensspanne, Sterilität,
 Blutdruckerhöhung (arterielle Hypertensionen),
 Arteriosklerose, insbesondere Nierensklerose,
 Lebervergrößerung,
 Milzvergrößerung,
 Wucherung oder Rückbildung des Knochenmarks und der lymphoiden Organe,
 Entstehung von Tumoren,
 Leukämien,
 Blutveränderungen, insbesondere Anämien und Thrombopenien,
 Katarakte,
 Infektionen, insbesondere Lungenentzündungen,
 verzögerter Strahlentod¹⁾.

Diese kurze Aufzählung zeigt bereits, daß gerade die chronischen Erkrankungen infolge einer äußeren radioaktiven Bestrahlung außerordentlich tückisch sind.

Daß derartige Erscheinungen auch bei einer Aufnahme der Aktivitäten in den Körper auftreten, braucht nicht besonders vermerkt zu werden. Durch eine derartige Aufnahme von radioaktiven Substanzen in den menschlichen Körper (Inkorporation) entsteht gleichfalls eine Strahlenbelastung, die die Quelle für alle möglichen Schädigungen bilden kann. Die Aufnahme von α - und β -Aktivitäten in das Körperinnere ist besonders gefährlich, da die gesamte Teilchenenergie — infolge der hohen Ionisierungsdichte und damit verbunden der geringen Reichweite — innerhalb des Körpers an das Gewebe übertragen und von diesem absorbiert wird. Die Faktoren, die die Strahlenbelastung bestimmen, sind folgende:

1. Strahlenart, Teilchen- bzw. Quantenenergie, absorbiertes Energieanteil sowie (physikalische) Halbwertszeit,
2. Art der Inkorporation,
3. Verteilung und Ablagerung der Aktivität im Körper sowie Ausscheidung aus diesem (biologische Halbwertszeit),
4. ggf. Wirkungsquerschnitte für Kernreaktionen.

Die biologische Halbwertszeit τ_b eines Radioisotops ist diejenige Zeit, nach welcher die im Organismus vorhandene Menge des betreffenden Isotops durch Ausscheidung auf die Hälfte vermindert wird. Entsprechend ist auch eine biologische Zerfallskonstante λ_b definiert. Die effektive Halbwertszeit, die für Zerfall und Ausscheidung maßgeblich ist, ergibt sich nach Addition der Zerfallskonstanten

$$\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_b \quad (\text{XIX/1})$$

wegen

$$\tau = \frac{0,693}{\lambda} \quad (\text{IV/6})$$

¹⁾ Upton u. a.: Atompraxis 3, 1 (1957).

zu

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{\tau \cdot \tau_b}{\tau + \tau_b} \quad (\text{XIX}/2)$$

Auf Grund von (XIX/2) folgt, daß die Radioisotope mit mittlerer physikalischer und sehr langer biologischer Halbwertzeit am gefährlichsten sind. Diese erzeugen nämlich schon in sehr kleinen Mengen eine große Strahlenbelastung und halten sich sehr lange Zeit im Körper auf.

Die Inkorporation selbst kann auf verschiedenen Wegen erfolgen, über den Magen-Darmtrakt, durch die Atmung oder durch die Haut. Die Resorption auf dem Wege über die Haut besitzt im allgemeinen eine nur geringe Bedeutung, da die Haut meist den Zutritt zum Körper verwehrt. Liegt jedoch eine Verletzung oder eine offene Wundfläche vor, so wird die Eindringgefahr an den betroffenen Stellen außerordentlich groß¹⁾.

Ein radioaktives Isotop verhält sich chemisch genauso wie das nicht aktive Isotopengemisch des gleichen Elementes. Es ist daher zu beachten, daß eine Ablagerung im Körper nicht gleichmäßig sondern selektiv erfolgt. So gibt es z. B. sogenannte knochensuchende Elemente, die sich vornehmlich im Skelett ablagern bzw. anreichern und dort sehr lange Zeit verbleiben. Andere Grundstoffe wiederum lagern sich in der Schilddrüse, der Leber²⁾, der Milz usw. ab. Hinzu kommt, daß die Strahlenempfindlichkeit der verschiedenen Organe und Gewebe unterschiedlich ist. Daher gibt es für jedes Radioisotop — außer Aluminium — ein sogenanntes kritisches Organ; das ist derjenige Teil bzw. dasjenige Organ des Körpers, dessen mit der Inkorporation des betreffenden Radioisotops verbundene Strahlenbelastung für die Gesundheit des Individuums am nachteiligsten ist. Nach unseren heutigen Kenntnissen ist es praktisch nicht möglich, bereits seit längerer Zeit in den Knochen abgelagerte Aktivitäten wieder herauszulösen³⁾. In einem solchen Falle kann man nur versuchen, die Strahlenempfindlichkeit auf dem bereits angegebenen Wege, durch die Verabfolgung von sulfhydrylhaltigen Körpern, wie Cystein, Glutathion usw., herabzusetzen⁴⁾. In anderen Fällen soll eine teilweise Entfernung verschiedener Aktivitäten aus dem Körperinneren durch Komplexbildner, wie Äthylen-diaminotetraessigsäure, Zirkonsalze, kondensierte Phosphate usw., möglich sein⁵⁾. Je nach der Art des inkorporierten Isotops bzw. je nach dem kritischen Organ ergeben sich bösartige Knochengeschwülste⁶⁾, Erschöpfungen des Knochenmarks in Verbindung mit Störungen der Blutbildung⁷⁾, Reizungen des Knochenmarks und leukämische Erscheinungen. Bei jugendlichen Lebewesen kommt es zu Wachstumsstörungen, z. B. der Knochen, wenn sich die Aktivität in der Nähe der Epiphysen⁸⁾ ansammelt.

¹⁾ Aus den USA wurde ein Fall bekannt, in dem sich eine technische Assistentin mit einer plutoniumverseuchten Glasseherbe schnitt. Das Plutonium drang mit einer außerordentlichen Geschwindigkeit, die fast der bei einer intravenösen Injektion gleichkam, in den Körper ein und lagerte sich anschließend im gesamten Skelett ab.

²⁾ Hinweis auf umfangreiche Lit. ü. Thoriumablagerern in der Leber als Folge von Thorotrasteinspritzungen.

³⁾ Über die Erfolge mit dem im ANL entwickelten Rhodizonate ist bisher noch nichts Näheres bekannt geworden.

⁴⁾ Hinweis auf L. Rausch: „Schutz von Sulfhydrylgruppen gegen ionisierende Strahlen“, Referat in Atomwirtschaft 3, 30 (1958).

⁵⁾ Hinweis auf A. Catsch: „Therapeutische Möglichkeiten bei Vergiftung mit Radioisotopen“, Atomkernenergie 1, 225 (1956) und dort zitierte zusammenfassende Literaturstellen; J. Schurz: „Chemischer Strahlenschutz“, Atomkernenergie 1, 169 (1956), Nr. 5; H. Langendorf: „Die Therapie der akuten Strahlenverletzung“, Atomkernenergie 4, 267 (1959), Nr. 7/8. Es sei noch vermerkt, daß im Pariser Curie-Krankenhaus mehrere strahlengeschädigte jugoslawische Physiker durch Einspritzen von blutbildendem menschlichem Knochenmark in die Venen von H. Jammet mit Erfolg behandelt wurden.

⁶⁾ Knochensarkome.

⁷⁾ Leukopenie oder Panmyelophthise.

⁸⁾ Wachstumszonen.

Die Erbmasse¹⁾ jedes Lebewesens ist in seinen Chromosomen verankert, von denen der Mensch 24 Paare besitzt. Die einzelnen Paare tragen, wenn man von dem Geschlechtschromosomen-Paar X, Y absieht, jeweils konkurrierende Gene für die verschiedenen Anlagen. Jedes Gen (schätzungsweise $2 \cdot 10^4$ beim Menschen) ist für ein bestimmtes Merkmal charakteristisch. Die Gene selbst sind komplizierte Moleküle oder Molekülkomplexe. Wird in einem solchen Molekül durch eine Anregung oder durch einen Kernprozeß eine Veränderung bewirkt, so ändert sich das Molekül und damit die Erbanlage; der Biologe spricht von einer Mutation, einem Erbsprung. Erfolgt nach einer Mutation eine Reifeteilung, so geht das Chromosom mit dem veränderten Gen in eine zur Befruchtung anstehende reife Zelle (halber [haploider] Chromosomensatz) über. Gelangt diese Zelle zur Befruchtung, so wird das Merkmal, das auf dem betroffenen Gen verändert wurde, in der neuen Form — gemäß den Mendelschen Gesetzen — weitervererbt. Da es nun dominante und rezessive Merkmaleigenschaften gibt, und da die meisten mutierten Erbanlagen rezessiv sind, braucht das neue Merkmal in der nächsten Generation noch nicht zum Vorschein zu kommen. Die mutierten Gene halten sich meist sehr lange in der Erbmasse (persistente Gene). Man kann annehmen, daß ihre Eliminierung im Mittel erst nach vierzig Generationen erfolgt.

Die grundlegenden zusammenfassenden Arbeiten über die genetischen Strahlenauswirkungen stammen von *Timoféf-Ressovski* und *H. J. Muller*²⁾. Durch die Einwirkung ionisierender Strahlen erhöht sich die Anzahl der Mutationen pro Individuum und Generation³⁾. Die Angaben über diejenigen Strahlungs Dosen, durch die die natürliche Mutationsrate beim Menschen verdoppelt wird, schwanken — vornehmlich wegen der Unsicherheit des Wertes jener ($2 \cdot 10^{-5}$ bis 10^{-6} bis 10^{-7} pro Gen und Generation) — um etwa eine Zehnerpotenz. Man schätzt, daß beim Menschen rund 3,7 Prozent aller natürlich verursachten Mutationen⁴⁾ durch die natürliche Umgebungstrahlung erzeugt werden. In der Literatur⁵⁾ finden sich für die Verdopplungsrate u. a. folgende Angaben:

3 r	(<i>J. V. Neel</i> und <i>J. B. S. Haldane</i>)
13 r	(<i>A. Howard</i>)
35 r	(<i>W. Riezler</i>) ⁶⁾
37 r	(<i>W. L.</i> und <i>L. B. Russel</i>)
50 r	(<i>Langendorff</i>)
50 r	(<i>Cockroft</i>)
50 r	(<i>D. G. Catcheside</i>)
30—80 r	(<i>H. H. Plough</i>)
80 r	(<i>R. Rugh</i>)
80 r	(<i>H. J. Muller</i>)
140 r	(<i>R. Evans</i>)
180 r	(<i>J. V. Neel</i>)

¹⁾ Hinweis auf H. J. Muller: "Genetic damage produced by radiation", *Science* **121** (1955), Nr. 3155, Auszug in *Atomkernenergie* **1**, 140 (1956), Nr. 4; H. J. Muller (Übersetzung von Marquardt): *Naturw. Rundschau* (1956), Nr. 4.

²⁾ Siehe außerdem: G. W. Beadle: *AECU-255*; M. Westergaard: *Medizin. Klinik* **52**, 254 (1957), Nr. 7; D. G. Catcheside: *Practitioner* (London) **165**, 590 (1950); R. Freeman: *Amer. J. Nurs.* **51**, 86 (1951); O. Paget: *Mikroskopie* (Wien) **2**, 1 (1947); O. R. Placak und R. J. Morton: *J. Amer. Water Works Ass.* **42**, 135 (1950); H. Marsius: *Medizin. Klinik* **52**, 255 (1957), Nr. 7; H. Marquardt: *Umschau* **57**, 105 und 170 (1957).

³⁾ Auf chemischem Wege können Mutationen durch Senfgase, Triazole, Carbamate, Formaldehyd u. a. m. bewirkt werden.

⁴⁾ Hinweis auf den Bericht des britischen medizinischen Forschungsrates: "The hazards to man of nuclear and allied radiations", London 1956. (Deutsche Übersetzung vom DRK, Koblenz, 1957); W. Jacobi und B. Rajewsky: *Z. VDI.* **99**, 163 (1957), Nr. 4.

⁵⁾ Siehe z. B. W. Kliefoth: *Atomkernenergie* **1**, 144 (1956); B. Rajewsky a. a. O.; M. Westergaard: *Medizin. Klinik* **52**, 254 (1957), Nr. 7.

⁶⁾ W. Riezler: *Einführung in die Kernphysik*, 4. Aufl., Berlin und Buxtehude (1950).

Auf Grund von natürlichen Mutationen, so kann man also annehmen, entfallen auf je zehn Menschen während ihres Lebens rund zwei bis vier Genänderungen¹⁾, und im Gleichgewicht ist jeder Mensch Träger von im Mittel acht mutierten Genen. In dieser Tatsache liegt auch die Gefahr der staatlich verbotenen Verwandtenehen. Da die Anzahl übereinstimmender Erbanlagen mit dem Grad der Verwandtschaft quadratisch zunimmt, besitzt der Staat hier eine gewisse Reguliermöglichkeit. Viele Mutationen sind derart, daß die Nachkommen des bzw. der Merkmalsträger nicht lebensfähig²⁾ sind. Man hat errechnet, daß die Bevölkerungsabnahme zufolge dieses Umstandes gegebenenfalls größer sein kann als die Abnahme infolge direkter Strahlenauswirkungen. Man schätzt z.B., daß jeder Bürger der der USA während seines Lebens zu diagnostischen Zwecken einer Röntgenexposition von im Mittel 2 r ausgesetzt wird. Das entspricht einer Keimzellen-Bestrahlungsrate von 0,06 r/Jahr und ist etwa viermal so viel, wie jeder USA-Bürger von 1945 bis 1955 insgesamt infolge der Atomkernbombenexplosionen am ganzen Körper aufgenommen hat.

Bezüglich der genetischen Auswirkungen auf eine größere Bevölkerungsgruppe und der Erkennensmöglichkeit der entstandenen Schäden sei den Ausführungen von *H. J. Muller* gefolgt³⁾: Jedes einzelne γ -Quant ist in der Lage, eine oder mehrere Mutationen herbeizuführen. Mutationen entstehen mit einer Häufigkeit, die der Gesamtdosis der Strahlungen proportional ist. Zum Beispiel produziert ein Zehntel einer Dosis auch ein Zehntel der Mutationen, unabhängig vom Zeitraum, in dem die Dosis verabreicht wird (kumulative Wirkung). Eine Strahlung mag noch so schwach sein, stets ist mit ihr die Gefahr verbunden, daß unter ihrem Einfluß Mutationen stattfinden. Es ist erwiesen, daß die überwiegende Zahl der Mutationen (über 99 Prozent) ungünstig ist und eine Schwächung der Funktionen verursacht²⁾. Jedoch ist die schädliche Wirkung meistens zu gering, um mit gewöhnlichen Mitteln erkannt zu werden, besonders wenn sie — wie in den meisten Fällen — nur von einem Elternteil vererbt wird, und wenn sie — wie bei jeder menschlichen Population — innerhalb einer Menge vielfältig verschiedener, bei den einzelnen Personen voneinander abweichender Merkmale auftritt, Merkmale, die durch natürliche Mutationen in vielen Vorfahrgenerationen entstanden sind. Deshalb sind Statistiken von Bevölkerungsgruppen, wie die von Hiroshima und Nagasaki, nicht geeignet zur Beantwortung der Frage, ob Mutationen durch eine empfangene Bestrahlung hervorgerufen wurden. Die für den offiziellen Bericht über diese Untersuchungen in Japan verantwortlichen Wissenschaftler erklärten daher, es sei immer unsicher gewesen, ob durch die dort angewandten Methoden Ergebnisse zu erzielen sind, die verallgemeinert werden können. Sie wiesen darauf hin, daß die nicht beweiskräftigen Resultate zwar eindeutig positiv seien, jedoch gleichzeitig in völliger Übereinstimmung mit den bisherigen Kenntnissen ständen, die man über die Wirksamkeit der Strahlung auf die Erbanlagen von sehr mannigfaltigem anderem Material bereits habe. Mit anderen Worten, es könnten in der untersuchten Bevölkerungsgruppe ebenso viele schädliche Mutationen ausgelöst worden sein, die aber nicht entdeckt

¹⁾ Nach H. Marquardt: „Die Wirkung ionisierender Strahlen auf die Erbkonstitution“, „Schriftenreihe des Bundesministers für Atomfragen, Strahlenschutz Heft 1“ Bergisch Gladbach (1956) beträgt die durchschnittliche spontane Mutationsrate pro Gen und Generation bei der Drosophila: $5 \cdot 10^{-6}$ bis 10^{-5} , bei der Maus $1,33 \cdot 10^{-5}$ bis $2,86 \cdot 10^{-5}$ und beim Menschen $2 \cdot 10^{-5}$ bis $5 \cdot 10^{-5}$.

²⁾ F. Mainx: Münch. Med. Wochenschr. 98, 673 (1956).

³⁾ H. J. Muller: „Genetic damage produced by radiation“, Science 121 (1955), Nr. 3155, Auszug in Atomkernenergie 1, 140 (1956), Nr. 4. Siehe auch: H. J. Muller: „Science in Progress“, Yale Univ. Press, New Haven 7, 93 (1951); Acta Radiol. 41, 5 (1954); Am. J. Obstet. Gynecol. 67, 467 (1954); Radiation Biology, New York (1954), Bd. 1, Kapitel 7 und 8.

werden können, wie aus Experimenten mit anderen Lebewesen nach derartigen Bestrahlungen hervorgeht. Die Ermittlung, wie viele Mutationen als Folge einer bestimmten Strahlungsdosis entstehen, erfordert sehr exakte Verfahren mit möglichst einheitlichem biologischem Material. Die grundlegende Arbeit von *W. L. Russel* in Oak Ridge an Mäusen¹⁾ zeigt, daß nach Verabfolgung gleicher Strahlungsmengen bei Mäusen mindestens zehnmal soviel Mutationen auftreten, wie *Muller* bei Fruchtfliegen, dem bisher am besten untersuchten Material, gefunden hat. Da der Mensch in allen wesentlichen Merkmalen den Mäusen viel näher steht als den Fruchtfliegen, muß das *Russelsche* Ergebnis auch als eine bessere Annäherung an die beim Menschen bestehenden Verhältnisse betrachtet werden, als das, was bei den Fliegenversuchen erhalten wurde. Von diesen Voraussetzungen ausgehend, findet *Muller*, daß bei vorsichtiger Schätzung eine Dosis von 200 rep, wie sie viele Überlebende in Hiroshima erhalten haben dürften, wahrscheinlich bewirkt, daß mindestens jeder Nachkomme durchschnittlich eine Mutation zusätzlich zu den vielen (natürlichen) Mutationen der Vergangenheit erbt. Da die zahlreichen Schädigungen und Todesfälle als Folge der durch Bestrahlung ausgelösten Mutationen über viele Generationen streuen, wird der Gesamtschaden zwar hoch, aber so zersplittert und verdeckt sein, daß die Wirkung auf die Gesamtbevölkerung nicht eindeutig wahrnehmbar und nicht quantitativ und exakt angebar sein kann. Bei den augenfällig in Erscheinung tretenden Wirkungen ergibt sich keine Möglichkeit der sicheren Ursachenzuordnung. Schließlich wird die Erbschädigung im Laufe der Generationen durch „Ausmenden“ und durch das Aussterben der Merkmalsträger verschwinden.

Ergänzend sei noch angeführt, daß nach Keimdrüsenbestrahlungen, die zu zeitweiliger Sterilität und zu einer Keimzellenverminderung führen²⁾, zahlreiche Chromosomenanomalien in den noch oder wieder zeugungsfähigen Spermatozoen auftreten, während die nach einiger Zeit neu gebildeten Samenzellen wieder völlig normal zu sein scheinen³⁾. Aus diesem Grunde wird empfohlen, daß jeder, der einer Keimzellenbestrahlung ausgesetzt war, sich für die Lebensdauer der zu diesem Zeitpunkt bereits reifeteilten Zellen — einige Monate — jeder Zeugung enthält. Außerdem ist es evident, daß in keinem Falle beide Ehepartner in einem strahlungsgefährdeten Betrieb arbeiten sollten.

Im Rahmen dieser Betrachtungen über die genetischen Strahlenauswirkungen scheint auch noch die Erwähnung von sekundären Folgen angebracht, die durch die Mutierung von Genen usw. anderer Lebewesen entstehen können. Hier sind in erster Linie Viren⁴⁾ und Bakterien⁵⁾ zu nennen, also Krankheitserreger, gegen die sich bei der gesamten Menschheit im Laufe der Jahre eine gewisse natürliche Immunisierung vollzogen hat. Diese Krankheitserreger besitzen nur relativ wenige Chromosome bzw. Gene usw., so daß eine einzelne Mutation verhältnismäßig große Umänderungen zur Folge hat⁶⁾. Die durch eine Mutation also praktisch vollkommen neu entstehenden Erreger können Krankheiten hervorrufen, gegen die eine Immunität

¹⁾ W. L. Russel, Cold Spring Harbor Symposia Quant. Biol. **16**, 327 (1952).

²⁾ Über die Verringerung der Anzahl der Spermatozoen pro Volumeneinheit sowie über das „Zurückgehen von Potenz und Libido beim Mann“ siehe Umschau **56**, 516 (1956) sowie Wien. Z. S. Innere Medizin **37**, 210 (1956).

³⁾ W. L. Russel u. a. Genetics **36**, 574 (1951).

⁴⁾ Hinweis auf: R. Gönnert: „Über Virusmorphologie und Virusvermehrung“, Sonderdruck aus Behring Werk Mitt. Nr. 25, sowie G. A. Kausehe und H. Stubbe: Naturwiss. **26**, 270 (1938), **27**, 501 (1939), **28**, 824 (1940).

⁵⁾ Hinweis auf: L. W. Labaw u. a.: „Röntgenstrahlenwirkung auf Bakterien und Bakteriophagen“, J. Bakt. **65**, 330 (1953) sowie Bact. Rev. **11**, 1 (1947), **16**, 31 (1952); Science **123**, 897 (1956); Umschau **59**, 527 (1959).

⁶⁾ Hinweis auf J. P. O'Meara: „Radiation chemistry and sterilisation of biological materials by ionizing radiations“, NU **9**, 19 (1951), Nr. 2.

nicht a priori vorhanden ist, sondern sich erst langsam ausbilden muß. Hierin könnte der Grund für das seuchenartige Auftreten neuer und unbekannter Krankheiten liegen, die dann in einem breiten Zug ganze Länder und Kontinente überfluten. Daß sich die Symptome usw. der durch die Träger der mutierten Gene affizierten Krankheiten gegenüber dem ursprünglichen Symptombild vollkommen ändern können, bedarf kaum noch einer Erwähnung. Insbesondere trifft dies für alle Virus-erkrankungen zu, da ein Virus bei einer Mutation vollkommen „umklappen“ kann¹⁾.

§ 98. Höchst zulässige Bestrahlungsdosen²⁾

Um Personen, die ständig radioaktiver Strahlung ausgesetzt sind, vor Schaden zu bewahren, wurden auf Grund von Erfahrungswerten die sogenannten höchst zulässigen Bestrahlungsdosen festgelegt. Darunter versteht man diejenigen Dosen ionisierender Strahlung, die nach unseren gegenwärtigen Kenntnissen und Erfahrungen aller Voraussicht nach der betreffenden Person während ihrer Lebenszeit keinen merklichen körperlichen oder genetischen Schaden zufügen³⁾. Bei der Betrachtung dieser Frage ist — wie angedeutet — zu berücksichtigen, daß der Mensch durch die Höhenstrahlung, durch radioaktive Verunreinigungen in der Erde und in der Atmosphäre⁴⁾ und durch medizinische Bestrahlungen ständig einer gewissen Aktivität ausgesetzt ist⁵⁾. Es muß streng unterschieden werden zwischen höchst zulässigen Dosen für

- | | |
|------------------------------------|--|
| 1. äußere Exposition ⁶⁾ | a) einmalige kurzzeitige Ganzkörperbestrahlung,
b) einmalige kurzzeitige Teilkörperbestrahlung,
c) langdauernde Strahlenbelastung, |
| 2. Bestrahlung der Keimdrüsen, | |
| 3. innere Bestrahlung, | a) Dauerbelastung,
b) kurzzeitige Einwirkung kurzlebiger Isotope in Notfällen (Katastropheneinsatz). |

Wie in Paragraph 96 ausgeführt, hängen die biologischen Strahlenauswirkungen im allgemeinen stark von der zeitlichen Verteilung der wirksamen Strahlendosis ab. Als Kurzzeitbestrahlung werden alle diejenigen Expositionen bezeichnet, deren Schädigungsausmaß sich bei weiterer Verkürzung der Expositionszeit nicht ändert, bei denen sich also keine Änderung der Strahlenempfindlichkeit während der Exposition bemerkbar macht. In der Strahlenbiologie werden Ganzkörperbestrahlungen von einigen Stunden, ja beim Menschen sogar von einigen Tagen, meist noch als

¹⁾ Siehe auch W. M. Stanley: Chem. and Engng. News vom 21. 12. 1947.

²⁾ Frühere Bezeichnung: Toleranzdosen. Hinweis auf R. R. Plough: "Radiation tolerances and genetic effects", NU 10, 16 (1952), Nr. 8; P. R. Arendt: Atomkernenergie 1, 317 (1956); Bericht der National Academy of Sciences der USA: "Biological effects of radiation", a. a. O.; Berichte des Medical Research Council von Großbritannien: "Hazards to man of nuclear and allied radiations", a. a. O.; Leitartikel in Science vom 20. 7. 1956; "Radiological protection — International Commission recommendations", NU 8, 31 (1951), Nr. 1; "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection and the National Bureau of Standards", Washington, D. C., Handbuch Nr. 47 des Nat. Bureau of Standards; A. G. Istomina und I. B. Keirim-Markus: "Experiments designed to substantiate the maximum permissible doses of thermal neutrons", A/Conf 15/P 2078; "The work of the International Commission on Radiological Protection", A/Conf 15/P 2263; "A summary of data that was used in the revision of the internal dose recommendations of the international commission on radiological protection", A/Conf 15/P 757; L. H. Gray u. a.: "Program of the International Commission on Radiological Units and Measurements", A/Conf 15/P 2243.

³⁾ British J. of Radiology Suppl. 6, London (1955).

⁴⁾ P. King u. a.: "RaD, RaE and Po in the atmosphere", NU 14, 74 (1956), Nr. 6.

⁵⁾ Hinweis auf H. Fritz-Niggli: „Biologische Gefahren kleiner Strahlenmengen“, Phys. Bl. S. 254 (1959), Nr. 6.

⁶⁾ Hinweis auf "Permissible dose from external sources of ionizing radiation", NBS Handbuch 59, Sept. (1954).

nur kurzzeitig wirksam bezeichnet. Das Material, das über die Auswirkungen einer einmaligen Kurzzeitbestrahlung beim Menschen vorliegt, ist relativ spärlich. Einen Überblick¹⁾ auf Grund der bisherigen Erkenntnisse vermittelt **Tabelle XIX, 5**, eine Zusammenfassung der in den Tabellen XIX, 3 und XIX, 4 gemachten Angaben.

Tab. XIX, 5. Kritische (γ -)Bestrahlungsdosen für die einmalige Ganzkörperbestrahlung beim Menschen ohne Berücksichtigung ärztlicher Maßnahmen (Frühschädigungen)

Dosisrichtwerte [r]	Streubereich [r]	Bezeichnung	Charakterisierung
25	20—30	Gefährdungsdosis, Grenzdosis (cortical Dosage)	Klinische Schäden mit einiger Sicherheit ausgeschlossen ²⁾
75	50—150	Kritische Dosis	Strahlenkrankheit, erste Todesfälle
400	300—600	Mittelletale Dosis ¹⁾	Schwere Strahlenkrankheit, die in etwa 50 Prozent aller Fälle zum Tode führt
700	600—1000	Letale Dosis	Fast sicher tödliche Dosis

¹⁾ Als „gefährliche“ Dosen gibt Coopey (Nucl. Sci. Abs. 6, 513 [1952]) an:
Kleintiere: $3 \cdot 10^6$ rep; Insekten: $1,5 \cdot 10^6$ rep; Säugetiere: 100—1000 rep; Mensch: etwa 400 rep.

²⁾ Schädigungen der Frucht bei schwangeren Frauen (vor allem im 2. bis 6. Monat) jedoch nicht unmöglich.

In sehr vielen Fällen, sowohl bei Kurzzeitbestrahlungen (Unfälle) als auch bei Dauerbelastungen (Beruf), erfolgt — wie in Paragraph 96 angedeutet — die Durchstrahlung des Körpers nicht gleichmäßig; einmal geht die Strahlung meist von einer mehr oder weniger ausgedehnten Quelle aus, und andererseits wird ein Teil der Strahlung durch irgendwelche Gegenstände, durch die Kleidung oder gar durch den Körper selbst abgeschirmt. In den meisten Fällen liegt also eine inhomogene Dosisverteilung vor. Da außerdem die einzelnen Stellen des Körpers, die verschiedenen Organe usw., eine unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit besitzen, läßt sich eine Norm für die Übertragung der hinsichtlich der Ganzkörperbestrahlung gewonnenen Erkenntnisse nicht aufstellen; man weiß jedoch aus der Strahlentherapie, daß lokale Bestrahlungen von Tumoren mit einer Herddosis von 3000 bis 5000 r und daß lokale Bestrahlungen in der Oberflächentherapie bis zu 10000 r im allgemeinen keine bedrohlichen Auswirkungen zeitigen, obgleich der Gesamtorganismus in Mitleidenschaft gezogen wird. Die Festlegung von höchst zulässigen Bestrahlungsdosen für die Teilkörperbestrahlung schlechthin ist also, wie diese kurzen Ausführungen zeigen, außerordentlich problematisch. Es sei daher nur angeführt, daß die Standard-Haut-Erythemdosis (HED nach *Wintz*) bei einer Röntgenstrahlung von 180 kV — in 23 cm Abstand hinter 0,5 mm Kupfer und 1 mm Aluminium bei einem Tubusfeld von $6 \cdot 8$ cm² gemessen — exakt 550 r beträgt. Sie bewegt sich zwischen 200 r für weiche und 2000 r für sehr harte Röntgenstrahlung.

Eine langandauernde äußere Strahlenbelastung liegt dann vor, wenn eine Exposition kontinuierlich oder in kurzen Zeitabständen erfolgt. Die Festsetzung einer höchst zulässigen Dosis hierfür erfordert einmal hinreichende Kenntnisse über die Wirkung schwacher Dauerbestrahlungen und andererseits die Beantwortung der schon angeschnittenen Frage der natürlichen Strahlenbelastung auf Grund der Um-

¹⁾ Siehe B. Rajewsky a. a. O.

den Strahlenschutz in nichtmedizinischen Radiumbetrieben¹⁾ Gültigkeit. Im Hinblick auf Arbeitszeit, Schutzalter, Urlaub und ärztliche Überwachung war außerdem die „Verordnung zum Schutze gegen Schädigungen durch Röntgenstrahlen und radioaktive Stoffe in nichtmedizinischen Betrieben“, die „Röntgenverordnung“ vom 7. 2. 1941²⁾, durchzuführen. Der Geltungsbereich der Röntgenverordnung erstreckte sich auch auf die Materialprüfung mit radioaktiven Stoffen³⁾. Den offiziellen Vorschriften zufolge besitzt in Deutschland heute noch die vor etwa 30 Jahren vorgeschlagene *Mutscheller-Dosis*⁴⁾ von 0,25 rem/Tag (äußere Ganzkörperbestrahlung) allgemeine Gültigkeit; eine Bedeutung besitzen diese Vorschriften jedoch heute nicht mehr, da die einzelnen Länder von sich aus entsprechende Gesetze und Rechtsverordnungen erlassen haben, die neue und wesentlich geringere höchst zulässige Bestrahlungsdosen — in enger Anlehnung an die weiter unten näher umrissenen Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) — vorschreiben. Es ist jedoch vorgesehen, daß diese Landesregelungen demnächst durch eine einheitliche Regelung ersetzt werden. In den USA erlaubte bis vor kurzem das National Committee on Radiation Protection 0,1 rem pro Tag bei maximal 0,3 rem pro Woche⁵⁾. Die US Atom-Energie-Kommission gestattete für alle in ihrem Bereich Beschäftigten maximal 15 rem pro Jahr. In der Sowjetunion war eine höchst zulässige Tagesdosis von 50 mrem als Grundstandard angesetzt⁶⁾. Die Abbildungen XIX, 1, XIX, 2 und XIX, 3 zeigen den γ -, den β - und den Neutronenfluß — abhängig von der Teilchenenergie —, der die alte Grund-Toleranzdosis von 7 mrem/h bewirkt. 7 mrem/h entsprechen 0,3 rem pro 40 Stunden (1 Woche) oder 0,060 rem pro Tag (8 Stunden). Unter Zugrundelegung allein der 0,3 rem Wochendosis für die Ganzkörperbestrahlung ergäbe es sich, daß ein Arbeiter an einer Reaktoranlage 150 Wochen — rund 3 Jahre — lang mit seiner normalen Tätigkeit aussetzen müßte, wenn er durch einen unglücklichen Umstand, z. B. bei einer Schirmbildaufnahme, 45 r aufgenommen hätte.

Grundnormen der ICRP⁷⁾

Die neuesten Grundnormen des Strahlenschutzes wurden im Jahre 1958 von der International Commission on Radiological Protection (ICRP) aufgestellt. Sie sind

¹⁾ DIN Rönt 8/1937, als Nachdruck DIN 6708 vom Juli 1948.

²⁾ Reichsgesetzblatt I, 88 (1941).

³⁾ Statt einer Bauartprüfung der Strahlengeber war z. B. eine jährliche Überprüfung auf Emanationsdichtigkeit und an Stelle eines Fabrikshildes eine dauerhaft angebrachte Kenn-Nummer vorgeschrieben. Diese Sicherheitsvorschriften haben heute noch Gültigkeit. Sie sind jedoch ergänzungsbedürftig, weil die bereits in großem Ausmaß verwendeten künstlich radioaktiven Isotope und die Entwicklungsarbeiten zur Ausnutzung der Atomkernenergie für friedliche Zwecke nicht einbegriffen sind. Die Berufsgenossenschaften sind daher schon gemäß § 848 a RVO gehalten, die erforderlichen Vorschriften zu erlassen. (Hinweis auf die Empfehlungen der internationalen Kommission für Strahlenschutz von 1954 sowie auf Taylor: "The achievement of radiation protection by legislation and other means", A/Conf 8/P 319 sowie 79, 89, 451 und 903.) In Aussicht genommen ist, die geschlossenen radioaktiven Stoffe, die hauptsächlich zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung verwendet werden, getrennt zu behandeln und für das Arbeiten mit offenen radioaktiven Stoffen in nichtmedizinischen Betrieben besondere Vorschriften herauszugeben. Siehe auch R. Berthold: Atomwirtschaft 88, (1957), Nr. 3; H. Holthusen: Atomkernenergie 4, 257 (1959), Nr. 7/8.

⁴⁾ Reichsgesetzblatt I, 88 (1941). Siehe auch Z. VDI. 85, 947 (1941).

⁵⁾ Nach G. H. Whipple (Mech. Engng. 79, 253 (1957), Nr. 3) bewirkt eine Wochendosis von 0,3 r — bei Aufnahme während des gesamten Arbeitslebens — eine Verkürzung der Lebenserwartung um 3 Jahre. Hinweis auf P. Alexander: "Atomic radiation and life", Penguin (1957).

⁶⁾ Vgl. N. G. Gussjew: „Handbuch für radioaktive Strahlen und Strahlenschutz“ (russisch), Moskau, Staatsverlag für medizinische Literatur (Medgiz) (1956).

⁷⁾ Nach R. G. Jaeger: Atomwirtschaft 4, 314 (1958), Nr. 8/9, Atomkernenergie 4, 262 (1959), Nr. 7/8, Phys. Bl. S. 159 (1959), Nr. 4; J. Zakovsky: Atomkernenergie 4, 322 (1959), Nr. 7/8.

Die neuen "International recommendations of radiological protection" der ICRP sollen in Kürze bei der Pergamon Press in New York erscheinen.

Abb. XIX, 1.
 γ -Fluß zur Bewirkung einer
 Bestrahlungsdosis von 7,5 mrep/h¹).

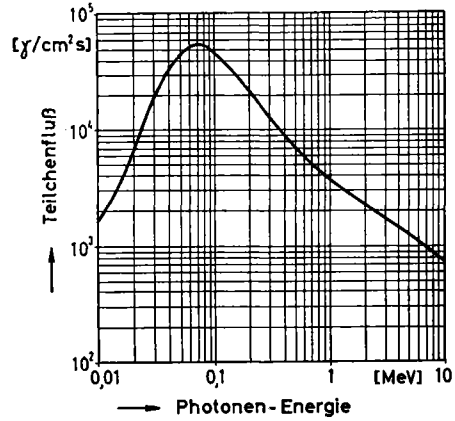


Abb. XIX, 2.
 β -Fluß zur Bewirkung einer
 Bestrahlungsdosis von 7,5 mrem/h²).

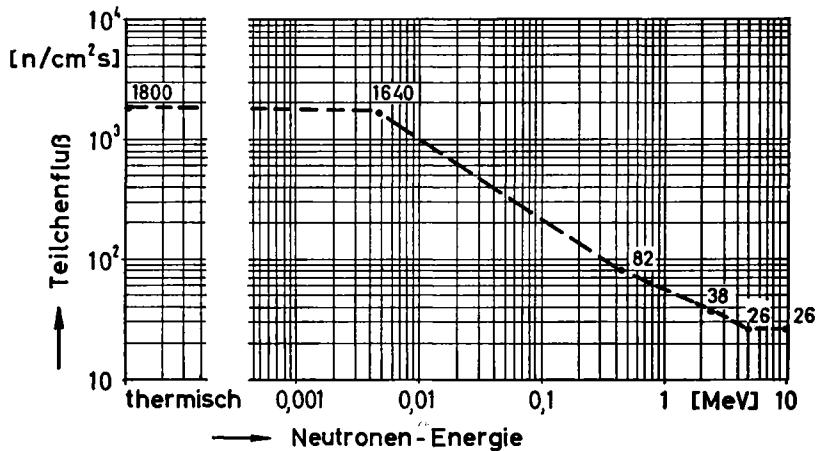
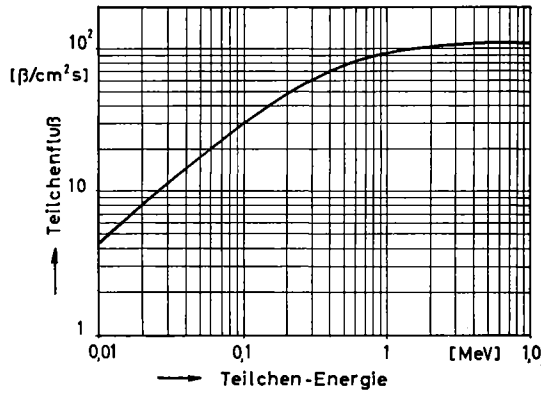


Abb. XIX, 3. Neutronenfluß zur Bewirkung einer Bestrahlungsdosis von 7,5 mrem/h³).

¹) Nach R. Stephenson a. a. O.
²) Nach K. Z. Morgan: TID-5031 (1951). β -Teilchen mit Energien unter 0,068 MeV können die Haut nicht durchdringen.
³) Nach W. S. Snyder und J. Neufeld: Nuclear Sci Abstracts 7, 734, (1953).

auch in den Euratom-Ländern verbindlich und dienen somit als Grundlage für die zukünftigen deutschen Strahlenschutzbestimmungen. Die bis noch vor wenigen Jahren bestehende Annahme, daß es eine täglich, wöchentlich oder jährlich zulässige Dosis gebe, die bei ständiger Einhaltung keinerlei nachweisbare gesundheitliche Nachteile verursacht und die, wie angedeutet, in den früheren Strahlenschutzempfehlungen eine maßgebende Rolle spielte, wurde fallen gelassen. Maßgeblich hierfür war vor allem das in den Vordergrund-Treten genetischer Gesichtspunkte. Vom Standpunkt der Genetik aus ist diejenige Dosis maßgebend, die der Organismus während der gesamten Generationszeit, d. h. von der Konzeption bis zur Vollendung z. B. des 30. Lebensjahres, erhält, bis zu dem nach bevölkerungsstatistischen Erhebungen die Hälfte aller Kinder geboren wird. In den neuen Grundnormen geht man daher nicht mehr z. B. von einer Wochen-, sondern von einer Langzeitdosis aus und leitet davon die in kürzeren Zeiträumen zulässigen Werte ab. Dabei wurde — aus ohne weiteres einzusehenden Gründen — zwischen äußerer und innerer Bestrahlung sowie verschiedenen Bevölkerungsgruppen

1. beruflich strahlenexponierte Personen,
2. besonders gefährdete Bevölkerungsgruppen,
3. Gesamtbevölkerung

unterschieden. Für jede dieser Gruppen wurden besondere Normen aufgestellt, die nachstehend kurz umrissen seien.

Äußere Bestrahlung

Beruflich strahlenexponierte Personen

a) Ganzkörperbestrahlung. Für die Generationszeit bis zum 30. Lebensjahr beschränkte man die insgesamt zulässige Dosis für den Kreis der beruflich an einem durch einen Strahlenschutzbeauftragten¹⁾ ständig kontrollierten Platz²⁾ beschäftigten Personen auf 60 rem. Für die zeitliche Dosisverteilung, für die Akkumulation der Strahlung, gilt für die kritischen Organe die Beziehung

$$D = 5 \cdot (N - 18) \text{ [rem]}, \quad (\text{XIX/3})$$

mit dem Lebensalter N . Als kritische Organe sind bei der Ganzkörperbestrahlung die blutbildenden Organe (Milz und Knochenmark), die Keimdrüsen, sowie die Augenlinsen anzusprechen, für die demnach 5 rem pro Jahr als höchstzulässige Dosis angesetzt wurden. Die sich aus (XIX/3) ergebenden jährlichen Dosisstufen sind in **Abbildung XIX/4** für einen Beginn der Strahlentätigkeit mit 18 und mit 25 Jahren gegen das Lebensalter aufgetragen.

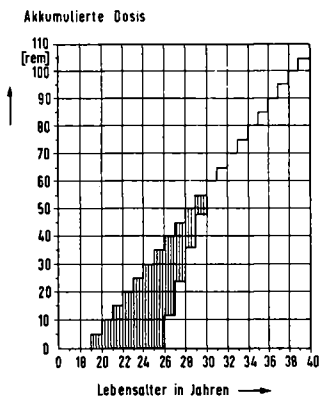


Abb. XIX, 4. Akkumulierung der Dosis gemäß Gleichung (XIX/3)

¹⁾ Englisch: Radiation safety officer.

²⁾ Hinweis auf R. G. Jaeger: *Atomkernenergie* 2, 223 (1957); H. Muth: *Umschau* 57, 754 (1957), Nr. 24; National Academy of Sciences (Herausgeber): "The biological effects of atomic radiation — summary report", Washington, D.C. (1956).

Die Verteilung der Strahlenbelastung auf kürzere Zeiträume wird durch diese Regelung viel freizügiger als bei der früheren höchst zulässigen Wochendosis. Die Maximaldosis soll jedoch auf 3 rem in 13 aufeinanderfolgenden Wochen beschränkt bleiben; eine Einzeldosis von 3 rem soll in Ausnahmefällen gestattet sein. Bei einem Beginn der Strahlentätigkeit nach dem 18. Lebensjahr darf die akkumulierte Jahresdosis maximal 12 rem betragen, wie in **Abbildung XIX/4** für den Beginn der Strahlenarbeit mit 25 Jahren angezeigt. Mit dem 30. Lebensjahr wird dann in 5 Sprüngen zu je 12 rem die gleiche akkumulierte Dosis von 60 rem erreicht wie im Vergleichsfall; anschließend verläuft die zulässige Strahlenexposition wieder nach der Beziehung (XIX/3). In der Mehrzahl der technischen und medizinischen Betriebe werden derartige Notwendigkeiten zwar nicht oder kaum vorkommen; für Spezialarbeiten in Reaktor- oder chemischen Aufbereitungsanlagen usw. können solche Ausgleichsmöglichkeiten jedoch von Wichtigkeit sein. Dieser vergrößerten Freizügigkeit steht aber auf der anderen Seite eine Verringerung der mittleren Wochendosis gegenüber, die jetzt nicht mehr 0,3, sondern $5/50 = 0,1$ rem beträgt, und für die nunmehr alle Strahlenschutzeinrichtungen bzw. Abschirmungen eingerichtet werden müssen. Die γ -, β - und Neutronenflüsse, die diese Dosis bewirken, lassen sich sehr leicht aus den **Abbildungen XIX, 1, XIX, 2 und XIX, 3** entnehmen.

Es sei vermerkt, daß durch diese Herabsetzung der höchst zulässigen Wochendosis theoretisch eine Verstärkung der biologischen Abschirmung um eine halbe Zehntelwertschicht¹⁾, entsprechend etwa 130 mm Beton der Dichte 2,3 g/cm³, erforderlich wird. Da der Schwächungsfaktor der biologischen Abschirmung bei den heute üblichen Reaktorleistungen größenordnungsmäßig 10^{-8} bis 10^{-13} beträgt, liegt die theoretisch erforderliche Verstärkung jedoch innerhalb des Sicherheitsfaktors²⁾, der schon immer bei Schwächungen in dieser Größenordnung vorgesehen worden sein sollte, so daß sich die tatsächliche Ausführung einer derartigen Verstärkung in den meisten Fällen erübrigen dürfte. Direkte Folgerungen aus der neuen Norm dürften sich jedoch z. B. für provisorische Abschirmungen und für Isotopenbehälter ergeben.

Die neuen Grundnormen machen außerdem eine dauernde meßtechnische Überwachung der von den Beschäftigten aufgenommenen Dosis notwendig, um eine Kontrolle für den richtigen Dosisausgleich in 13 Wochen bzw. einem Jahr zu gewinnen. Auch das bereitet einerseits betriebliche Erschwernisse, dürfte aber andererseits vom sicherheitstechnischen Standpunkt aus zu begrüßen sein.

Bei besonders schwierigen Arbeiten ist eine sogenannte gewollte Dosis (emergency dose) zulässig, die aber als einmalige Einzeldosis während der Lebenszeit auf 12,5 rem beschränkt ist und bei der Berechnung der insgesamt akkumulierten Dosis mit Hilfe von (XIX/3) berücksichtigt werden muß; der Ausgleich der Überbelastung muß innerhalb von 5 Jahren erfolgen. Wird bei einem Unfall eine höhere Einzeldosis aufgenommen, so sind keine besonderen ärztlichen Maßnahmen erforderlich, wenn sich diese Dosis (accident dose) in den Grenzen bis zu 25 rem hält. Auch sie ist als einmalige Dosis im Leben anzusehen und muß gleichfalls in (XIX/3) eingerechnet werden.

b) Teilkörperbestrahlung. Handelt es sich um weichere Strahlen, die in erster Linie nur die Haut treffen, und bei denen bis zu den kritischen Organen hin bereits eine merkliche Schwächung eintritt, so gilt — analog zur Gleichung (XIX/3) — die Beziehung

$$D = 10(N - 18) \text{ [rem]}; \quad (\text{XIX/4})$$

¹⁾ Siehe Gleichung (V/13).

²⁾ Siehe § 102.

für diesen Fall ist also die doppelte Strahlenexposition zulässig. Im übrigen gelten für die Teilkörperbestrahlung — unter Einhaltung der durch (XIX/3) gegebenen höchst zulässigen Dosen — die folgenden Richtwerte:

äußere Bestrahlung der Extremitäten (Hände, Unterarme, Füße, Knöchel)	20 rem in 13 Wochen, 75 rem pro Jahr;
äußere Bestrahlung der Haut in ihrer Gesamtheit	8 rem in 13 Wochen, 30 rem pro Jahr;
Bestrahlung der inneren Organe mit Ausnahme der blutbildenden Organe, der Keimdrüsen und Augenlinsen	4 rem in 13 Wochen, 15 rem pro Jahr.

Besonders gefährdete Bevölkerungsgruppen

Als besonders gefährdete Bevölkerungsgruppen seien aufgeführt:

- Personen, die sich auf Grund ihrer Tätigkeit gelegentlich im Kontrollbereich aufhalten, aber nicht als „beruflich strahlenexponierte Personen“ betrachtet werden. Richtwert: 1,5 rem pro Jahr;
- Personen, die mit Geräten usw. umgehen, welche ionisierende Strahlen aussenden oder radioaktive Stoffe in solchen Mengen enthalten, daß die ausgesandten Strahlungen keine Überschreitung der für diese Personenkategorie höchstzulässigen Dosen zur Folge haben. Richtwert: 1,5 rem pro Jahr;
- Personen, die sich vorwiegend in der Nachbarschaft des Kontrollbereichs aufhalten und aus diesem Grunde einer höheren Bestrahlung ausgesetzt sein können als für die Gesamtbevölkerung festgesetzt worden ist. Richtwert: 0,5 rem pro Jahr.

Gesamtbevölkerung

Die der Gesamtbevölkerung maximal zugemutete Dosis wird für den Bereich der Keimdrüsen angegeben und darf nach den Grundsätzen der Genetiker die Höhe der natürlichen Grundstrahlung von im Mittel 3 rem in 30 Jahren nicht wesentlich überschreiten. Die zusätzliche Bestrahlung muß auf 5 rem im gleichen Zeitraum beschränkt bleiben. Hierbei bleiben Dosen infolge ärztlicher Untersuchungen und Behandlungen außer Betracht.

Innere Bestrahlung

Bei den Empfehlungen für die höchstzulässigen Inkorporationsdosen¹⁾ wurde von einer maximal zulässigen Körperdosis q und einer maximal zulässigen Konzentration MZK²⁾ der Aktivität in Luft, Wasser und Nahrung ausgegangen, die folgenden Bedingungen genügen müssen:

- Die biologische Wirkung der inkorporierten radioaktiven Kerne wird zu einem Teil auf die Wirkung von Ra²²⁶ bezogen, wobei man die Werte von MZK und q für eine kontinuierliche berufliche Strahlenbelastung so beschränkt, daß die biologische Äquivalentdosis für die Knochen diejenige Dosis nicht überschreitet, die mit der Ablagerung von 0,1 μg Ra²²⁶ und seiner Folgeprodukte in den Knochen verbunden wäre.
- Die Werte von MZK und q müssen so gewählt werden, daß die biologische Äquivalentdosis für die meisten kritischen Körperorgane infolge kontinuierlicher Strahlenberufstätigkeit 0,3 rem pro Woche, gemittelt über 13 Wochen, nicht überschreitet. Dabei sind Knochen, Haut, Schilddrüse, Gonaden und Gesamtkörper ausgenommen.
- Die Werte von MZK und q müssen so gewählt werden, daß die biologische Äquivalentdosis für die Gonaden oder den Gesamtkörper 0,1 rem pro Woche, gemittelt über 13 Wochen, nicht überschreitet, und daß die mittlere Dosis bis zum Alter von N Jahren durch Gleichung (XIX/3) beschränkt wird.

¹⁾ Englisch: Internal dose.

²⁾ Englisch: MPC = Maximal permissible concentration.

Bei den neuen Berechnungen wurde angenommen, daß nicht — wie bisher immer zugrunde gelegt — 55 Prozent, sondern nur 30 Prozent der Tochterprodukte von Ra²²⁶ im Körper zurückgehalten werden. Daher müssen als mittlere Strahlungsenergie für Ra²²⁶ und seine Tochterprodukte 110 MeV — statt bisher 162 MeV — angesetzt werden. Für die maximal zulässige Körperbelastung knochensuchender Aktivitäten ergibt sich damit die Beziehung

$$q = \frac{0,1 \cdot 0,99}{f_2} \cdot \frac{110}{\sum W \cdot (\text{RBW}) \cdot n} = \frac{11}{f_2 \cdot \sum W \cdot (\text{RBW}) \cdot n}, \quad (\text{XIX}/5)$$

mit dem Anteil f_2 der betreffenden Aktivität in den Knochen, bezogen auf den im Gesamtkörper, mit der pro Zerfall eines dieser Kerne im Knochen umgesetzten Energie W , mit der relativen biologischen Wirksamkeit RBW der Strahlung, mit dem relativen Gefährdungsfaktor n und den Werten $f_2 = 0,99$ und $q = 0,1$ für Ra²²⁶.

Die Reduktion auf 30% Ra²²⁶-Folgeprodukte führt dazu, daß die Wochendosis für die Knochen von 0,82 auf 0,56 rem herabgesetzt wird; in beiden Fällen ist die RBW gleich 10 gesetzt. *Morgan* empfiehlt, daß die höchstzulässigen Aktivitätskonzentrationen für alle knochensuchenden Aktivitäten, abgesehen von denjenigen, die lediglich Röntgen- oder γ -Strahlen aussenden, auf Grund des Radiumwertes berechnet werden. Man muß bei Umrechnungen beachten, in welchen Fällen auf eine zulässige Höchstbelastung von 0,6, 0,3 oder 0,1 rem pro Woche bezogen worden ist. Nach *Morgan* wurde in den in **Tabelle XIX, 7** aufgeführten Fällen der Wert 0,6 rem gewählt, bei denen Haut oder Schilddrüse die kritischen Organe sind. Die eingeklammerten Zahlen geben an, ob das betreffende Organ als 1. oder als 2. kritisches Organ anzusehen ist.

Tab. XIX, 7. Kerne und kritische Organe mit einer MZK von 0,6 rem/Woche

Haut	Schilddrüse
Si (1.)	J (1.)
S (1.)	Re (1.)
Re (2.)	At (1.)
	Sn (2.)

0,1 rem/Woche gilt als Bezugswert für diejenigen Aktivitäten, bei denen der Gesamtkörper als kritisches Organ anzusehen ist; die entsprechenden Kerne sind in **Tabelle XIX, 8** zusammengestellt.

Tab. XIX, 8. Kerne, für die der Gesamtkörper erstes kritisches Organ ist, für das eine MZK von 0,1 rem/Woche als zulässig empfohlen wurde

Auf Grund der „Elementverteilung“	Auf Grund von „Submersions“-Werten	Auf Grund der „Dosisverteilung“		
H ³	A ³⁷	Be ⁷	As ⁷⁴	Cs ¹³¹
Na ²²	A ⁴¹	P ³²	As ⁷⁶	Cs ^{134m}
Na ²⁴	Kr ^{85m} + Kr ⁸⁵ (19%)	S ³⁵	As ⁷⁷	Cs ¹³⁴
Cl ³⁶	Kr ⁸⁵ (81%)	K ⁴²	Rb ⁸⁶	Cs ¹³⁶
Br ⁸²	Kr ⁸⁵	Co ⁵⁷	Zr ⁹⁵	Cs ¹³⁷
	Kr ⁸⁷	Co ^{58m}	Nb ⁹⁵	Ba ¹³¹
	X ¹³¹	Co ⁵⁸	Tc ^{99m} + Tc ⁹⁹	Re ¹⁸³
	X ¹³³	Co ⁶⁰	Ag ¹⁰⁵	W ¹⁸⁷
	X ¹³⁵ + Cs ^{135m}	Zn ⁶⁵	Ag ^{110m}	Au ¹⁹⁶
		As ⁷³	Sb ¹²²	

In Tabelle XIX, 8 sind auch Edelgase aufgeführt, deren höchst zulässige Konzentrationen auf Grund der Annahme berechnet werden, daß der Körper in einer radioaktiven Wolke untertaucht, wobei jedoch nicht, wie früher, der Vollraum, sondern der Halbraum zugrunde gelegt ist, so daß sich die neuen MZK-Werte gegenüber den älteren um den Faktor $\frac{2}{3}$ reduzieren. Die Angaben für die Edelgase sind durch die Bezeichnung „Submersion“ charakterisiert. Hierbei können auch andere relativ inerte Gase einbezogen werden, wobei jedoch vorausgesetzt wird, daß sie β - oder γ -Strahlen genügender Energie emittieren, die imstande sind, die Epidermis zu durchdringen und eine Ganzkörperbestrahlung ergeben. Von dieser Berechnungsweise wurden das H^3 - und das $C^{14}O_2$ -Molekül ausgenommen, bei denen wegen der geringen Energie der β -Strahlung ($W_\beta = 0,0189$ MeV für H^3 und $0,155$ MeV für C^{14}) von einer Lungenbestrahlung ausgegangen wird. Beim N^{13} -Molekül dagegen, mit $W_\beta = 1,24$ MeV, wurde die Submersions-Rechnung vorgeschrieben.

Bei der unter „Element-Verteilung“ zusammengestellten Gruppe werden die einzelnen Kerne so gleichförmig über den gesamten Körper verteilt, daß man eine Gesamtkörperbelastung annehmen muß. Die größte Gruppe findet sich unter „Dosisverteilung“, die 29 von 44 Kernen umfaßt. Zu ihr gehören alle diejenigen Kerne, bei denen eine Wochendosis zwischen 0,1 und 0,3 rem für ein bestimmtes Organ zugrunde gelegt wird, wie Knochen, Leber, Nieren, Milz usw., wobei der Gesamtkörper eine Wochendosis von 0,1 rem erhält. Bei diesen Kernen ist also nicht der gesamte Körper das kritische Organ, aber die für den Gesamtkörper zulässige Wochendosis von 0,1 rem ist kleiner als die Wochendosis von 0,3 bis 0,6 rem, die für die anderen Organe zugelassen ist.

Während in den früheren Empfehlungen der Zeitraum für die berufliche Strahlenbelastung mit 70 Jahren angesetzt wurde, erfolgt in den neuen Empfehlungen von

Tab. XIX, 9. Kerne, bei denen während der Bestrahlungszeit bei kontinuierlicher MZK-Zufuhr das Gleichgewicht nicht erreicht wird

Kernladungszahl Z	Kern	Halbwertszeit in Jahren			Erreichter Prozentsatz vom Gleichgewicht	
		Physikalisch	Biologisch	effektiv	nach 50 Jahren	nach 70 Jahren
38	Sr^{96}	28	200	24,6	76	86
88	Ra^{226}	1622	200	43,8	56	67
89	Ac^{227}	21,8	200	19,7	83	91
90	Th^{230}	$8,0 \cdot 10^4$	200	200	16	22
90	Th^{232}	$1,39 \cdot 10^{10}$	200	200	16	22
93	Np^{237}	$2,20 \cdot 10^6$	200	200	16	22
94	Pu^{238}	89,6	200	61,9	43	54
94	Pu^{239}	$2,44 \cdot 10^4$	200	198	16	22
94	Pu^{240}	$6,6 \cdot 10^3$	200	194	16	22
94	Pu^{241}	13,2	200	12,4	94	98
94	Pu^{242}	$3,8 \cdot 10^5$	200	200	16	22
95	Am^{241}	462	200	140	22	29
95	Am^{243}	$8 \cdot 10^3$	200	195	16	22
96	Cm^{243}	35	200	29,8	69	80
96	Cm^{244}	18,4	200	16,8	87	94
96	Cm^{245}	$2 \cdot 10^4$	200	198	16	22
96	Cm^{246}	$6,6 \cdot 10^3$	200	194	16	22
98	Cf^{249}	$4,7 \cdot 10^2$	200	140	22	29
98	Cf^{250}	10	200	9,52	97	99

1958 eine Beschränkung auf 50 Jahre. Dadurch wird die Anzahl der Kerne, bei deren — nach den Empfehlungen erlaubter — Inkorporation kein radioaktives Gleichgewicht gemäß $(1 - \exp - \{0,693 t/T\}) \approx 1^1)$ während der 50 Arbeitsjahre erreicht wird, auf 19 erhöht. Diese 19 Isotope sind in **Tabelle XIX, 9** zusammengestellt.

Im allgemeinen beträgt für Lunge, G I-Trakt, Niere, Milz, Muskeln usw. die maximal zulässige biologische Äquivalentdosis 0,3 rem pro Woche. Die dadurch in den kritischen Organen bis zum 70. Lebensjahr akkumulierte Gesamtdosis zeigt **Tabelle XIX, 10**.

Die dadurch auftretenden Gefährdungen sind, obwohl einige Werte recht hoch erscheinen, nach *Morgan* vielleicht jedoch nicht größer als die Berufsfährdung beim

Tab. XIX, 10. Bezugs-Wochendosen der MZK und Lebensdosen, die in den kritischen Organen bis zum 70. Lebensjahr akkumuliert werden

Kritisches Organ	Wochendosis (über 13 Wochen zu mitteln) [rem]	Akkumulierte 70-Jahres-Dosis [rem]
Knochen	0,56	1520
Haut und Schilddrüse .	0,6	1630
Ganzkörper und Gonaden	0,1	271
Alle anderen Organe . .	0,3	815

Maler, Schweißer, Taxifahrer usw. *Morgan* weist in diesem Zusammenhang darauf hin, daß die gesamte Strahlenbelastung der Mitarbeiter im ORNL im Mittel weniger als 5 Prozent der neuen Werte beträgt.

Die entsprechenden höchst zulässigen Dosiswerte für die in der Nachbarschaft kontrollierter Bezirke ansässigen bzw. tätigen Personen ergeben sich durch Multiplikation der für die am kontrollierten Platz selbst beschäftigten Personen gültigen Dosiswerte mit dem Faktor 1/30. Für die Gesamtbevölkerung ist mit 1/100 zu multiplizieren.

Ergänzend sei noch vermerkt, daß den früheren Werten für äußere und innere Bestrahlung z. T. die Annahme einer Arbeitszeit von 24 Stunden pro Tag und 7 Tagen pro Woche zugrunde lag; bei den neuen Empfehlungen wurde von der 40-Stunden-Woche ausgegangen; zusätzlich sind jedoch in den neuen Empfehlungen auch Werte für eine kontinuierliche Bestrahlung (168 h/Woche) angegeben, die sich etwa um einen Faktor drei von denen für die 40-Stunden-Woche unterscheiden.

In den früheren Empfehlungen der ICRP waren die maximal zulässigen Konzentrationen der verschiedenen Aktivitäten im Gesamtkörper, im Trinkwasser und in der Luft angegeben. Auch in den neuen „Recommendations“²⁾ sind entsprechende Angaben vorgesehen. Die bisher gültigen Werte können also dort (und z. B. bei *Rajewsky*³⁾) nachgeschlagen und im Bedarfsfalle auf die neuen Werte umgerechnet werden. Von einer Wiedergabe sei jedoch abgesehen. Stattdessen sind in **Tabelle XIX, 11** alle z. Zt. gültigen Empfehlungen, Gesetze, Verordnungen, Unfallverhütungsvorschriften, Normen usw. aufgeführt, die z. Zt. in Deutschland Gültigkeit besitzen.

¹⁾ Siehe §§ 16 und 21.

²⁾ Erscheinung: New York, Pergamon Press (1959).

³⁾ B. Rajewsky a. a. O.

Tab. XIX, 11. In Deutschland gültige Empfehlungen, Gesetze, Verordnungen, Unfallverhütungsvorschriften, Normen usw. über den Strahlenschutz

A) Internationale Empfehlungen

Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) (Empfehlungen der Internationalen Kommission für den Strahlenschutz):

1. London 1950, Fortschr. Röntgenstr. **78**, 494 (1953).
2. Kopenhagen 1953, in Übersetzung als Sonderdruck der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt mit den Berichten der Unterkommissionen veröffentlicht.
 - I. Zulässige Dosis bei äußerer Bestrahlung.
 - II. Zulässige Dosis bei innerer Bestrahlung.
 - III. Schutz gegen Röntgenstrahlen mit Spannungen bis 2 Millionen Volt.
 - IV. Schutz gegen Röntgenstrahlen mit Spannungen über 2 Millionen Volt und gegen Beta- und Gammastrahlen.
 - V. Schutz gegen schwere Teilchen einschl. Neutronen und Protonen.
 - VI. Beseitigung radioaktiver Abfälle; Umgang mit radioaktiven Isotopen.
3. New York und Genf 1958 (in Vorbereitung).

B) Gesetze und Verordnungen¹⁾

1. Euratom, Communauté Européenne de l'Energie Atomique. Projet des Directives fixant les Normes de Base à la protection de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des radiations ionisantes, Brüssel, 9. 10. 1958.
2. Gesetz zur Änderung der Titel I—IV, VII und X der Gewerbeordnung vom 23. September 1953. Bundesgesetzblatt **I**, 1459 (1953).
3. Verordnung zum Schutze gegen Schädigung durch Röntgenstrahlen und radioaktive Stoffe in nichtmedizinischen Betrieben (Röntgenverordnung) vom 7. 2. 1941. Reichsgesetzblatt **I**, 88 (1941).
4. Erste Verordnung zum Atomgesetz (Strahlenschutzverordnung), Gesetz- und Verordnungsblatt für Berlin **14**, 1029 (1958), Nr. 65.

C) Unfallverhütungsvorschriften (UVV) und Richtlinien

1. UVV der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege. Richtlinien für die Verhütung von Berufskrankheiten und Unfällen bei der Anwendung und Lagerung radioaktiver Stoffe in medizinischen Betrieben (Ausgabe 1956 — R VIII/56) (geschlossene und offene Präparate).

2. UVV der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik (Okt. 1955); Strahlen: Abschn. 22.

Richtlinien des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaft (1957) (geschlossene radioaktive Strahler mit Ausnahme der medizinischen Anwendung).

3. Deutsche Röntzengesellschaft: Richtlinien für die Anwendung offener radioaktiver Präparate (vor allem künstlicher, radioaktiver Isotope) in medizinischen Betrieben. Fortschr. Röntgenstr. **76**, 256 (1952).

4. Amerikanische Richtlinien

Handbooks des US-Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington, D.C.

D) Normen

1. DIN 6804: Vorschriften für den Strahlenschutz in medizinischen Radiumbetrieben (in Überarbeitung); noch gültig: DIN Rönt 4/1933.
2. DIN 6808: Vorschriften für den Strahlenschutz in nichtmedizinischen Radiumbetrieben (in Überarbeitung); noch gültig: DIN Rönt 8/1937.
3. DIN 6809: Röntgen- und Gammastrahlen in Medizin und Biologie, Regeln für die Dosimetrie. (Vornorm); (1958).
4. DIN 6811: Medizinische Röntgeneinrichtungen bis 250 kV; Strahlenschutzregeln für die Herstellung (1954).
5. DIN 6812: Medizinische Röntgenanlagen bis 250 kV; Strahlenschutzregeln für die Errichtung (1954).
6. DIN 6813: Röntgenschutzkleidung; Regeln für die Herstellung (1954).
7. DIN 6814: Röntgentechnik; Begriffe (1956).
8. DIN 6815: Strahlenschutzprüfungen bei Röntgenstrahlern für medizinische Anwendung bis 250 kV; Regeln (in Vorbereitung).
9. DIN 54113: Technische Röntgeneinrichtungen und -anlagen bis 300 kV. Strahlenschutzregeln (Ersatz für DIN 6806).
10. DIN 54114: Strahlenschutzprüfungen bei Röntgenstrahlern für nichtmedizinische Anwendung bis 300 kV; Regeln (in Vorbereitung).
11. DIN 6843: Strahlenschutz beim Arbeiten mit radioaktivem Material in offener Form in medizinischen Betrieben; Regeln (1957).

E) Merkblätter

Deutsche Gesellschaft für Arbeitsschutz e. V. Frankfurt/Main, Mainzer Landstr. 178. Merkblatt zur ärztl. Überwachung von Beschäftigten in Strahlenbetrieben (Okt. 1958).

¹⁾ Siehe auch § 155.

Maximale Inkorporationsdosen unter Notstandsbedingungen

Bei nur kurzzeitiger Einwirkung von kurzlebigen Radioisotopen in Notfällen, z. B. bei unvorhergesehenen Zwischenfällen in Reaktor- oder Aufbereitungsanlagen, bei Atomkernbombenexplosionen (Katastropheneinsatz), wenn also der relative Anteil langlebiger Isotope nur gering ist, und bei nur relativ kurzzeitigem Aufenthalt in der Gefahrenzone, liegen bei vorübergehender Aufnahme von stärker verseuchter Nahrung (einschließlich Wasser) und Luft ähnliche Verhältnisse vor wie bei einer einmaligen Kurzzeitbestrahlung. Unter diesen Voraussetzungen ist für das kritische Organ nicht die für eine Dauerbelastung in Frage kommende Dosisleistung bestimmend, sondern die während einer gewissen Zeit in ihm freigesetzte Dosis, die nach der Exposition gemäß den Zerfallsgesetzen ständig abnimmt. Man kann z. B. — wie geschehen¹⁾ — für die äußere Bestrahlung die Aufnahme einer Gefährdungsdosis von 25 rem für den gesamten Katastropheneinsatz zulassen und festsetzen, daß auf Grund der erhöhten Aktivitätskonzentration in Nahrung, Wasser und Luft im Zeitraum von 50 Jahren höchstens 30 rem im kritischen Organ freigesetzt werden. Bei einer Aufnahmezeit von 1 bis 10 Tagen kommt man dann zu Konzentrationen, die im Mittel das 30- bis 1000fache der für die Dauerbestrahlung zulässigen betragen. **Tabelle XIX, 12** gibt die auf Grund älterer Annahmen errechneten Inkorporationskonzentrationen für verschiedene Radioisotope. Sie gelten nur für Notstandsbedingungen und sind unter der Annahme einer Inkorporationsdauer von maximal 10 Tagen berechnet²⁾.

Tab. XIX, 12. Toleranzkonzentrationen für verschiedene Radioisotope unter Notstandsbedingungen

Isotope	MZK		Kritisches Organ	Freigesetzte Dosisleistung im kritischen Organ	
	in Wasser [$\mu\text{C}/\text{cm}^3$]	in Luft [$\mu\text{C}/\text{cm}^3$]		in 30 Jahren [rem]	in 50 Jahren [rem]
P ³²	$2 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-5}$	Knochen	23,4	30
Fe ⁵⁵	$4 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-5}$	Blut	5,3	30
Cu ⁶⁴	57	$4,3 \cdot 10^{-2}$	Leber	30	30
Sr ⁸⁹	$2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	Knochen	10,8	30
Sr ⁹⁰	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-8}$	Knochen	0,2	30
J ¹³¹	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-7}$	Schilddrüse	26,6	30
Ba ¹⁴⁰	$3 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-5}$	Knochen	22	30
Ce ¹⁴⁴	$4 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-8}$	Verdauungstrakt	0,2	30

Im Falle einer Atomkernbombenexplosion ist die Zusammensetzung des Spaltproduktengemisches wegen der unterschiedlichen Halbwertzeiten eine Funktion der seit der Explosion vergangenen Zeit. Daher ist auch die maximal zulässige Konzentration für ein solches Gemisch zeitabhängig. Kurz nach der Detonation kann man mit einem linearen Abklingen der Aktivität rechnen. Eine Methode zur Ermittlung des Abfalles während längerer Zeiträume hat *K. Z. Morgan* angegeben. Für die maximal zulässigen Spaltprodukt-Konzentrationen in Wasser finden sich in der Literatur die in den **Tabellen XIX, 13** und **XIX, 14** aufgeführten Werte; ihre Zugrundelegung ist jedoch nur im Katastrophenfall zulässig.

¹⁾ Siehe oben.

²⁾ Siehe B. Rajewsky a. a. O.

Tab. XIX, 13. Zulässige Spaltprodukt-Konzentration im Trinkwasser unmittelbar nach einer Atomkernbombenexplosion¹⁾

Aktivität	Bei Aufnahmedauer von	
	10 Tagen [$\mu\text{C}/\text{cm}^3$]	30 Tagen [$\mu\text{C}/\text{cm}^3$]
α	$3,5 \cdot 10^{-3} - 9 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$
β	$2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-4}$

¹⁾ Nach J. B. Hursh, S. Zizzo und A. H. Dahl: NU 9, 6 (1951), Nr. 11.

Tab. XIX, 14. Im Trinkwasser zulässige Gesamt- β -Aktivität nach einer Atomkernbombenexplosion. Dauer der regelmäßigen Inkorporation: 10 Tage¹⁾

Beginn der Aufnahme [Tage nach der Explosion]	[$\mu\text{C}/\text{cm}^3$]
0,5	$1,8 \cdot 10^{-1}$
1	$6 \cdot 10^{-2}$
2	$2,4 \cdot 10^{-2}$
10	$1 \cdot 10^{-2}$

¹⁾ Nach W. R. Loosemore: NU 11, 36 (1953), Nr. 10.

Nach diesen Ausführungen ist es klar, daß die Festsetzung der maximal zulässigen Dosen für die einzelnen Bestrahlungsarten heute noch weitgehend eine Ermessensfrage darstellt, da noch nicht genügend konkrete Erfahrungen vorliegen.

XX. Radioaktive Verseuchung von Atmosphäre und Erdoberfläche

§ 99. Wetter- und Klimabeeinflussung¹⁾

Die Frage der Wetter- und Klimabeeinflussung durch den Betrieb von Kernreaktoren und insbesondere durch die Explosion von Atomkernbomben ist in den letzten Jahren gleichfalls in der Öffentlichkeit heftig diskutiert worden. Ihre Beantwortung ist gar nicht so einfach, zumal auch die Fragestellung recht unpräzise ist. Bevor jedoch darauf eingegangen werden soll, sei ein kurzer Überblick über die hierfür in Frage kommenden Grundprobleme der Meteorologie eingeschoben²⁾.

Die Meteorologie befindet sich — genauso wie z. B. die Astronomie, die Geologie usw. — in der schwierigen Lage, daß sie keine direkten Experimente anstellen kann. Die Meteorologie

¹⁾ Siehe auch R. Mügge und W. Jakobi: Phys. Bl. 11, 495 (1955), Nr. 11; J. K. Fedorow: Atomnaja Energija 1, 103 (1956), Nr. 5, Übers. in Atomkernenergie 2, 266 (1956), Nr. 7; "Meteorological aspects of the peaceful uses of atomic energy", A/Conf 15/P 1536.

²⁾ Siehe auch: F. Baur: „Einführung in die Großwetterforschung“, Leipzig (1937); H. Berg: „Allgemeine Meteorologie“, Bonn (1948); V. Bjerknes u. a.: „Physikalische Hydrodynamik“, Berlin (1933); S. P. Chromow: „Einführung in die synoptische Wetteranalyse“, Wien (1940); A. Defant: „Wetter und Wettervorhersage“, Leipzig (1926); F. M. Exner: „Dynamische Meteorologie“, Wien (1925); H. v. Ficker: „Wetter und Wetterentwicklung“, Berlin (1942); R. Geiger: „Das Klima der bodennahen Luftschicht“, Braunschweig (1942); Hann-Suering: „Lehrbuch der Meteorologie“, Leipzig (1943); E. Keinschmidt: „Handbuch der meteorologischen Instrumente“, Berlin (1935); W. Köppen: „Grundriß der Klimakunde“, Berlin und Leipzig (1931); Köppen-Geiger: „Handbuch der Klimakunde“, Berlin (1936); Müller-Pouillet: „Lehrbuch der Physik“, Bd. V, 1. Hälfte, Braunschweig (1928); P. Raethjen: „Einführung in die Physik der Atmosphäre“, 2 Bde., Leipzig (1942); P. Raethjen: „Kurzer Abriß der Meteorologie“, Wolfenbüttel und Hannover (1947); A. Schmauß: „Das Problem der Wettervorhersage“, Leipzig (1941); H. Seilkopf: „Maritime Meteorologie“ („Handbuch der Fliegerwetterkunde“, Bd. 2), Berlin (1939); A. Wagner: „Klimaänderungen und Klimaschwankungen“, Braunschweig (1940); A. Wegener: „Thermodynamik der Atmosphäre“, Leipzig (1911); A. und K. Wegener: „Physik der Atmosphäre“, Leipzig (1935); Wien-Harms: „Handbuch der Experimentalphysik“, Bd. XXV, Leipzig (1928); H. Koschmieder: „Dynamische Meteorologie“, Leipzig (1933).

ist darauf angewiesen, die Erscheinungen, die die Natur — im speziellen die Atmosphäre — aufzeigt, zu beobachten. Sie ist eine Erfahrungswissenschaft. Auf Grund von Vergleichen zeitlich und artmäßig verschiedener Beobachtungen müssen Rückschlüsse gezogen werden, um so den Mechanismus und den Zusammenhang der Erscheinungen aufzudecken. Man kann (nach Raethjen) die Atmosphäre mit einer unbekanntem Wärmekraftmaschine vergleichen. Um ihre Wirkungsweise zu verstehen, muß dreierlei beachtet werden:

1. ihr mechanischer Aufbau, ihre Konstitution,
2. ihre Heizung und Kühlung, ihr Wärmehaushalt,
3. ihr Umlauf, ihre Zirkulation.

Ausgangspunkt ist in allen Fällen die Beobachtung von Grundgrößen, wie z.B. Lufttemperatur, Luftdruck¹⁾, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Niederschlag, Wolken, Sonneneinstrahlung usw. Diese Grundgrößen werden regelmäßig zu verschiedenen Tageszeiten und an vielen Orten der Erdoberfläche gemessen. Die Meßergebnisse werden in Karten eingetragen. Durch Ballon-²⁾ und Flugzeugaufstiege sowie durch Wetterstationen auf hohen Bergen verschafft sich der Wetterdienst mehrmals täglich einen Überblick auch über das Zustandsfeld in größeren Höhen. Regelmäßig werden heute bereits Karten für Höhen bis zu 20 km, und zwar für die gesamte Nordhalbkugel, aufgestellt³⁾. Die zu irgendeinem Zeitpunkt an einem Ort gemessenen Zustandswerte beschreiben das dort herrschende Wetter, die Witterung. Die statistische Summe (Mittelwerte) über alle Witterungen (Klimawerte) während eines längeren Zeitraumes beschreibt das Klima des betreffenden Ortes. Die Arbeitskarten, in die die gleichzeitigen Beobachtungen vieler Beobachtungsstationen eingetragen sind, beschreiben die Wetterlage im Bezugszeitpunkt für das betrachtete Gebiet. Aus der momentanen Wetterlage und ihrer (zeitlichen) Entwicklung zieht die Synoptik (ή συνοψις = der Überblick) Rückschlüsse auf den voraussichtlichen weiteren Wetterablauf (Wettervoraussage)⁴⁾. Die Rückschlüsse basieren auf speziellen Erfahrungen und auf allgemein gültigen Gesetzmäßigkeiten.

Die Voraussage eines Wetterablaufes ist außerordentlich schwierig⁵⁾, da u. a., wie angedeutet, z. B. die örtliche Bodengestalt der Erde in alle Betrachtungen eingeht, und zumal auch die meist nicht mit hinreichender Sicherheit bekannten Gegebenheiten in den höheren Atmosphärenschichten bis zur Tropopause⁶⁾ und in die Stratosphäre hinein⁷⁾ berücksichtigt werden müssen. Eine Wettervoraussage für einen bestimmten, womöglich noch in einem Tal gelegenen Ort ist daher stets mit einer großen Unsicherheit behaftet. Durch das Auf- und Absteigen von Luftmassen, durch Inversionen⁸⁾, durch die Sonneneinstrahlung und die Abkühlung der Erde (Land-Seewind) usw. ist die Mannigfaltigkeit der bei einer Wettervoraussage zu beachtenden Parameter außerordentlich groß, und selbst elektronische Rechenmaschinen vermögen bis heute noch nicht alle Einflüsse zu berücksichtigen⁵⁾.

Außer der beschriebenen einfachen Synoptik, die sich mit dem individuellen Wetterablauf und den diesem zugrunde liegenden Gesetzen beschäftigt, gibt es auch noch eine sogenannte großräumige Synoptik. Diese geht von der allgemeinen Zirkulation⁹⁾ innerhalb der Atmosphäre aus und sucht statistisch-geographische Vergleiche. Zwei der in der großräumigen Synoptik verwendeten Grundbegriffe sind „Frontalzone“ und „Höhentrog“¹⁰⁾. Unter Frontalzone versteht man das Grenzgebiet zwischen zwei Luftmassen verschiedenen Wärmehaltes. Der thermische Wind nimmt innerhalb einer Frontalzone nach oben hin zu und weht fast parallel zu den Isobaren. Wie die Erfahrung gezeigt hat, wachsen die Stärken der Höhenwinde mit den Temperaturunterschieden. Für diese meist auf einen relativ schmalen Bereich begrenzten Windströme haben

¹⁾ Siehe z. B. R. Mügge: „Luftdruckgang und Wetter“, Umschau 56, 656 (1956), Nr. 21.

²⁾ Hinweis auf C. B. Moore, J. R. Smith und A. Gaalswyk: J. of Meteorology 11, 167 (1954).

³⁾ Die Erfassung auch der Südhalbkugel scheidert z. Z. noch an der Personalfrage.

⁴⁾ R. Seherhag: „Wetteranalyse und Wetterprognose“, Berlin (1948).

⁵⁾ Siehe auch F. Wippermann: „Bessere Wettervorhersagen mit elektronischen Rechenmaschinen“, Umschau 56, 491 (1956); „Wettervorhersage in USA-Sicht“, Phys. Bl. S. 331 (1959), Nr. 8.

⁶⁾ Grenze zwischen Atmosphäre und Stratosphäre.

⁷⁾ Man kann geradezu von einer Steuerung des Wettergeschehens in der Troposphäre durch die Stratosphäre sprechen.

⁸⁾ Luftmassen höherer Enthalpie über solchen geringeren Wärmehaltes.

⁹⁾ Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre = statistische Summe über alle großräumigen Strömungen und Wettervorgänge.

¹⁰⁾ Im statischen Mittel: Hochdruckgebiet.

die Amerikaner die treffende Bezeichnung Jet-Stream (Düsen- oder Strahlstrom) geprägt. Es sind Fälle bekannt geworden, in denen die gesamte thermische Differenz und der zugehörige Höhensturm zwischen dem 300- und dem 150-mb-Niveau¹⁾ beschränkt war. Fernerhin wurde beobachtet, daß die Höhenkonvergenzen zweier entgegengesetzt gerichteter Jet-Strömungen eines Troges unmittelbar aneinander liegen können. Da infolge jedes Jet-Stromes notwendig ein horizontales Temperaturgefälle auftritt, umfaßt der Begriff der Frontalzone auch den des Jet-Streams und ist ihm übergeordnet. Die Höhenträge, die im statistischen Mittel quasistationär sind, sind mit Frontalzonen gesetzmäßig gekoppelt. Innerhalb der Höhenträge wird häufig Kaltluft äquatorwärts geführt. Dadurch wird eine horizontale Konvergenz (Konfluenz) auf ihrer Westseite (Einzugsgebiete) und eine horizontale Divergenz auf ihrer Ostseite aufrechterhalten. Das Bestehen eines Höhentroges (im Mittel) ist über dem Südatlantik, über dem Südpazifik, über Nordamerika und über Ostasien gesichert. Für die Existenz eines Troges im Süden des indischen Ozeans spricht das Umbiegen der Mauritiusorkane und das Umbiegen der allerdings seltenen Tropenorkane Nordwestaustraliens. Außerdem ist über dem europäischen Festland ein Höhentrog nachgewiesen. Ausführliche Arbeiten über die großräumige Synoptik und die Auswirkungen der synoptischen Gesetze auf mittel- und langfristige Wetterprognosen wurden u. a. von *Rosby* und *Flohn* veröffentlicht. Gemäß diesen Arbeiten beträgt die mittlere Zuggeschwindigkeit der Zyklone und Antizyklone bis zu 1000 km pro Tag, so daß sich z. B. bei Neufundland abzeichnende Entwicklungen bereits in spätestens 3 bis 4 Tagen über Europa auswirken können. Es gibt auch synoptische Erscheinungen, die sich schneller als der Höhenwind fortpflanzen.

Die über Nord- und Mitteleuropa vorherrschende großräumige west-östliche Luftströmung wird als zirkumpolare Westdrift (Westwirbel) bezeichnet. Die zirkumpolare Westdrift kreist um ein in der Gegen des Nordpols vorhandenes quasistationäres Tiefdruckzentrum und reicht nach Süden bis an die Grenze des Urpassates heran (etwa 20° nördlicher Breite). Die innerhalb dieser Westdrift

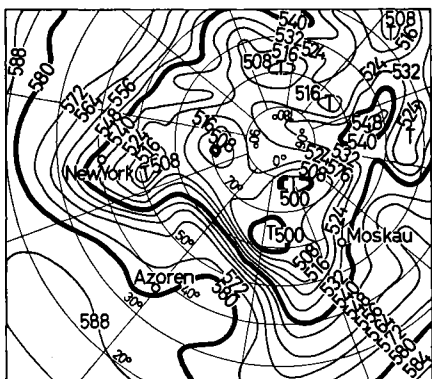


Abb. XX, 1. Absolute Topographie 500 mbar (Druckverteilung in etwa 5 km Höhe) am 23. 12. 1954, 3 Uhr früh. Am Nordrand des atlantischen Hochs ist ein Jet-Strom ausgebildet, in dem das steile Druckgefälle mit etwa 300 km/Std. durchheilt wird

sehr häufig — fast ständig — auftretenden Jet-Strömungen äußern sich in den Isohypsenkarten als eine enge Bündelung der Höhenlinien. Von der Äquator- und von der Polseite her rücken die Zonen hohen und niedrigen Druckes sehr dicht aneinander. Auf Grund des starken Druckgefälles betragen die Windgeschwindigkeiten der Jet-Ströme bis zu 200 bis 400 km/Std. Ihre geometrische Breite beträgt in der Regel 100 bis 1000 km. Ihre höchste Entfaltung erreichen sie in 8 bis 10 km Höhe. Wegen der Neigung der Westdrift zu mäanderförmigen Bewegungen kann eine Jet-Strömung sowohl von NO nach SW als auch von SW nach NO verlaufen. Die Entwicklungen der Jet-Strömungen sind meist von Aufgleiterscheinungen, von Niederschlägen und von heftiger Zyklonogenese begleitet. Als Beispiel für eine Höhendruckverteilung mit Jet-Strömung sei **Abbildung XX, 1** gezeigt. Bei dieser Wetterlage vom 23. 12. 1954 wurden in Westeuropa auch am Boden noch Sturmstärken bis zu 150 km pro Stunde, in Begleitung intensiver Niederschläge, beobachtet.

Die bei der Explosion einer Atomkernbombe freiwerdende primäre Neutronen- und Quantenstrahlung sowie die entstehenden kurzlebigen radioaktiven Spaltprodukte spielen bei einer weiträumigen Verseuchung der Atmosphäre — infolge der damit verbundenen Transportzeiten von Stunden und Tagen — keine Rolle.

¹⁾ Im Wetterdienst ist es üblich, auf einen gegebenen Druck (z. B. 150 oder 300 Millibar) zu beziehen und in die entsprechenden Karten Höhenlinien (Isohypsen) einzuzeichnen, die diejenigen Höhen angeben, in denen dieser Druck gemessen wurde. (Die Isohypsen des 500 mbar-Niveaus z. B. entsprechen etwa den Isobaren in 5 km Höhe).

Eine weiträumige Verseuchung der Atmosphäre kann in erster Linie nur durch die β - und γ -strahlenden Spaltprodukte entstehen. Außerdem trägt das nicht gespaltene Uran bzw. Plutonium (beides langlebige α -Strahler) dazu bei. Von untergeordneter Bedeutung sind in seltenen Fällen die im Erdboden und im Wasser induzierten aktiven Isotope, vor allem Na²⁴ und Si³¹. Die Aktivität eines Spaltproduktgemisches klingt ab nach dem von *Way* und *Wigner*¹⁾ gegebenen Abfallgesetz

$$A = A_0 t^{-1,2}. \quad (\text{XX/1})$$

Bei der Explosion einer normalen Atomkernbombe bleiben sicher weniger als 99 Prozent des ursprünglich vorhandenen Urans bzw. Plutoniums ungespalten und gelangen in die Atmosphäre²⁾. Geht man von einer Bombe mit einer kritischen Masse von 100 kg spaltbarem Material aus³⁾, so entspricht dies im Falle einer U²³⁵-Bombe einer α -Aktivität von etwa 0,2 C und im Falle einer Pu²³⁹-Bombe etwa 6000 C. Tabelle XX, 1 zeigt, daß diese Aktivität anfangs gegenüber der freiwerdenden γ -Aktivität der Spaltprodukte verschwindend klein ist, wegen der langen Halbwertszeit jedoch auf die Dauer ins Gewicht fällt.

Die Spaltprodukte sowie die nicht gespaltenen Uran- bzw. Plutoniummengen sind zum größten Teil in den oberen Partien des Explosionspilzes⁴⁾ angereichert und gelangen in Höhen von 10 bis 15 km, also etwa bis zur Tropopause. Es handelt sich vorwiegend um Metalle bzw. Metalloxyde, die am Rande des Feuerballs kondensiert bzw. an das vorliegende Aerosol angelagert werden. Der grobkörnige Anteil (Teilchendurchmesser > etwa 20 μ) gelangt durch Sedimentation zum Erdboden und kann in 100 bis 200 km Entfernung vom Explosionsort starke Verseuchungen bewirken⁵⁾. Der feindisperse Anteil dagegen sedimentiert nur langsam⁶⁾. Er kann durch die in der oberen Troposphäre herrschenden Luftströme, insbesondere auch durch die Jet-Strömungen, über große Entfernungen transportiert werden und somit eine weiträumige Verseuchung der Atmosphäre auslösen. Er gelangt hauptsächlich über den Niederschlag zum Erdboden. Für die Transportgeschwindigkeit und die lokale Konzentration der Aktivität in der Atmosphäre ist, wenn man von der Sedimentation und der Ausfällung durch Niederschläge absieht, nur der Verlauf der atmosphärischen Strömungen maßgebend. Durch die Jet-Strömungen werden die radioaktiven Spaltprodukte in recht konzentrierter Form und mit hohen Geschwindigkeiten über Gegenden transportiert, die einige tausend Kilometer vom Explosionsort entfernt sind⁵⁾. Der Verlauf der atmosphärischen Strömungen wird heute — vor allem auf der Südhalbkugel — noch in keiner Weise systematisch er-

Tab. XX, 1. γ -Aktivität der Spaltprodukte nach einer Atomkernbombenexplosion¹⁾, (100 kg spaltbare Substanz, 1% Wirkungsgrad angenommen)

Zeit nach der Explosion	γ -Aktivität in 10 ⁶ C
1 Minute	8,2 · 10 ⁶
1 Stunde	6,0 · 10 ³
1 Tag	133
1 Woche	13
1 Monat	2,3
1 Jahr	0,11
10 Jahre	0,008

¹⁾ Nach R. Mügge und W. Jakobi: Phys. Bl. S. 495 (1955), Nr. 11.

¹⁾ K. Way u. E. P. Wigner: Phys. Rev. 73, 1318 (1948). S. auch: E. A. C. Crouch: "U²³⁵ thermal fission product activities and emission powers plotted against irradiation and decay times", AERE c/M-324 (1957).

²⁾ "The effects of atomic weapons", New York (1950).

³⁾ Die kritische Masse ist in Wirklichkeit erheblich kleiner. Siehe Teil I.

⁴⁾ Siehe Abb. VIII, 1.

⁵⁾ Siehe Abb. XX, 2 und XX, 3 sowie Tab. XX, 2.

⁶⁾ Die sedimentierte bzw. niedergeschlagene Aktivität wird im englischen Schrifttum als "Fallout" bezeichnet.

faßt, so daß eine definitive Aussage über die Richtung des Transportes der radioaktiven Aerosole¹⁾ sowie über die Transportgeschwindigkeit nicht gemacht werden kann. Die Möglichkeit jedoch, daß Spaltprodukte auf diese Weise aus allen Teilen der Welt auch nach Europa abtransportiert werden können, ist nicht von der Hand zu weisen.

Die durch die Höhenströmungen ständig mitgeführten radioaktiven Aerosole können theoretisch in verschiedener Weise wirksam werden und radioaktive Niederschläge²⁾ verursachen, die ihrerseits eine Verseuchung des Erdbodens hervorrufen:

1. Durch Auflösung in Wassertröpfchen, die entweder an Ort und Stelle oder erst nach einem unter Umständen noch recht weiten Weg abregnen. (Die Tröpfchen können aber auch wieder verdampfen und die Spaltprodukte erneut freigeben.) Die über Westeuropa vorherrschenden starken NW- und W-Driften sind vielfach mit Cumulonimben und Schauern durchsetzt, die eine schnelle Ausfilterung von größeren Partikeln möglich machen.

2. Durch Anlagerung an vorhandene Kondensationskeime, deren Anwesenheit danach zu einer Tröpfchenbildung führt. (Durch eine solche Anlagerung erfolgt keine Erhöhung der kondensationsfördernden Eigenschaften.)

3. Die infolge radioaktiven Zerfalls von Spaltproduktatomen durch die Strahlung entstehenden Ionenpaare (z. B. hunderte pro Zentimeter Weglänge bei β -Teilchen) können unter dafür günstigen Bedingungen, also bei Sättigung oder Übersättigung der Umgebungsluft, und beim Fehlen sonstiger Kondensationskeime selbst als solche wirken (wie in *Wilsonkammer*)³⁾.

4. Die Spaltprodukte und die gemäß 3. gebildeten Ionen können ggf. als „Impfmittel“⁴⁾ auf vorhandene Wolken wirken und diese zum Abregnen veranlassen. Die Aktivität gelangt auf einem der Wege 1 bis 3 in den Niederschlag.

In denjenigen Zonen also, in die die Höhenwinde die Spaltprodukte transportieren, können in vermehrtem Maße radioaktive Niederschläge und vielleicht auch Wolkenbildungen auftreten. Die hohe Atmosphäre würde bei Mechanismus 3. an der betreffenden Stelle eine Verringerung an Wasser bzw. Wasserdampf erfahren, die ihrerseits durch vermehrte Verdunstung in benachbarten Regionen ausgeglichen werden müßte. In diesen benachbarten Regionen vorhandene Wolken können verdunsten und sich auflösen, so daß Schönwetterzonen entstehen. Der gesamte Wasserhaushalt würde also lokal intensiviert, da sich der Wasserwechsel in höhere Atmosphärenschichten hinein ausdehnt. Die Bedingungen dafür, daß in einem bestimmten Gebiet wirklich radioaktiver Niederschlag fallen kann, sind jedoch sehr eng gesteckt, so daß die Wahrscheinlichkeit dafür nur gering ist. Wie lange sich korpuskulare Partikel in der hohen Atmosphäre halten können, hat sich seinerzeit beim Ausbruch des Krakatau gezeigt.

Der Wetterdienst hat langzeitige Tages-, Wochen- und Monats-Klimamittelwerte aufgestellt. Auf Grund des beschriebenen Mechanismus sind direkt augenfällige Abweichungen von diesen Mitteln bzw. von den während der Beobachtungszeit festgestellten Extremwerten infolge von Atomkernbomben-Detonationen nicht zu erwarten. Von einer Klimaänderung zu reden ist daher absurd. Auch abnormale Wetterlagen (Unwetter, langzeitige Schlechtwetterperioden, wie den verregneten Sommer 1956⁵⁾ usw.), für die zudem die Meldemethoden in den letzten Jahrzehnten stark verbessert wurden, als Beweis für die Wetterwirksamkeit der Explosionen anzuführen ist unsinnig, denn abnorme Wetterlagen hat es zu allen Zeiten gegeben⁶⁾,

¹⁾ Hinweis auf G. Schumann: *Z. Aerosol-Forschg.* **6**, 53 (1957).

²⁾ Siehe z. B. W. Gerlach u. a.: „Untersuchungen über radioaktive Regen“, *Atomkernenergie* **1**, 237 (1956), **2**, 161, 438 (1957), **3**, 222, 1958; A. Sittkus: *Naturw.* **44**, 478 (1955); „Jahresbericht des Deutschen Wetterdienstes“, S. 6/14 (1959), Nr. 6.

³⁾ Erhöhung der Leitfähigkeit der Atmosphäre.

⁴⁾ Hinweis auf R. Neuwirth: „Künstlicher Regen“, *Umschau* **56**, 257 (1956), Nr. 9.

⁵⁾ Siehe auch F. Baur: *Umschau* **56**, 628 (1956) Nr. 20.

⁶⁾ Siehe z. B. K. Knoch: „Der Rhythmus der strengen Winter“, *Umschau* **58**, 40 (1958), Nr. 2.

und die Menschen haben sie zu allen Zeiten als Folgen von allen möglichen Ursachen angesehen. Außerdem besitzt der Wetterdienst recht genaue Unterlagen über die statistische Häufigkeit solcher Gegebenheiten. Um wirkliche Abweichungen vom normalen Wettergeschehen festzustellen, wären jahrzehntelange Beobachtungen und Vergleiche von Klimawerten und Großwetterlagen während gleichzeitig durchgeführter Explosionsserien erforderlich. Derartige langzeitige Beobachtungen aber liegen noch nicht vor, und eindeutige Korrelationen zwischen dem Zeitpunkt von Explosionen und bestimmten Wetterlagen konnten auch noch nicht gefunden werden. Daher ist die aufgeworfene Frage auf diesem Wege nicht zu klären. Ein anderer Weg könnte sich ergeben, wenn es gelingen würde, die bei einer Explosion freigesetzten Spaltprodukte auf ihrem Transport durch die Atmosphäre zu verfolgen. Diese Möglichkeit ist jedoch technisch nicht durchführbar. Die Tatsache allerdings, daß radioaktive Niederschläge festgestellt werden konnten, deutet an, daß lokale Wetterbeeinflussungen nicht unmöglich sind, wenn auch ein eindeutiger Nachweis bisher noch nicht gelang¹⁾. Es liegen jedoch darüber hinaus auch noch keinerlei Anhaltspunkte dafür vor, daß durch Atomkern- und Wasserstoffbombenabwürfe weiträumige Beeinflussungen des Wettergeschehens verursacht worden sind²⁾. Alle diesbezüglichen Abschätzungen zeigen, daß der bei einer solchen Explosion vor sich gehende (thermische) Energieumsatz, die zusätzliche Bildung von Kondensationskeimen und die dadurch bedingte Trübung sowie auch die durch die radioaktive Strahlung bewirkte Ionisation der Luft nur minimale (also örtliche) Veränderungen hervorrufen können, im Vergleich zu den natürlicherweise vorhandenen Verhältnissen. Durch den Betrieb von Kernreaktoren können keinerlei Beeinflussungen des Wettergeschehens verursacht werden. Auf die beim Bau eines Reaktors bzw. Atomkraftwerkes zu beachtenden meteorologischen Gesichtspunkte wird noch eingegangen.

§ 100. Radioaktive Verseuchung³⁾

Eine weiträumige radioaktive Verseuchung von Atmosphäre und Erdoberfläche tritt — wenn auch ggf. auf bestimmte Gebiete beschränkt — nach jeder Explosion einer Atomkern- oder Wasserstoffbombe auf. Kernreaktoren dagegen, deren Kühlung im geschlossenen Kreislauf erfolgt, verbreiten praktisch⁴⁾ keinerlei Aktivität in ihrer Umgebung. Im offenen Kreislauf gekühlte Reaktoren andererseits, für die entweder Luft oder Wasser als Kühlmedium in Frage kommt, geben ständig eine gewisse Aktivität ab. Bei luftgekühlten Reaktoren dieser Art, wie den Windscale-Anlagen⁵⁾, sucht man die Aktivität durch Filter, z. B. aus Asbest, zu verringern und bläst die aktive Luft [Edelgase⁶⁾, Stickstoff] durch hohe Schornsteine ab, so daß die spezi-

¹⁾ Siehe auch F. Baur: Umschau **56**, 628 (1956), Nr. 20.

²⁾ Siehe auch H. Rodewald: Umschau **56**, 394 (1956), Nr. 13.

³⁾ Hinweis auf A/Conf 8/P 778; K. Bechert: Umschau **56**, 516 (1956), Nr. 17; Atomkernenergie **1**, 219 (1956), **3**, 64 (1958), Nr. 2; H. Israel: Atomkernenergie **3**, 255, (1958), Nr. 7; O. Haxel: „Natürliche und künstliche Radioaktivität in der Atmosphäre“ in „Physikertagung Heidelberg (1957)“; Moosbach, (1957); L. Fredriksson u. a.: „Studies on soil-plant-animal interrelationships with respect to fission products“, A/Conf 15/P 177; C. W. Shilling: „Does radioactive fallout spell disaster?“, *Atomics* **9**, 198 (1958), Nr. 6; W. Herbst: „Zu den Vorgängen der Verbreitung radioaktiver Partikel und der Inhalation radioaktiver Aerosole“, *Atomkernenergie* **4**, 300 (1959), Nr. 7/8; W. Herbst: „Zu den US hearings über die Natur des radioaktiven Fallout u. seine Auswirkungen auf den Menschen“, *Atomkernenergie* **3**, 148 (1958), Nr. 4; „Environmental contamination from weapons test“, 4 Bde., HASL-42 (1958); V. M. Klechkovsky u. a.: „Sorption of tracer amounts of strontium and cesium in soils“, A/Conf 15/P 2310 sowie A/Conf 15/P 1867, 2267, 2425, u. *Phys. Bl.* **15**, 121 (1959), Nr. 3.

⁴⁾ Hinweis auf „Activity distribution from simulated pressurized water reactor leaks“, A/Conf 15/P 433.

⁵⁾ Jetzt außer Betrieb.

⁶⁾ Zur Kühlung des Brookhaven-Reaktors z. B. werden über 8000 m³ Luft pro Minute benötigt. Infolge der Aktivität, die das Argon, das nicht durch Filter zurückgehalten werden kann, annimmt, gelangen täglich über 7000 Curie Aktivität in die Atmosphäre.

fische Aktivität der Luft in der Umgebung so klein wie möglich gehalten wird¹⁾. Die Schornsteine können auch in ihrem oberen Teil durchlöchert sein, um eine bessere Verteilung der abziehenden Gase zu erreichen. Bei im offenen Kreislauf mit Wasser gekühlten Reaktoren, wie den Hanford- und den Savannah River-Anlagen, läßt man das Kühlwasser nach seinem Durchgang durch den Reaktor durch Verweilbecken laufen, in denen die Aktivität — wenigstens zum Teil — abklingen kann. Wenn auch in beiden Fällen die verbreitete Aktivität weit unterhalb der höchst zulässigen Grenzen gehalten werden kann, so sollte man dennoch alle Reaktoren mit offenem Kühlkreislauf vermeiden, und man sollte überhaupt verhindern, daß auf irgendwelche Weise — z. B. bei unvorhergesehenen Zwischenfällen, bei außerordentlichen Betriebsmaßnahmen, aus dem Abfall usw. — Aktivität in die Atmosphäre, auf den Erdboden, ins Grundwasser usw. gelangen kann²⁾. Daß man bestrebt sein sollte, alle Explosionen von Atomkern- und Wasserstoffbomben zu unterbinden, braucht nicht besonders erwähnt zu werden, zumal der Sinn von Versuchsexplosionen [z. B. Auswirkungen auf Fernmeldeleitungen³⁾] häufig mit dem besten Willen nicht einzusehen und zumal der Nutzeffekt meist nur sehr gering ist.

Bei der Betrachtung der Auswirkungen einer radioaktiven Verseuchung sind vorwiegend biologische Gesichtspunkte von Bedeutung. Es muß zwischen zwei Arten der Strahlenbelastung unterschieden werden:

1. Strahlenbelastung der Bevölkerung auf Grund einer Verseuchung des Erdbodens, des Wassers und ggf. der Nahrungsmittel — infolge direkt abgelassener, sedimentierter oder niedergeschlagener Aktivität.
2. Strahlenbelastung durch Einatmung radioaktiver Ärosole und Abscheidung in den Atmungswegen.

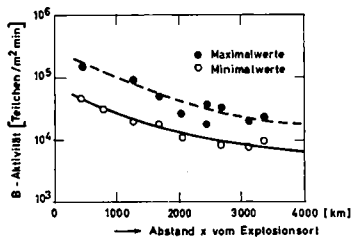


Abb. XX, 2. Abnahme der Bodenaktivität mit zunehmender Entfernung vom Explosionsort zum Zeitpunkt $T = 325$ Tage nach der Explosion

Über die Abnahme der Bodenaktivität mit der Entfernung vom Explosionsort einer Atomkernbombe liegen amerikanische Messungen vor⁴⁾, deren Ergebnis **Abbildung XX, 2** zeigt. Auf der Abszisse ist der Abstand in ostwärtiger Richtung vom Explosionsort (Yucca Flats, Nevada) und auf der Ordinate die gesamte am Meßort pro Quadratmeter ausgefallene β -Aktivität $A'(x, T)$ aufgetragen, und zwar extrapoliert auf den Zeitpunkt T nach der Explosion. Nimmt man an, daß während des Beobachtungszeitraumes täglich die gleiche Aktivität $a(x)$ niedergeschlagen wurde, so läßt sich $A'(x)$ unter Berücksichtigung des *Way-Wignerschen* Abfallgesetzes (XX/1) nach der Beziehung⁵⁾

$$A'(x, T) = \int_{t_1}^{t_2} a(x) \cdot (T - t)^{-1.2} dt \quad (\text{XX/2})$$

berechnen. Für die beschriebenen und in **Abbildung XX, 2** wiedergegebenen Messungen wurde $t_1 = 0$, $t_2 = 65$ Tage und $T = 325$ Tage nach der Explosion gewählt.

¹⁾ Siehe auch § 103. Hinweis auf G. W. C. Tait: "Determining concentration of airborne plutonium dust", NU 14, 53 (1956), Nr. 1.

²⁾ Hinweis auf F. Kalil und J. M. Garner Jr.: "System continuously records water level and contamination", NU 14, 56 (1956), Nr. 7.

³⁾ Siehe z. B. Pwr Engng. 59, 62 (Juli 1955).

⁴⁾ M. Eisenhud und J. H. Harley: Science 117, 141 (1953).

⁵⁾ Hinweis auf T. Francke: „Zur Analyse der t^{-1} -Kurven der künstlich radioaktiven Niederschläge“, Atomkernenergie 4, 308 (1959), Nr. 7/8.

Nimmt man den ungünstigsten Fall an, daß die Aktivität $a(x)$ nicht nur während 65 Tagen sondern dauernd anfällt, so steigert sich die Bodenaktivität bis zu einem Gleichgewichtswert. Ist die tägliche Zufuhr $a(x)$ gleich der täglich durch Strahlung zerfallenden Substanzmenge, so wird das Gleichgewicht bereits nach 4 Tagen erreicht, und die konstante Aktivität des Bodens beträgt

$$A(x) \approx 6a(x) \approx 50A'(x, t). \quad (\text{XX/3})$$

In Tabelle XX, 2 sind die auf diese Weise und nach Abbildung XX, 2 errechneten sedimentierten β -Aktivitäten für verschiedene Abstände vom Explosionsort zusammengestellt. Die für 10000 km Abstand (Entfernung Nevada — Mitteleuropa) aufgeführten Werte wurden durch eine Extrapolation der Kurven in Abbildung XX, 2 gewonnen, die auf Grund der weiträumigen Kontinuität der West-Ost-Strömung in unseren Breiten gerechtfertigt scheint. Zur weiteren Verdeutlichung der weltweiten Auswirkungen eines Atomkernbomben-Versuchsabwurfes sei Abbildung XX, 3 gezeigt, in der die gesamte von der sogenannten „Bravo-Wolke“¹⁾ während eines Zeitraumes von 2 bis 35 Tagen nach der Detonation sedimentierte Aktivität in der Form von Isoaktivitätslinien (mC/100 Quadratmeilen) dargestellt ist²⁾. Wegen weiterer Einzelheiten sei auf die Veröffentlichung des Labont Geological Observatory der Columbia University in Palisades N. Y. hingewiesen³⁾, in dem seit einigen Jahren sämtliche auf der Erde gemachten Beobachtungen über sedimentierte Aktivitäten gesammelt und ausgewertet werden.

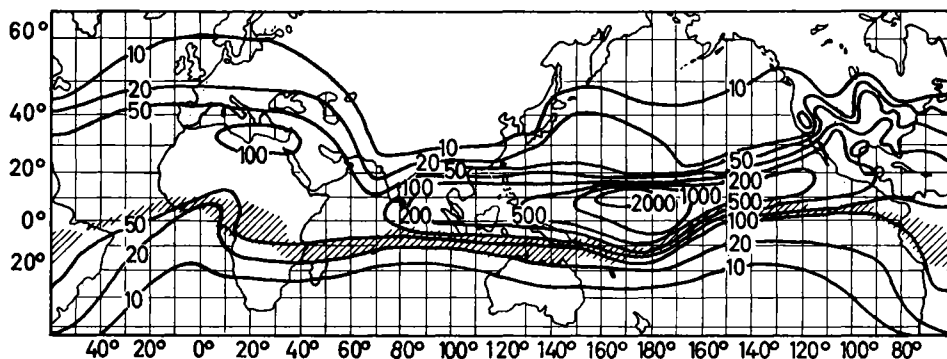


Abb. XX, 3. Verteilung der sedimentierten Aktivität aus der „Bravo-Wolke“. Die Messungen betreffen einen Zeitraum von 2 bis 35 Tagen nach dem H-Bombentest am 1. 3. 1954 in Bikini (Isoaktivitätskurven \sim Millicurie pro 100 Quadratmeilen)

Die β -Komponente der Bodenaktivität spielt wegen ihrer geringen Durchdringungsfähigkeit strahlenbiologisch kaum eine direkte Rolle. Das gleiche gilt für die α -Strahlung des ungespaltenen U^{235} und Pu^{239} .

Wird diese Aktivität jedoch von Pflanzen⁴⁾, Tieren oder Menschen über längere Zeiten mit der Nahrung oder durch die Atemluft aufgenommen, so werden verschiedene Isotope, wie in Kapitel XIX ausgeführt, z. B. in Drüsen oder Knochen eingebaut und nehmen auf Grund des beschriebenen Mechanismus ständig an Menge zu, bis ein Gleichgewicht eintritt. Im Columbia-River, an dessen Oberlauf die Hanford-Werke mit ihren im offenen Kreislauf gekühlten Reaktoren liegen, nimmt die spe-

¹⁾ Detonation am 1. 3. 1954 in Bikini. Siehe Tab. VIII, 2.

²⁾ Nach einem amerikanischen Bericht. Siehe auch Umschau 58, 14 (1958), Nr. 1.

³⁾ Science 125, 219 (1957).

⁴⁾ Hinweis auf J. H. Rediske und F. P. Hungate: A/Conf 8/P 278; W. Herbst u. a.: Atomkernenergie 2, 357 (1957), Nr. 10; A/Conf 15/P 1955.

Tab. XX, 2. Bodenaktivität in verschiedenem Abstand vom Explosionsort und die durch sie bewirkte γ -Strahlenbelastung^{1,2)}

Abstand x vom Explosionsort [km]	Mittlere pro Tag niedergeschlagene β -Aktivität a(x) [10^{-8} C/m ²]	Akkumulierte β -Aktivität A(x) [10^{-6} C/m ²]	γ -Aktivität in 1 m Höhe über dem Erdboden [mr/Woche]
500	16	1,0	1,6
1000	10	0,6	1,0
4000	2,6	0,16	0,25
10000 (extrapoliert)	1,0	0,06	0,10

¹⁾ Nach R. Mügge und W. Jacobi: Phys. Bl. 495 (1955), Nr. 11.

²⁾ Es wurde angenommen, daß die β -Aktivität annähernd doppelt so groß ist wie die γ -Aktivität.

zifische Aktivität des Wassers auf je etwa 20 km Entfernung um die Hälfte ab. Andererseits ist jedoch festgestellt worden, daß die mikroskopisch kleinen Lebewesen¹⁾ pro Gramm etwa 2000mal mehr an Radioaktivität²⁾ aufweisen als das Wasser³⁾. Junge Flußenten zeigen eine 40000mal, Flußfische eine 150000mal, junge, mit Wasserinsekten gefütterte Schwalben eine 500000mal und der Dotter von Eiern der Flußvögel eine $1,5 \cdot 10^6$ mal so große spezifische Aktivität wie das Flußwasser⁴⁾. Man sieht an diesem Beispiel, in welchem Ausmaß in den verschiedenen Lebewesen eine solche Speicherung langlebiger Radioaktivität auftreten kann. Ihretwegen darf eine Verseuchung nicht danach beurteilt werden, ob die höchst zulässige Bestrahlungsdosis für eine Ganzkörperbestrahlung erreicht oder überschritten ist, oder ob die Aktivität der Atemluft⁵⁾ ihre MZK erreicht hat. Schon $1/1000$ der Menge an J^{131} z. B., die durch Einatmen gefährlich würde, erzeugt eine Verseuchung der Wiesen, des weidenden Viehs und der davon produzierten Milch, die ausreicht, um z. B. milchtrinkende Kleinkinder erheblich zu gefährden⁶⁾. Eine Verseuchung der Weiden erfolgte seinerzeit auch in Oak Ridge, wo man Spaltprodukte in Betontanks aufbewahrte, die dann undicht wurden. Besonders gefährlich ist Sr^{90} ($\tau = 28$ a), das sich, wie erwähnt, im Knochenmark ablagert und dort jahrelang wirken kann⁷⁾. Wenn genügende Strontiummengen im Knochenmark vorhanden sind, kann es zu den in Paragraph 97 beschriebenen Schädigungen und zu Knochenkrebs kommen. Von dem im Körper vorhandenen Strontium werden nur 0,2 Promille täglich ausgeschieden. Wegen der langen Halbwertszeit erfolgt eine Anreicherung des Strontiums sowohl in der Atmosphäre⁸⁾ (Halbwert-Verweilzeit etwa 2 bis 7 Jahre) als auch in den

¹⁾ Siehe z. B. auch J. E. Treherne: J. exper. Biol. **31**, 386 (1954); C. C. Coffins u. a.: Canad. J. of Res. **27**, 207 (1949).

²⁾ Keine Schwermetalle.

³⁾ Nach S. K. Love [“Natural radioactivity of water”, Ind. and Engng. Chem. **43**, 1541 (1951)] beträgt die natürliche Aktivität von Gewässern $3,6 \cdot 10^{-9}$ μ C/cm³. Werte in der Größenordnung 10^{-4} μ C/cm³ werden für heiße Quellen mit hohem Radiumgehalt angegeben.

⁴⁾ Im Columbia River wurden Mn^{56} , Na^{24} , Cu^{64} , A^{76} , Si^{31} , P^{32} , Cr^{51} und seltene Erden gefunden. Näheres siehe R. F. Foster und J. J. Davis: A/Conf 8/P 280, sowie W. C. Hanson und H. A. Kornberg: A/Conf 8/P 281. Ähnliche Erscheinungen wurden auch z. B. in Oak Ridge beobachtet, siehe L. A. Krumholz, ORO-132 (1954).

⁵⁾ Hinweis auf A. Aron und B. Groß: „Eine Beobachtung über die von Kernbombenversuchen herührende Radioaktivität der Luft“, Z. Naturforsch. **944** (1957).

⁶⁾ A. C. Chamberlain u. a.: A/Conf 8/P 393. Ein Verfahren zur Entfernung von Sr^{90} aus Milch, bei dem die Milch entkalkt und später wieder mit inaktivem Mineralkalk versetzt wird, soll bei der University of Minnesota entwickelt worden sein. Hinweis auf A/Conf 15/P 100.

⁷⁾ Besonders gefährlich sind außerdem Sr^{89} ($\tau = 53$ d), Y^{90} ($\tau = 57$ h), P^{32} ($\tau = 14$ d), Y^{129} ($\tau = 20 \cdot 10^6$ a) Y^{131} ($\tau = 8$ d); Hinweis auf R. E. Lapp: “Strontium-90 in man”, Science **125**, 933 (1957); F. Scheffer und L. Ludwig: „Das Verhalten v. Strontium-90 in Boden u. Pflanze u. landwirtschaftliche Maßnahmen z. Verminderung der Strontium-90-Verseuchung der Nahrungsmittel“, Atompraxis **4**, 416 (1958), Nr. 11; A/Conf 15/P 220.

⁸⁾ Hinweis auf G. Schumann: Z. Aerosol-Forsch. **6**, 53 (1957).

obersten Schichten des Erdbodens. Infolge einer einzigen Kernwaffenexplosion (Bei der Explosion einer Bombe mit einer Äquivalentsprengleistung von $15 \cdot 10^6$ t TNT entstehen etwa 35 kg Sr⁹⁰.) erfolgt ein Anstieg der Strontiumverseuchung über 15 Jahre^{1,2,3,4}), und erst nach dieser Zeit klingt die Aktivität wieder langsam ab. Die maximal zulässige Sr⁹⁰-Ablagerung auf dem Erdboden wird mit $0,9 \cdot 10^{-4}$ $\mu\text{C}/\text{m}^2 \cdot \text{Tag}$ angegeben⁵). Strontium wird als Erdalkalimetall durch Regenwasser⁶) praktisch nicht ausgewaschen. Pflanzen dagegen können das Element aufnehmen und speichern⁷). Das gleiche gilt für eine Reihe anderer radioaktiver Stoffe.

Nach einer Atomkernwaffenexplosion hat man im Abstand von 300 bis 400 km vom Explosionsort im Tagesmittel eine Luftaktivität von etwa $8 \cdot 10^3$ Teilchen/Minute $\cdot \text{m}^3$ ($3,6 \cdot 10^{-9}$ C/m³) gemessen⁸). Die natürliche Radioaktivität der Luft infolge der Emanation liegt bei 10^{-1} bis 10^{-11} C/m³. Die Toleranzdosis für Rn und Folgeprodukte ist auf 10^{-8} C/m³ festgesetzt⁹). Von den langlebigen radioaktiven Spaltprodukten ist als gefährlich wiederum Sr⁹⁰ zu nennen, dessen Anteil bei unseren Verhältnissen etwa 10 Prozent der Gesamtaktivität der Spaltprodukte ausmacht^{10,1,4}). Durch die von allen bisherigen Kernwaffenexplosionen herrührende Aktivitäts-Sedimentation wird die normale Strahlenbelastung der Erdbevölkerung im Mittel um nur wenige Prozent erhöht. Das wäre an sich praktisch ohne Belang, wenn nicht besondere Spitzenbelastungen aufträten, die einerseits lokal, andererseits aber auch durch die sogenannten „heißen Körnchen“¹¹) (1 Körnchen pro 500 bis 1000 m³ Luft) verursacht werden. Die „heißen Körnchen“ sollen eine lineare Ausdehnung von etwa 0,0002 bis 0,02 mm besitzen; ihre Masse liegt in der Größenordnung von einigen 10^{-12} g und ihre Aktivität bei 10^{-6} bis 10^{-10} C. Als mittlere Lebensdauer dieser einem Spaltproduktgemisch chemisch ähnlichen β -strahlenden Partikel werden etwa 2 Jahre angegeben. Über den Mechanismus ihrer Entstehung ist noch nichts Definitives bekannt. Schädigungen treten insbesondere dann auf, wenn sich derartige Teilchen in der Lunge festsetzen oder sonstwie als Ablagerungen auf Pflanzen über die Nahrung in den menschlichen Körper gelangen.

Mit Nachdruck sei darauf hingewiesen, daß es sich bei den vorstehenden Erörterungen in erster Linie um diejenigen Gefahren handelt, die aus Kernwaffenexplosionen resultieren, und die nur darum hier angeführt wurden, weil aus dem Betrieb von Kernreaktoren noch keinerlei praktische Erfahrungen vorliegen. Mit der friedlichen Ausnutzung der Kernenergie, also mit der Nutzenergiegewinnung aus Atomkernen, haben derartige Explosionen, wie dargelegt, nur wenig gemeinsam. Der Grad der Auswirkungen unterscheidet sich um viele Zehnerpotenzen. Bezüglich der Verursachung von Strahlungsgefahren für die Gesamtbevölkerung kann man

¹) Siehe Fußnote 7 von S. 632.

²) O. Haxel, Frankfurter Strahlenschutztagung (Juni 1956).

³) Hinweis auf C. W. Stanley und F. Krüger: "Determination of Sr⁹⁰ activity by ion-exchange concentration", NU 14, 114 (1956), Nr. 11.

⁴) Zusammenfassende Darstellung über die bisherigen Auswirkungen der Atomkernbomben-Versuchs-Explosionen finden sich z. B. in Science 125, 219 (1957); Umschau 58, 14 (1958), Nr. 1 und A/Conf 8/P.

⁵) A. C. Chamberlain u. a.: A/Conf 8/P 393.

⁶) W. Herbst: Frankfurter Strahlenschutztagung (Juni 1956).

⁷) J. H. Rediske und F. P. Hungate: A/Conf 8/P 278.

⁸) In erster Näherung kann man das gleiche Abstandsgesetz annehmen wie bei der Bodenverseuchung.

⁹) B. Rajewsky: „Strahlendosis und Strahlenwirkung“, 2. Aufl., Stuttgart (1956).

¹⁰) H. F. Hunter und N. E. Ballou: NU 9, C-2 (1951), Nr. 5; siehe auch Eisenbud und Harley: Science 121, 667 (1955).

¹¹) Siehe z. B. B. Groß und A. Aron: Z. Naturforsch. 12a, 944 (1957); J. A. Schedling und W. A. Müller: Atomkernenergie 4, 72 (1959), Nr. 2; W. Altwater: „Beobachtungen über die Sedimentation radioaktiver Partikel in Duisburg im Jahre 1958“, Atomkernenergie 4, 306 (1959), Nr. 7/8.

daher Kernwaffen und Reaktoren nicht in einem Atemzuge nennen, wie es sich in Laienkreisen schon weitgehend eingebürgert hat¹⁾. Abschließend sei noch vermerkt, daß — trotz der durch die Kernwaffenexplosionen in die Atmosphäre gebrachten Aktivitäten — möglicherweise die Luftaktivität im Mittel heute niedriger liegt als z. B. vor 200 Jahren, weil der gleichfalls in der Atmosphäre vorhandene Industriestaub eine bei den zur Diskussion stehenden Größenordnungen durchaus noch ins Gewicht fallende Abschirmwirkung gegen die kosmische Strahlung auszuüben vermag²⁾. Außerdem dürfte die allgemeine Strahlenbelastung der Bevölkerung³⁾ durch die Röntgendiagnostik und die Röntgentherapie sowie durch sonstige Strahlenquellen⁴⁾, wie z. B. Durchleuchtungsgeräte in Schuhgeschäften usw., heute noch mehr ins Gewicht fallen als die Strahlenbelastung infolge der Atomkernbombenabwürfe, sofern nicht Sonderverhältnisse, wie beschrieben, vorliegen⁵⁾. An die Medizin sei daher die Bitte gerichtet, diese Mittel nur so sparsam wie eben möglich einzusetzen. Außerdem sei vor jeder Anreicherung durch Biozyklen (Pflanze → Tier → Mensch) gewarnt.

§ 101. Allgemeine Überwachungs- und Schutzmaßnahmen

Um gegen die Gefahren einer insbesondere durch Kernwaffen verursachten radioaktiven Verseuchung gewappnet zu sein, und um die Bevölkerung vor den Folgen einer solchen zu schützen, scheint eine ganze Reihe von (zum Teil zentralgesteuerten) Maßnahmen angebracht, von denen die wichtigste in einer umfassenden und objektiven Aufklärung der Bevölkerung zu bestehen scheint. Der Kreis der systematisch zu Erfassenden kann nicht weit genug gezogen werden und muß vor allem auch diejenigen Bevölkerungsteile einschließen, die mit der Nahrungs- und Genußmittelherzeugung und -verteilung zu tun haben. Bei der Aufstellung eines umfassenden und dauernden Überwachungsdienstes für die Luft-, die Niederschlags- und die Bodenaktivität⁶⁾ konnte auf der vorhandenen Organisation des Wetterdienstes auf-

¹⁾ Hinweis auf P. R. Arendt: *Atomkernenergie* 2, 335 (1957), Nr. 8/9.

²⁾ Vor einigen 10⁶ Jahren war die kosmische Strahlung erheblich größer als heute. Darin dürfte die Ursache der großen Mutationsraten in den vergangenen geologischen Epochen und damit der Entwicklung aller Lebewesen zu erblicken sein.

³⁾ Hinweis auf: N. G. Stewart u. a.: "The radiological dose to persons in the U. K. due to debris from nuclear test explosions prior to January, 1956", AERE HP/R-2017.

⁴⁾ Durch das Leuchtzifferblatt z. B. einer Armbanduhr entsteht eine Strahlenbelastung von 30 bis 40 mrem pro Jahr.

⁵⁾ Nach Harley (Vortrag auf der Tagung "Health Physics" vom 14. 11. bis 16. 12. 1955 in Stockholm) ist sogar eine gewisse Erhöhung der allgemeinen Strahlungsbelastung der Weltbevölkerung in den folgenden Jahren nicht so sehr in der Verwendung der Atomkernenergie als in der medizinischen Anwendung der Röntgenstrahlen zu Untersuchungszwecken zu erblicken, die vielfach auch durch solche Ärzte geschehe, welche keinerlei Grundkenntnisse über Strahlenschutzfragen besitzen. F. E. Stieve führte im September 1958 in seinem Vortrag anlässlich der Deutschen Therapiewoche in Karlsruhe aus, daß in den amerikanischen und britischen Forschungsberichten und zuletzt auch im Bericht der ICRP (auf Grund von Messungen) festgestellt wurde, daß z. Zt. die medizinische Röntgendiagnostik den Hauptfaktor der Strahlenbelastung der Gesamtbevölkerung darstellt. In dem Bericht des britischen Medical Research Council "The hazards to man of nuclear and allied radiations" (a. a. O.) werden u. a. folgende Vergleichswerte pro Individuum und Generation (30 Jahre) angegeben: Natürl. Belastung 3400, Röntgendiagnostik 700, Röntgentherapie 150 (?), Inkorporation zu diagnostischen und therapeutischen Zwecken < 17, Atomkernbomben-Versuchsexplosionen < 30, berufliche Belastung ohne Reaktorbetriebe 50, Reaktorbetriebe [siehe auch R. F. Farmer: *British J. of Radiology* 30, 83 (1957)] 3, Schuhdurchleuchtung 3, Leuchtzifferblätter von Armbanduhren 30, Fernsehen < 30 rem. Einzeldosen sind in **Tab. XIX, 6** aufgeführt.

⁶⁾ Im Oktober 1957 wurden bereits regelmäßige Aktivitätsmessungen der Luft an 14, des Niederschlags an 15, von Fluß- und Oberflächenwasser an 9 und des Trinkwassers an 10 Stellen der Bundesrepublik durchgeführt. Nähere Angaben in: „Sonderausschuß Radioaktivität Bundesrepublik Deutschland — Erster Bericht“,

gebaut werden¹⁾, dem zweckmäßigerweise auch der Einsatz möglichst vieler mobiler Meßtrupps und die Warnung der Bevölkerung über den Rundfunk unterstehen würde. Die für eine Erweiterung des jetzt bereits bestehenden Netzes erforderlichen Mittel ließen sich relativ niedrig halten, wenn außer auf den Wetterdienst und die zahlreichen freiwillig beteiligten Stellen²⁾ (Industrie, Universitäten, Technische Hochschulen usw.) auch auf die zahlreichen teilvorgebildeten Personen zurückgegriffen würde, wie auf die Physik-, Chemie- und Biologielehrer an den höheren Schulen.

Für eine Überwachung der Luftaktivität³⁾ kommen zwei verschiedene Meßmethoden in Betracht. Die erste beruht auf einer Ionisationskammeruntersuchung. Die Luftprobe wird in eine Ionisationskammer relativ großen Volumens eingefüllt. Durch einen nachgeschalteten Verstärker mit entsprechendem Anzeiger oder Zählwerk läßt sich die Aktivität ermitteln. Für die Eichung ist das Einfüllen einer Gasmenge mit einer entsprechenden normierten Aktivität erforderlich. Der zweiten und am meisten angewandten Meßmethode liegt eine Anreicherung der Luftaktivität in Filtern zugrunde, durch die die Luft hindurchgedrückt und in denen die gesamte oder eine Teilaktivität adsorbiert wird. Anschließend wird die Stärke der Aktivität des Filters durch eine Zählrohrapparatur gemessen.

Die Messung der Aktivität von Niederschlägen oder des Trinkwassers usw. setzt gleichfalls eine Anreicherung voraus. Diese Anreicherung erfolgt zweckmäßigerweise durch Ionenaustauscher (z. B. Mischbettfilter) oder durch Eindampfen. Die Aktivität einer Regenerierfraktion⁴⁾ des Ionenaustauschers oder des Abdampfrückstandes⁵⁾ wird nach den üblichen Methoden, z. B. durch Zählrohrmessung, bestimmt. Eine Eichung der Apparatur ist nach verschiedenen Methoden möglich. Für die Messung der Bodenaktivität sind gleichfalls Verfahren ausgearbeitet worden⁶⁾. Die Aktivität der Luft und der Wolken (Niederschlag) in größeren Höhen ließe sich in gleicher Weise mit Hilfe von Flugzeug- und Ballonaufstiegen ermitteln.

Es würde wahrscheinlich ausreichen, wenn eine kontinuierliche Überwachung der Luft- und Niederschlagsaktivität nur durch einzelne und hinsichtlich ihrer geographischen und lokalen Lage ausgezeichnete Wetterwarten erfolgte. Stellen eine oder mehrere dieser Stationen eine geringfügig erhöhte Aktivität fest, so kann das Beobachtungsnetz verdichtet werden, indem zusätzlich die übrigen Wetter- und ggf. weitere Beobachtungsstellen gleichartige Messungen aufnehmen, deren Auswertung alsdann zentral erfolgen sollte. Bei besonders starken Aktivitäten, die lokal oder auch in einem weiteren Gebiet auftreten können, erfolgt der Einsatz von zusätzlichen festen oder von mobilen Meßtrupps⁷⁾ nach einem vorher aufzustellenden Organisationsplan und im gesteuerten Einsatz. Die Anzahl der in allen Ländern, Städten usw. vorhandenen einsatzbereiten Aktivitätsmeßeinrichtungen kann, im Hinblick auf einen möglichen Atomkrieg und mit Rücksicht auf die immer zahlreicheren Explosionen von Atomkernbomben, nicht groß genug sein.

Stuttgart (Januar 1958). Siehe auch Vorträge auf dem Kolloquium über meteorologische Probleme der radioaktiven Luftverseuchung in Darmstadt am 22.—23. 3. 1957, Beiträge zur Physik der Atmosphäre, Bd. 30 (1958), Nr. 2/3.

¹⁾ Die jetzt bereits dem Wetterdienst übertragenen Aufgaben gehen aus dem Gesetz vom 8. 8. 1955 hervor: Bundesgesetzblatt I, 506 (1955). Nähere Angaben im „Jahresbericht des Deutschen Wetterdienstes“, S. 6/13 (1959), Nr. 6.

²⁾ Siehe Fußnote 6 von S. 634.

³⁾ Siehe z. B. O. Haxel und G. Schuhmann: Naturw. **40**, 458 (1953); D. R. Sawie: NU **14**, 90 (1956), Nr. 8 A/Conf 15/P. 126, 248, 261, 1956, 1959.

⁴⁾ Siehe z. B. H. G. Heitmann und K. R. Schmidt: Mitt. VGB. S. 360 (1954), Nr. 32.

⁵⁾ W. Gerlach: „Untersuchungen über radioaktive Regen“, Atomkernenergie **1**, 237 (1956), Nr. 7/8, **4**, 143 (1959), Nr. 4; A. Sittkus: Naturw. **42**, 478 (1955); siehe auch Chem. Engng. News **30**, 2467 (1952); H. Schmier: „Messung der β - und γ -Aktivität von Niederschlägen“, Atomkernenergie **3**, 346 (1958), Nr. 8/9.

⁶⁾ Siehe z. B. M. Eisenbud und J. H. Harley: Science **117**, 141 (1953).

⁷⁾ Ausrüstung siehe z. B. Atomic **6**, 300 (1955); NU **14**, 69 (1956), Nr. 8.

Fallen aktive Niederschläge, oder erfolgt eine radioaktive Sedimentation, so sollte sich die Bevölkerung des betroffenen Gebietes diesen möglichst nicht aussetzen, und das Vieh sollte von den Weiden abgetrieben werden. Jegliche Ernte sollte bis nach dem nächsten nichtaktiven Niederschlag verschoben werden. Nach starken oder nach mehrmaligen leichten Bodenverseuchungen müssen alle in dem betroffenen Gebiet erzeugten Naturprodukte einer Kontrolle¹⁾ zugeführt werden, bevor ihre Freigabe zur Verwendung als Nahrungs- oder Genußmittel erfolgt. Die gleichen bzw. entsprechende Vorsichtsmaßregeln sollten ggf. auch beim Import¹⁾ von Nahrungsmitteln aus radioaktiv verseuchten Gebieten ergriffen werden. Daß eine Kontrolle des meist durch kommunale Institutionen oder Verbände gelieferten Trink- oder Gebrauchswassers¹⁾ erfolgt, scheint selbstverständlich. Hinsichtlich der von Personen aufgenommenen Strahlungsdosen bei langzeitiger schwacher Dauerbelastung gingen alle physikalischen, physiologischen und biologischen Testreaktionen²⁾, wie Ausscheidung von Steroidhormonen, Aminosäuren usw., fehl; Blutbildänderungen machen sich, wie ausgeführt, erst nach 50 bis 100 r Ganzkörperbestrahlung bemerkbar³⁾. Aus diesem Grunde wird erwogen, weiten Teilen der Bevölkerung Dosimeter zur Verfügung zu stellen⁴⁾. Vor allem kommen hierfür lichtdicht verpackte Filmstreifen [Plättchen- oder Ringform⁵⁾] in Frage, die an zentralen Stellen entwickelt und photometriert werden müssen. Unter Umständen ist die Kombination einer Erkennungsplakette mit einem solchen Meßfilm zweckmäßig. Solche Kombinationen werden bereits serienmäßig hergestellt. Die Hersteller- und Lieferfirmen⁶⁾ bieten zum Teil auch Auswertegeräte (Photometer) an, mit denen bis zu 60000 Filme am Tag getestet werden können. Filmdosimeter arbeiten, wie durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt festgestellt, mit einem Fehler von etwa ± 20 Prozent. Da es sich bei einer radioaktiven Verseuchung im allgemeinen um Langzeitbestrahlungen mit geringen Aktivitäten handelt, ist diese Genauigkeit in den meisten Fällen hinreichend. Das Radiologische Institut der Universität Freiburg und die Beratungsstelle für Strahlenschutz und Dosimetrie an der Medizinischen Universitätsklinik Erlangen haben dieses Verfahren für die Überwachung des Bedienungspersonals von Röntgenanlagen weitgehend entwickelt und in einem Großversuch überprüft⁷⁾. Den Filmen kann eine Reihe von Filtern vorgeschaltet werden, die für die einzelnen Strahlungsarten und Intensitäten verschieden durchlässig sind, so daß auch auf die Art der Strahlung und auf deren Dosis geschlossen werden kann. Auch für die Strahlenschutzringe sollen neuerdings einlegbare Filter im Handel erhältlich sein. Auf die im Katastropheneinsatz, bei der Explosion einer Atombombe, zulässigen Bestrahlungs- usw. Dosen wurde in Paragraph 98 eingegangen.

¹⁾ Derartige Untersuchungen werden in der B. R. jetzt bereits in beschränktem Umfang im Rahmen der Arbeiten des „Sonderausschuß Radioaktivität“ durchgeführt; siehe dessen ersten Bericht vom Januar 1958 (Stuttgart, G. Thieme).

²⁾ Eine Meßmethode für die von einem Menschen aufgenommene und für die natürliche inkorporierte Radioaktivität geben P. R. J. Bursh und D. B. Appleby: „Assay of γ -radiation from the human body“: *Atomies* **6**, 195 (1955); „Measurement of body radioactivity“, *Nucl. Engng.* **1**, 78 (1956), Nr. 2; R. B. Owen: „The measurement of radio-activity in the human body by Na-Tl scintillation counters“, *AERE EL/R-1851*; H. G. Mehl: „In-vivo-Messung von Aktivitätsmengen natürlich und künstlich radioaktiver Substanzen im menschlichen Organismus“, *Atomkernenergie* **1**, 401 (1956), Nr. 11/12.

³⁾ Siehe B. Rajewsky: „Strahlendosis und Strahlenwirkung“, Stuttgart (1954), S. 7.

⁴⁾ Hinweis auf Sievert: *A/Conf 8/P 792*.

⁵⁾ Herstellung durch Physikalisch-Technische Werkstätten GmbH, Freiburg i. Br., Merzhausenstr. 80. (Siehe auch: Fortschritte 52/2.)

⁶⁾ Z. B. Total Kom. Ges. Foerster & Co., Mannheim-Ladenburg.

⁷⁾ H. Langendorff und F. Wachsmann: „Strahlenschutzüberwachung mit Filmen“, *Bundesarbeitsblatt* 665 (1953), Nr. 21 sowie *Atomkernenergie* **3**, 60 (1958), Nr. 2. Siehe auch *BWK* **6**, 205 (1954), Nr. 6.

XXI. Kernreaktor und Atomkraftwerk im Betrieb

§ 102. Überwachungs¹⁾- und Schutzmaßnahmen²⁾

Die Gefahren, die die Gewinnung von Nutzenergie aus Atomkernen mit sich bringt, liegen weniger auf der eigentlichen Betriebsseite des Reaktors als in den vagabundierenden Aktivitäten, die vor allem bei Reparaturen und bei der chemischen Aufbereitung bestrahlter Reaktorfüllungen freigesetzt werden. Die beim Betrieb eines Kernreaktors entstehende Aktivität läßt sich nämlich mit den zur Verfügung stehenden Mitteln relativ einfach örtlich begrenzen. Schäden am arbeitenden Menschen wurden eigentlich nur bei leichtsinnigem Verhalten beobachtet, d. h. wenn auf die vorgeschriebenen Schutzmaßnahmen nicht oder nicht genügend geachtet wurde. Die Abschirmung von Reaktoren wird gewöhnlich so ausgelegt, daß $1/10$ bis $1/100$ der höchst zulässigen Dosis für die langzeitige Ganzkörperbestrahlung an keiner Stelle überschritten wird³⁾. Die größte Gefahr, die der Reaktorbetrieb normalerweise mit sich bringt, resultiert aus Undichtigkeiten, durch die Spaltprodukte entweichen können, aus der Neutronenbestrahlung der Umgebung, z. B. durch die thermischen Säulen in Versuchsanlagen, und aus Aktivitäten, die z. B. dem Kühlmittel anhaften.

Bei allen Reaktor- und Aufbereitungsanlagen sowie in allen Betrieben, in denen größere oder kleinere Aktivitäten verarbeitet werden, ist eine Sicherheitszoneneinteilung angebracht. In jeder Zone muß kontinuierlich eine den Verhältnissen angemessene Überwachung stattfinden, die hier, einem Leistungsreaktor bzw. Atomkraftwerk angepaßt, beschrieben werden soll. Selbstverständlich können in diesem Rahmen nur generelle Gesichtspunkte erörtert werden, da die zu ergreifenden Maßnahmen — abhängig von der Anlage selbst und von ihren Eigenarten — von Fall zu Fall direkt unterschiedlich sein können. Die folgende Beschreibung ist also nur als Beispiel zu werten. Die äußerste Sicherheitszone⁴⁾ muß je nach den geographischen und meteorologischen⁵⁾ Verhältnissen und Gegebenheiten festgesetzt werden. Eine Norm hierfür läßt sich nicht aufstellen, zumal die zu wählende Tiefenstaffelung auch vom Typ des Reaktors abhängig zu machen ist; manche Typen können sogar — wie auch bereits geschehen — ohne weiteres innerhalb von Städten Aufstellung finden. Selbstverständlich sollte die Ausdehnung der äußeren Schutzzone bei Reak-

¹⁾ Hinweis auf A. Graves: "Radiation tolerance control", *Atomics* **6**, 278 (1955), AECU-817 (1950); TID-388 (1951); P. R. Arendt: „Können Reaktoren strahlungssicher sein?", *Atomkernenergie* **2**, 335 (1957), Nr. 8/9; S. Kinshan und D. J. Nelson Jr. (Herausgeber): "Radiological health", Cincinnati, Federal Security Agency (Sept. 1952); H. Müller: „Der Strahlenschutz an Kernreaktoren“, *AEG Mitt.* **48**, 38 (1958), Nr. 1; A/Conf 15/P 426, 430, 553, 743, 745.

²⁾ Hinweis auf: A/Conf 8/P 853 sowie 689, 778 und 400; A. S. McLean: "Radiological protection on trial", *Nucl. Engng.* **1**, 107 (1956), Nr. 3; W. Jakobi und B. Rajewsky: „Schutzmaßnahmen“, *Z. VDI.* **9**, 163 (1957), Nr. 4; G. H. Whipple: "Radiation-hazard control for a power reactor", *Mech. Engng.* **79**, 253 (1957), Nr. 3; H. J. Dunster: "The designer and radiation protection", *Nucl. Engng.* **1**, 144 (1956), Nr. 4; K. Bechert: „Probleme des Strahlenschutzes“, *Atomkernenergie* **1**, 219 (1956), Nr. 6; W. Gutmann: „Sicherheitsprobleme bei der Energieerzeugung aus Atomkernen“, *Atomkernenergie* **1**, 222 (1956), Nr. 6; "Reactor safety, a selective bibliography", TID-3073 (1958); "A quantitative approach to evaluation of risk in locating a reactor on a given site", A/Conf 15/P 436; G. C. Butler u. a.: "Health and safety in Canadian operations", A/Conf 15/P 184; "Health physics work and experience in a small atomic energy establishment", A/Conf 15/P 577; A. Butterworth u. a.: "Radiological protection at the Springfield Works of the U. K. Atomic Energy Authority", A/Conf 15/P 295; A. S. McLean u. a.: "District surveys following the Windscale incident", A/Conf 15/P 316; "Radiation protection records at a major atomic energy facility", A/Conf 15/P 758; F. R. Farmer u. a.: "Safety and siting considerations for gas cooled thermal reactors of the Calder Hall type", A/Conf 15/P 2331; H. J. Dunster u. a.: "Control of radiation exposure in the U. K. atomic industry", A/Conf 15/P 302; J. D. A. Blatt: "Health and safety in the development of nuclear energy" *GEC Atomic Energy Review* **1**, 195 (1958), Nr. 4. Siehe auch: „Richtlinien für den Schutz gegen ionisierende Strahlen in der Medizin, in Laboratorien, Gewerbe- und Fabrikationsbetrieben“: Eidgenöss. Gesundheitsamt Bern (1955).

³⁾ Dieser Wert ist durch die Meßgeräte bedingt. Siehe auch G. Wiesenack *BWK* **9**, 320 (1954).

⁴⁾ Hinweis auf A/Conf 8/P 278 u. 281. ⁵⁾ Siehe auch F. D. White u. D. N. Paek, *NESC Bericht* Nr. 6 (1955).

toren mit offenem Kühlkreis weiter gesteckt werden als bei Anlagen, die praktisch keinerlei Aktivität um sich verbreiten. Wird Kühlwasser o. ä. in einen Fluß oder in einen Teich abgelassen, so muß ein großer Teil, wenn nicht das gesamte Ablaufgebiet in die äußere Schutzzone einbezogen und ständig überwacht werden. Bei den Windscale-Anlagen in Sellafield z. B. hatte man zeitweise in einem Gebiet bis rund 32 km Umkreis um die Reaktoren regelmäßig Aktivitätsmessungen durchgeführt¹⁾. Die Dichte der Meßpunkte nahm von den Reaktoren aus nach außen hin ab. Alle 240 Meßpunkte wurden regelmäßig von einem fahrbaren Strahlungsmeß-Laboratorium besucht. In jedem von ihnen wurden die γ -Dosis sowie die α - und die β -Luftaktivität gemessen. Gleichzeitig erfolgte regelmäßig die Entnahme von Boden- und Pflanzen- sowie Wurzelproben, die im Stationslabor auf ihre Aktivität untersucht wurden. Strenge Vorschriften und eine laufende Überwachung²⁾ werden eine Gewähr dafür bieten, daß die für die in einem solchen Schutzgebiet ansässige Bevölkerung zulässige Strahlenmenge nicht überschritten wird.

In der nach innen anschließenden mittleren Sicherheitszone müssen Überwachung und Warndienst — bei im offenen Kreislauf gekühlten Anlagen insbesondere auch bezüglich der erzeugten landwirtschaftlichen Produkte — straffer organisiert sein. Zur mittleren Zone gehört normalerweise nur das eigentliche Werksgelände.

Zur inneren Zone gehören alle diejenigen Teile einer Reaktor- oder Aufbereitungsanlage, die innerhalb der technischen Betriebsgebäude liegen. Die Grenzen der inneren Zone, zu der Unbefugte keinen Zutritt haben, müssen scharf bewacht und sollten deutlich bezeichnet sein. Durch eine überlegte bauliche Gestaltung der Betriebsgebäude usw. innerhalb der inneren Zone und eine Beschränkung der Zahl der Eingänge läßt sich die Kontrolle erheblich vereinfachen. Jeder Eintretende wird namentlich erfaßt und erhält ein besonderes Strahlungsdosimeter, z. B. ein Film-dosimeter in der Form einer Ansteckplakette oder eines Ringes oder ein Taschendosimeter in Form eines Füllfederhalters, nach dem Ionisationskammer-Elektrometerprinzip³⁾. Derartige Instrumente besitzen einen kleinen Meßbereich und eine relativ hohe Meßgenauigkeit, so daß sie für die Messung stärkerer, über kurze Zeiten wirksamer Aktivitäten besonders geeignet sind. Außerdem kann ein nach einem Spezialverfahren⁴⁾ hergestelltes (blaues) Farbglass, das sich beim Überschreiten der höchst zulässigen Bestrahlungsdosis entfärbt, verwendet werden. Da sich die Farbe nach dem Aufhören der Bestrahlung langsam zurückbildet, kann das Glas immer wieder aufs neue benutzt werden. Die Dosimeter sind beim Wiederverlassen der inneren Zone abzugeben. Die aufgenommene Dosis⁵⁾ sollte laufend in einem Gesundheitsbuch nachgetragen

¹⁾ D. R. R. Fair: A/Conf 8/P 771. "Reactor monitoring", *Atomies* 8, 181 (1957), Nr. 5.

²⁾ Hinweis auf G. M. Corney und H. M. Cleare: "Disaster monitoring with amateur and commercial photographic films", *NU* 13, 40 (1955), Nr. 8; D. G. Boyer: "Film-badge dosimetry: development of a standard calibration curve", *NU* 13, 106 (1955), Nr. 11; K. O'Brien u. a.: "A system of film-badge interpretation", *NU* 14, 58 (1956), Nr. 10; L. H. M. van Stekelenburg: "New film badge enables cheaper X-ray monitoring", *NU* 16, 83 (1958), Nr. 6; K. Becker: „Grundlagen und Möglichkeiten der Film-dosimetrie“, *Atompraxis* 4, 168 (1958), Nr. 5; H. R. Schinz und W. Eberhard: „Ergebnisse der Strahlenschutz-Film-dosimetrie am Kantonsspital Zürich“, *Schweiz. Med. Wochenschrift* 88, 280 (1958).

³⁾ Lieferfirmen: Beckmann Instruments, Inc., Richmond, Calif. (Deutsche Vertretung: Günther & Tegetmeyer GmbH, Braunschweig); Paul Firchow Ngr., Frankfurt/M., Berlin, Hamburg; Landsverk Electrometer Company of Glendale, Calif.; Friesecke & Hoepfner GmbH, Erlangen-Bruck; Philips, Eindhoven, Holland: usw. Hinweis auf *Atomies* 6, 240 (1955) sowie § 123.

⁴⁾ K. O. Otley und W. Wehl: US Patent Nr. 2722519 (Auswertung: US Army).

⁵⁾ Zur Überwachung der Toleranzdosis ist zunächst die Ortsdosis zu bestimmen [H. Langendorff und F. Wachsmann: „Strahlenschutzüberwachung mit Filmen“, *Bundesarbeitsblatt* S. 665 (1953) Nr. 21]. Zu diesem Zweck wird laufend in allen Teilen des Werkes, in denen sich Personen aufhalten, mit Ionisationskammern hoher Empfindlichkeit oder mit Zählrohrgeräten die Dosisleistung in [r/min] bzw. [μ r/s] bestimmt. Diese Messung muß zusätzlich durch die laufende Bestimmung der „Personendosis“ ergänzt werden. Siehe

werden. Außerdem empfängt jeder Eintretende einen frischen Staubmantel, der die normale Bekleidung vor eventuell radioaktivem Staub schützt. In allen Fällen und an allen Stellen ist eine unbedingte Strahlungshygiene¹⁾ am Platze. Unter allen Umständen muß jede Verschleppung von Aktivitäten unterbunden werden. Auf das automatische Warnsystem für die innere Zone wird im Rahmen der Regelungstechnik eingegangen.

Die Durchführung von Reparaturen an allen „heißen“ Teilen einer Reaktor- oder Aufbereitungsanlage bringt Gefahren mit sich, die besondere Sicherheitsmaßnahmen und Einrichtungen notwendig machen. Es sind Spezialgeräte entwickelt worden, die eine Fernbedienung ermöglichen. Auch fernbediente, vollständig abgeschirmte Werkzeugmaschinen werden zur mechanischen Bearbeitung verwendet, wobei das Bedienungspersonal den Vorgang durch strahlungshemmende Glasfenster²⁾ beobachtet. Häufig sind Fernsehgeräte zum Beobachten und Bedienen eingesetzt. An vielen Stellen werden fernbediente und zum Teil ortsfeste Manipulatoren³⁾ verwendet. Bei größeren Reparaturen schwierigerer Art hat man bereits verschiedentlich ein originalgetreues (inaktives) Abbild der zu reparierenden Anlage aufgebaut. An diesem Modell wurden diejenigen Handgriffe und Arbeiten vorgeübt, die anschließend an der „heißen“ Anlage durchzuführen waren. Jeder Arbeiter durfte nur während einer sehr kurzen und vorher genau berechneten Zeit für die wirkliche Reparatur eingesetzt werden. In einem Fall (USA) hat man einige hundert Marine-soldaten für eine solche Reparatur abkommandiert. In Sellafield hatte sich im November 1955 eine Platte aus der Abschirmung gelöst. Die vorher an einem inaktiven Modell geübten Reparaturhandgriffe wurden mit Hilfe einer beweglichen Spezialkabine von mehreren Tonnen Gewicht ausgeführt. Hierzu wurden 250 Mann der Belegschaft je 15 Minuten lang eingesetzt. Bei jeder Reparatur an „heißen“ Teilen erhalten stets ein oder mehrere Arbeiter einen Strahlenschutz-Fachmann zugeordnet, der die aufgenommene Personendosis laufend überwacht⁴⁾. Wird die höchst zulässige Grenzdosis erreicht, so ist die Arbeit sofort abzubrechen. Auf die in radioaktiven Laboratorien zu ergreifenden Maßnahmen wird später eingegangen.

Ein Problem eigener Art⁵⁾ bereiten die sekundären Aktivitätsquellen⁶⁾ in der Form von Staub und Aerosolen⁷⁾. Besondere Vorsicht ist bei allen Versuchsreaktoren⁸⁾ mit thermischen Säulen und Experimentierlöchern am Platze, aus denen nach der Bestrahlung starke sekundäre Aktivitätsquellen entnommen werden. Aus dem Reaktorkern ausgebaute Teile, wieder aufzubereitende Spaltstoffe, Graphit usw. müssen unter Einhaltung zahlreicher Vorsichtsmaßnahmen und gut abgeschirmt transportiert und behandelt werden. Charakteristisch für die Wirkung selbst kleinster „offener“ Aktivitäten ist ein Unfall, der sich 1953 in einem Universitätslaboratorium in den USA ereignete⁹⁾. Dort blieb 17 Stunden lang unbemerkt, daß der Inhalt

auch Fortschr. Röntgenstr. **77**, 143 (1952); G. E. Hine: Am. J. Roentgenolog. **72**, 293 (1952); R. Hoschak: Arbeitsschutznachrichten, Bundesinst. Arbeitsschutz Bd. **58** (1954); "Health physics monitoring instruments and methods: information bibliography" IGRL — IB/R-26 (1957).

¹⁾ Hinweis auf W. Binks: A/Conf 8/P 400; G. M. Burgwald und L. Reiffel: NU **11**, 46 (1953) Nr. 3.

²⁾ Strahlungsschutz-Bleiglas mit einer Dichte von 2,7, 3,2 und 6,2 g/cm³ (schlechte optische Eigenschaften) wird z. B. von den Corning Works in Harrodsburgh (USA) hergestellt.

³⁾ Hinweis auf §§ 134 und 135.

⁴⁾ Siehe z. B. D. Taylor: "Portable radiation monitors", Nucl. Engng. **1**, 15 (1956), Nr. 1.

⁵⁾ Wegen der Gefahren, die der Umgang mit Isotopen mit sich bringt, wird auf R. Berthold und O. Vaupel: Atomwirtschaft **2**, 88 (1957), Nr. 3 hingewiesen.

⁶⁾ Hinweis auf J. M. Smith Jr.: NU **11**, 41 (1953), Nr. 6.

⁷⁾ Hinweis auf W. G. Marley und T. M. Fry: A/Conf 8/P 384 und dort angegebene Literaturstellen sowie W. Herbst: Z. S. Aerosol-Forsch. **4**, 473 (1955); NU **15**, 80 (1957), Nr. 3; K. E. G. Perry: AERE EL/R-1753 (1955).

⁸⁾ Hinweis auf W. G. Marley und B. S. Smith: A/Conf 8/P 452. Über die entsprechenden Erfahrungen bei den Hanford-Werken berichtet H. M. Parker: A/Conf 8/P 240. Siehe auch A. J. Cipriani: A/Conf 8/P 8.

⁹⁾ R. K. Skow, V. V. Vandivert und F. R. Hoden: NU **11**, 45 (1953), Nr. 8.

eines Gefäßes, das nur 40 mg einer Radiumsulfatlösung enthielt, verschüttet worden war. Noch nach drei Tagen entsprach in diesem Raume die langlebige α -Aktivität der Luft dem 3000fachen der zulässigen Dosis. Alle Gegenstände, mit denen die Studenten inzwischen in Berührung gekommen waren, wurden mehr oder weniger stark verseucht, und man konnte die Spuren jedes einzelnen genau verfolgen. Selbst an den Bremspedalen und Lenkrädern der von ihnen benutzten Wagen wurde Aktivität nachgewiesen. Zur Reinigung der Haut wurde eine Lösung mit 3 Prozent Trinatriumzitat, 0,4 Prozent eines handelsüblichen Reinigungsmittels und 0,1 Prozent eines Entkeimungsmittels (p_H -Wert 7) bei 45 bis 50° C verwendet¹⁾.

In den Ausrüstungsgegenständen, Werkzeugen, Baumaterialien usw., die der Strahlung einer primären oder sekundären Aktivitätsquelle ausgesetzt sind, kann, wie in den Paragraphen 21 und 57 ausgeführt, neue Aktivität induziert werden. Außerdem nehmen derartige Gegenstände auf Grund von Oberflächenadsorption sehr leicht mehr oder weniger große Aktivitäten an. Ist eine Beseitigung der Aktivität durch Entseuchen nicht möglich, so müssen die betreffenden Gegenstände ständig in der aktiven Zone verbleiben oder dem Abfall zugeführt werden. Eine Entseuchungsmöglichkeit wird durch glatte und nicht poröse sowie durch nicht ionisierende Oberflächen begünstigt²⁾. Außerdem wirkt eine gute chemische Korrosionsfestigkeit im gleichen Sinne. Eine Entseuchung ist entweder auf chemischem Wege, also durch Auflösen und Abspülen der verseuchenden Stoffe, oder mechanisch³⁾ durch Scheuern usw., möglich⁴⁾. In beiden Fällen wird meist die Oberfläche beschädigt und somit eine erneute Verseuchung begünstigt. Als Entseuchungsfaktor wird — analog zum Entgiftungsfaktor⁵⁾ — die Aktivität des mit Wasser vorgereinigten Gegenstandes vor der Behandlung, bezogen auf die Aktivität nach der Behandlung, definiert. Für den Entseuchungsfaktor finden sich in der Literatur u. a. folgende, auf ein Spaltproduktengemisch bezogene Angaben:

Beton	≈ 0%	polierter, rostfreier Stahl	≈ 60%	Glas	≈ 75%
Blei	≈ 25%	Flurfliesen	≤ 65%	Polyäthylen	≥ 99%

Die meisten Erfahrungen liegen über die Entseuchung von rostfreiem Stahl vor: Nach einer sorgsam mehrmaligen Spülung mit Wasser trägt man heiße 10prozentige Salpetersäure auf, die etwa 15 Minuten lang einwirken soll. Zur Nachbehandlung wird heiße 10prozentige Oxalsäure, 10prozentige Natronlauge, 0,5prozentiges Ammoniumfluorid oder gegebenenfalls auch Salzsäure oder Fluorwasserstoff empfohlen. Es hat sich herausgestellt, daß Ionenaustauscher-Materialien, Komplexe und Chelatverbindungen, z. B. Versene, nur schwach wirksam sind, weil die adsorbierte Aktivität offenbar nicht in Ionenform vorliegt. Auch eine Behandlung mit inaktiven Lösungen der gleichen chemischen Zusammensetzung wie die verseuchende Aktivität hat sich bei rostfreiem Stahl als unwirksam erwiesen. Wird eine flüssige, aktive Lösung, z. B. in einem Chemielabor, verschüttet, so beachte man folgende Regeln⁶⁾:

1. Sofortige (aber nicht überstürzte) Aufnahme der Entseuchungsarbeit.
2. Beschränkung der Aktivität auf einen kleinstmöglichen Raum bzw. Fläche; also keine Verstreuung.

¹⁾ Weitere Ausführungen über die Hautreinigung folgen unten.

²⁾ Hinweis auf H. Dreiheller und E. H. Graul: „Verwendung abziehbarer Lacke zum Schutz gegen radioaktive Verseuchung“, *Atompraxis* 4, 177 (1958), Nr. 5.

³⁾ Auch z. B. durch Ultraschall. Anlagen hierfür liefert u. a. die Acoustica Associates Inc.

⁴⁾ Hinweis auf: M. B. Hawkins: „Engineering approach to radiological decontamination“, *Mech. Engng.* 79, 920 (1957), Nr. 10; ASME-Bericht 57-SA-52; „Radioactive decontamination procedures and equipment: information bibliography“, IGRIL — IB/R-27 (1957).

⁵⁾ Siehe § 89.

⁶⁾ Hinweis auf S. M. Gorodinsky und W. L. Schtscherbakow: *Atomnaja Energija* 3, 141 (1957), Nr. 8.

3. Aufnahme eines möglichst großen Teils der verschütteten Lösung vor der Zugabe von Verdünnungsmitteln, z. B. mit Lappen oder Löschpapier.
4. Verseuchten Bereich immer feucht halten.
5. Mehrmaliges Laugen, z. B. mit Wasser und Salpeter- oder Zitronensäure, bis Aktivität auf annehmbar niedrigen Betrag abgesunken.

Schutzkleidung und Atemfilter sind immer dann erforderlich, wenn eine Luftverseuchung, insbesondere durch α -Strahler, vorliegt. In vielen Fällen, vornehmlich bei Fußböden¹⁾, ist ein Auswechseln der verseuchten Flächen erforderlich. Zur Entseuchung der Haut sind im allgemeinen alle diejenigen Hautreinigungsmittel geeignet, die kein Benetzungsmittel und keine Komplexbildner enthalten, da im anderen Falle die Gefahr besteht, daß die Aktivität in die Haut hineingerieben wird oder sogar direkt eindringt. Für den Bedarfsfall sollte man in allen Laboratorien usw. entsprechende Seifen bereithalten. Außerdem empfiehlt sich die Aufzeichnung einer entsprechenden Waschroutine in allen aktiven Laboratorien usw., die etwa folgendermaßen aussehen mag:

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Waschen mit großen Wassermengen; Messen. 2. Ist die Aktivität nicht entfernt:
Waschen mit Spezialseife der charakterisierten Art²⁾; Abspülen; Messen. | <ol style="list-style-type: none"> 3. Ist die Aktivität nicht entfernt:
Waschen mit Kaliumpermanganatlösung³⁾; Abspülen; Messen. 4. Ist die Aktivität noch nicht entfernt:
Waschen mit verdünnter (1:10) Salpetersäure; Abspülen; Messen; Eincremen. |
|--|---|

Die Methode 4. wirkt mit ziemlicher Sicherheit, greift jedoch die Haut an, so daß man sie nicht gerne anwendet. Im übrigen sei vermerkt, daß man bei allen Aktivitäten meist mit Gummihandschuhen und unter Wahrung größter Vorsicht arbeitet, so daß starke Verseuchungen der Haut relativ selten auftreten.

Über die Kardinalfrage nach den Möglichkeiten und den Auswirkungen des „Durchgehens“ eines Kernreaktors kann leider eindeutig und erschöpfend nicht berichtet werden, denn teils liegen in den Ländern, die Atommeiler betreiben, selbst noch keine Erfahrungen vor, teils werden sie immer noch geheim gehalten. Fest steht jedoch, daß in einem solchen Falle, wenn sich also die Kettenreaktion — trotz aller Sicherheitseinrichtungen — einmal der Regelung entzieht, so daß ein unkontrolliertes Ansteigen der Spaltungsrate die Folge ist, nicht etwa die Gefahr einer Explosion besteht, wie sie von der Atomkernbombe bekannt ist. Durch die Art der Reaktorkonstruktion wird dies unmöglich gemacht. Den Gefahrenherd stellt vielmehr die im Reaktorkern aufgespeicherte Aktivität⁴⁾ dar, die in einem weiten Umkreis zu erheblichen biologischen Schädigungen des Bedienungspersonals und auch der Nachbarschaft führen könnte, wenn davon auch nur ein Bruchteil freigesetzt würde. Den Berechnungen über die Reichweite der in einem solchen Fall freiwerdenden Strahlungsdosis liegen, mangels konkreter Unterlagen, Annahmen zugrunde, die durch Erfahrungswerte heute noch nicht genügend erhärtet sind⁵⁾.

¹⁾ Hinweis auf H. J. Dunster: „Contamination of surfaces by radioactive materials, the derivation of maximum permissible levels“, *Atomics* **6**, 233 (1955); P. C. Tompkins und O. M. Bizzell: „Working surfaces for radiochemical laboratories — glass, stainless steel and lead“, *Ind. Eng. Chem.* **42**, 1469 (1950); P. C. Tompkins, O. M. Bizzell u. C. D. Watson: „Working surfaces for radiochemical laboratories — paints, plastics and floor materials“, *Ind. Eng. Chem.* **42**, 1475 (1950); G. S. Sadowski: „Decontamination of processing plants“, *NU* **15**, 68 (1957), Nr. 3; J. B. Huff: „Tests of decontamination for steel, lead and glass“, *NU* **15**, 106 (1957), Nr. 6.

²⁾ In den USA verwendet man hierfür „die sugarbeet soap“, ein Nebenprodukt der Zuckerrübenindustrie.

³⁾ Die entstehenden braunen Flecke können mit Natriumbisulfit entfernt werden.

⁴⁾ Hinweis auf D. Duffey: „Fission-product potential of commercial reactors and their processes“, *NU* **11**, 9 (1953), Nr. 10; E. P. Wigner und K. Way: „Radiation from fission products“, *MDDC-48* (1946).

⁵⁾ G. Wiesenack: „Sicherheitsfragen beim Atomkraftwerk“, *BWK* **6**, 320 (1954), Nr. 8. Hinweis auf A/Conf 15/P 430 und 553.

Abbildung XXI, 1 zeigt das Ergebnis eines von Hurwitz¹⁾ durchgeführten Vergleiches. Hurwitz hat seiner Berechnung eine Reaktorleistung von 1000 MW zugrundegelegt. Die gesamte γ -Aktivität beträgt für diese angenommene Leistung etwa $6 \cdot 10^9$ Curie.

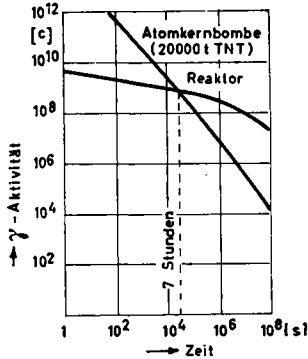


Abb. XXI, 1.
 γ -Aktivität eines 1000 MW-Reaktors. abhängig von der Zeit, nach Hurwitz

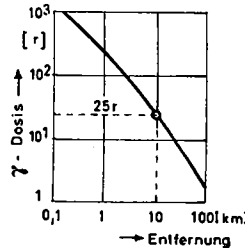


Abb. XXI, 2. γ -Strahlungsbereich eines 1000 MW-Kernreaktors nach Hurwitz. Annahme: 1% der im Reaktor gespeicherten γ -Aktivität entweicht; ungünstige atmosphärische Bedingungen

Bei der Langlebigkeit der im Reaktorkern aufgespeicherten Aktivität wäre diese gesamte Strahlungsintensität nach 7 Stunden gleich der einer Atomkernbombe, deren Explosionswirkung einer Sprengstoffmenge von 20000 t Trinitrotoluol entspricht. Unter der Annahme, daß 1 Prozent der γ -Strahlung entweicht und die radioaktive Wolke durch ungünstige atmosphärische Bedingungen zu Boden gedrückt, also vom Wind nicht weitertransportiert wird, d. h. unter Annahme ungünstigster Bedingungen, würde diese Strahlungsenergie gemäß Abbildung XXI, 2

Tab. XXI, 1. Reichweiten der Gefährdungszonen in Windrichtung bei einem Reaktor-zwischenfall²⁾

Gefahrenlage	Reichweite in km bei einer Reaktorenergie in kW				
	100	1000	10000	50000	100000
Direkte Strahlenwirkung aus der radioaktiven Wolke tödlich oder schwer gesundheitsschädigend	0,06	0,2	0,6	1,4	2,0
Verseuchung der Umgebung macht eventuell Evakuierung innerhalb 12 Stunden nötig (25 r in 12 h) . . .	0,3	1,1	3,4	7,8	11,0
Wahrscheinliche Grenze der Gefährdung durch äußere β - und γ -Strahlung aus abgelagertem radioaktivem Material (25 r in drei Wochen) . . .	0,7	2,3	7,3	16,3	23,0
Empfindlichere Einschränkung der normalen Lebensgewohnheiten; Boden, Pflanzen, Wasser und Milch radioaktiv verseucht; stärkere Gefahr der Inkorporierung radioaktiver Stoffe	1,6	5,2	16,4	36,8	52,0
Wahrscheinliche Grenze der Restriktionen, aber Milch eventuell noch gefährlich radioaktiv	5,7	18,0	57,0	128,0	180,0
Wahrscheinliche äußere Grenze irgendwelcher, auch geringer Beeinträchtigungen durch die radioaktiven Spaltprodukte	(19)	(60)	(190)	(425)	(600)

¹⁾ H. Hurwitz: "Safeguard considerations for nuclear power plants", NU 12, 57 (1954), Nr. 3.

²⁾ W. Herbst: Z. f. Aerosolforschung 4, 73 (1955).

in einem Umkreis bis zu 10 km die einmalig ohne Schädigung zu ertragende Dosis von 25 Röntgen übersteigen. Zusammenfassend kann man sagen: Sollte es — entgegen aller Wahrscheinlichkeit — zu einer Totalkatastrophe kommen, so ist deren Ausmaß eine Funktion der Wärmeleistung des Reaktors und der im Augenblick des Schadens vorherrschenden Wetterlage. Im Zentrum der Katastrophe, in dem die direkte γ - und Neutronenstrahlung wirksam ist, verlaufen alsdann die Isodosen kreisförmig. Darüber hinaus ist — je nach der Windstärke — mit einer elliptischen Form zu rechnen. Nach den Berechnungen von *Herbst*¹⁾, die auf Grund der Angaben von *Marley* und *Frey*²⁾ angestellt wurden, ergeben sich die in **Tabelle XXI, 1** wiedergegebenen Reichweiten der Gefährdungszonen in der Windrichtung, die jedoch je nach der vorherrschenden Wetterlage um Größenordnungen differieren können. Niederschläge können die Gefährdung um einen Faktor 10 erhöhen und die Gefährdungszonen erheblich vergrößern. Besonders unangenehm wirken sich plötzlich einsetzende Windstillen aus, die die Aktivität in Bodennähe merklich steigern.

Trotz der Vielzahl der bereits in Betrieb befindlichen Reaktoren³⁾ ist ein schwerer Unfall, der breitere Bevölkerungskreise ernsthaft in Mitleidenschaft gezogen hat, bisher noch in keinem einzigen Fall eingetreten, obwohl es auch für einen Reaktor — wie für alle Industrieanlagen und trotz aller Sicherungen — keine 100prozentige Sicherheit gibt. Nach *Teller* ist auch ein Reaktor kein „narrensicheres System“; technisches und menschliches Versagen muß hier, wie überall, in Rechnung gestellt werden. In einem großen Referat über den Gefahrenschutz in amerikanischen Kernenergiebetrieben von Anfang 1957 heißt es wörtlich⁴⁾: „Der letzte Halbjahresbericht der US-Atomenergiekommission weist darauf hin, daß der hohe Stand der Arbeitshygiene und des Unfallschutzes in amerikanischen Reaktorstationen und Atomkraftwerken, in der Geschichte der Industrie keine Parallele hat“. Strahlenschädigungen kommen bei den in Kernenergiebetrieben beschäftigten Personen äußerst selten vor, und die Strahlenbelastung des einzelnen sei gewöhnlich nicht größer als durch natürliche Einwirkungen. Im Verlauf der 13 Jahre, seit denen in den USA Kernenergieanlagen gebaut und Versuchsanlagen betrieben werden, seien insgesamt 69 Personen auf Grund von Unfällen einer mehr oder weniger großen Überdosis an Strahlung ausgesetzt worden; in zwei Fällen, und zwar im Jahre 1945 und 1946, habe dies den Tod der Betroffenen zur Folge gehabt. Zur Zeit sind 99,4 Prozent der etwa 200 000 Menschen, die heute bei der AEC selbst oder bei deren Kontraktfirmen arbeiten, nicht einmal einem Drittel der Strahlungsmenge ausgesetzt, die nach strengsten Sicherheitsbestimmungen noch als zulässig gilt. In den 14 Jahren seit Inbetriebnahme des ersten Kernreaktors in den Vereinigten Staaten ist die Öffentlichkeit niemals durch Anlagen dieser Art irgendwie in Mitleidenschaft gezogen worden. Betriebsunfälle mit Kernreaktoren, bei denen eventuell Strahlung frei würde, sind äußerst unwahrscheinlich geworden, da dank der Ergebnisse von Forschung und Entwicklung in den letzten Jahren zahlreiche automatische Sicherungen konstruiert werden konnten, die alle darauf abzielen, Kernreaktoren gewissermaßen ‚narrensicher‘ zu machen.“

Die kleineren Betriebsunfälle an Reaktoren und Aufbereitungsanlagen, die teilweise weite Bevölkerungskreise in Unruhe versetzt haben, seien nachstehend kurz zusammengestellt:

¹⁾ W. Herbst: Z. f. Aerosolforschung 4, 73 (1955).

²⁾ W. G. Marley und T. M. Frey: A/Conf 8/P 394. Hinweis auf „Experiments on the release of fission products from molten reactor fuels“, A/Conf 15/P 1074; B. P. Leonard, Jr.: „Hazards associated with fission product release“, A/Conf 15/P 428.

³⁾ Siehe Anhang.

⁴⁾ Atomkernenergie 2, 159 (1957), Nr. 4.

1. Im August 1945 und im Mai 1946, noch zu Zeiten des Manhattan-Projekt, ereigneten sich in Los Alamos (USA) zwei Unfälle, bei denen jeweils ein Beschäftigter umkam¹⁾.

2. Am 2. Juni 1952 ereignete sich ein Unfall an einem Versuchsreaktor in Chicago (USA), der bei einer Prüfung der Regelungseinrichtung unbeabsichtigt kritisch wurde. Dabei wurden 4 Beschäftigte einer radioaktiven Bestrahlung ausgesetzt; die höchste Dosis, die einer dieser Leute aufnahm, betrug 176 rad¹⁾.

3. Im Jahre 1952 versagten beim NRX-Reaktor in Chalk River²⁾ die Kühlwasserpumpen, während gleichzeitig die Verriegelung unwirksam war. Dadurch stieg die Reaktorleistung bei gedrosselter Kühlung schnell an, und es wurden ein oder mehrere der insgesamt 176 Uranstäbe teilweise verdampft und viele tausend Curie radioaktiven Gases durch die Entlüftungsschornsteine hinausgetragen. Glücklicherweise verbreiteten sie sich infolge günstiger atmosphärischer Bedingungen (Windstille) nicht in einer schädlichen Art und Weise. Der Reaktor ist erst im Februar 1954, also nach insgesamt 14 Monaten Stillstand, wieder in Betrieb gekommen. Die Instandsetzung war infolge der starken Radioaktivität besonders schwierig; ein halbes Jahr nach dem Unfall wurden im Reaktorgebäude noch 300 r/h gemessen. Der Ausbau des 2,5 t schweren Reaktorbehälters war nur unter kurzzeitigem Auswechsellern der Arbeiter — wie oben beschrieben — möglich. Das Reparaturpersonal trug Schutzkleidung und war mit Atemschutzgeräten ausgerüstet³⁾. Personenschäden mit tödlichem Ausgang sind bei diesem Unfall nicht entstanden.

4. Zum zweiten Male ereignete sich am gleichen Reaktor im Jahre 1955 ein Unglück, bei dem ein Füllelement explodierte und durch das Reaktorgefäß wie ein Geschoß hindurch drang. Der entstandene Schaden war Anfang 1956 bereits wieder behoben. Nun muß vermerkt werden, daß der NRX eine besonders anfällige Anlage ist, bei dem die Kettenreaktion bei einem Ausfall der Kühlung nicht ohne weiteres von selbst abreißt⁴⁾.

5. Ein ähnlicher Unfall wie am NRX ereignete sich auch an einem russischen Reaktor, bei dem ein Uran-Füllelement in einem Kühlkanal zu Schaden kam. Eine radioaktive Verseuchung entstand jedoch nicht; es war möglich, das Element aus dem Reaktor herauszunehmen und den Reaktor wieder anzufahren⁵⁾.

6. Bei Versuchen wurde in der NRTS Arco Idaho (USA) am 29. November 1955 ein Reaktor schwer beschädigt. Die Gebäude und seine Umgebung mußten wegen ihrer radioaktiven Verseuchung geräumt werden⁶⁾.

7. Ein weiterer Unfall kleinen Ausmaßes ereignete sich am 12. 2. 1957 in Los Alamos⁷⁾. Die kritische Anordnung GODIVA-I, eine dreigeteilte Kugel aus metallischem U²³⁵ von etwa 170 mm Durchmesser, wurde nach mehr als 3600 Versuchen durch eine zu starke Reaktivitäts- und Leistungssteigerung, für die die Anordnung eigentlich nicht vorgesehen war, auseinandergerissen. Auch in diesem Fall traten keine Personenschäden auf.

8. In der breiten Öffentlichkeit wurde ein Unfall diskutiert, der sich am 10. 10. 1957 am Reaktor Nr. 1 in Windscale ereignete⁸⁾, einem der beiden großen Plutoniumerzeuger Großbritannien. Beim Anlassen des Moderatorgraphits zwecks Freisetzung der Wigner-Energie⁹⁾, zu dem die Kühlung abgeschaltet werden muß, entstand eine unzulässige Erwärmung, die auch auf einen Teil der Füllelemente übergriff. Durch Aufbrüche der Hüllen erhielten einerseits größere Luftmengen einen freien Zutritt zum Uran, das sich infolge der Oxydation weiter aufheizte. Andererseits wurde den Spaltprodukten der Weg ins Freie geöffnet. Als Hauptursache des Unfalls wird eine unzureichende Temperatur-Meßeinrichtung innerhalb des Moderators, eine zu geringe Anzahl an Meßstellen, angegeben¹⁰⁾. Auf Grund sofort einsetzender Untersuchungen wurde festgestellt, daß lediglich das freigegebene J¹³¹ auf dem Wege über die Milch Gefahren verursachen konnte, während die Ablagerung anderer Produkte, wie Strontium und Cäsium die Gefahren-

¹⁾ NU 16, 22 (1958), Nr. 7.

²⁾ Siehe NU 11, 70 (1953), Nr. 3.

³⁾ Siehe NU 11, 25 (1953), Nr. 10.

⁴⁾ Siehe Abschnitt Regelungstechnik.

⁵⁾ A. K. Krasin auf der Intern. Atomenergie-Konferenz, Genf 1958.

⁶⁾ Atomkernenergie 1, 160 (1956).

⁷⁾ Siehe Atomic 8, 233 (1957), Nr. 6.

⁸⁾ Hinweis auf NU 15, 130 und 43 (1957), Nr. 11 und 12; Nucl. Engng. 2, 510 (1957); Atomwirtschaft 3, 183 (1958), Nr. 5; Command Paper (HMSO) 302 und 479; Atomwirtschaft 3, 383 (1958), Nr. 10.

⁹⁾ Siehe § 60.

¹⁰⁾ Bei den Leistungsreaktoren vom Typ Calder Hall können derartige Unfälle kaum auftreten, da die selbsterhitzende Oxydationsreaktion des Urans mit CO₂ erst ab 600 bis 700° C einsetzen kann — gegenüber

grenze nicht überschritt. Aus diesem Grunde wurde die Milchabgabe aus einem zunächst kleineren Gebiet, das man dann aber später auf rund 52000 ha erweiterte, kurzzeitig gesperrt¹⁾.

9. In der Y-12-Anlage in Oak Ridge (USA) bildete sich am 16. Juni 1958 bei einem nicht näher bezeichneten Prozeßgang mit U^{235} eine kritische Masse, als angereicherte U^{235} -Lösung aus einem schlanken, zylinderförmigen Gefäß in eine Trommel entleert wurde. Dabei erhielten 8 Beschäftigte Strahlungsdosen zwischen 20 und 320 rad²⁾.

10. An der kritischen Anordnung des Boris Kidrik Instituts in Vinca, Jugoslawien, ereignete sich am 15. Oktober 1958 ein Unfall³⁾, bei dem ein Physikstudent eine tödlich wirkende Bestrahlung erfuhr. Die Versuchsanlage wurde infolge Anstieg des D_2O -Spiegels überkritisch.

11. Am 18. November 1958 ging auf der NRTS Arco Idaho (USA) ein kleiner, im Rahmen des ANP-Programmes von der General Electric betriebener Versuchsreaktor durch. Als Ursache wird ein Versagen der Regelungsanlage angegeben. Die freigesetzte kurzlebige Aktivität führte zu keinerlei Schädigungen von Beschäftigten oder der Öffentlichkeit⁴⁾.

12. Am 30. Dezember 1958 ereignete sich in einer Plutoniumaufbereitungsanlage in Los Alamos (USA) ein Unfall⁵⁾, der rein auf menschliches Versagen zurückzuführen ist, und bei dem ein Techniker getötet wurde. Durch unzeitgemäßes Ingangsetzen einer Rührvorrichtung wurde das als organische Verbindung auf der Oberfläche eines gefüllten Behälters schwimmende Plutonium zusammengedrückt; dadurch bildete sich eine kritische Masse.

Für die Gesamtbevölkerung haben derartige Betriebsstörungen und Unfälle⁶⁾ voraussichtlich keinen unmittelbar gefährdenden oder alarmierenden Charakter, wenn man von den gegebenenfalls aufsehenerregenden Schutzmaßnahmen — wie sie z. B. das Wegschütten größerer Milchmengen darstellt — absieht. Detonationen mit Druckwirkung auf größere Geländeabschnitte sind wohl kaum zu erwarten. Die Gefahr, daß Aktivitäten in größerem Umfang in die Umgebung verstreut werden, besteht bei Kernkraftwerken mit geschlossenem Kühlkreislauf in viel geringerem Maße als bei Anlagen, die im offenen Kreislauf gekühlt werden wie z. B. die Wind-scale-Reaktoren. Zusätzlich umgibt man heute alle aktiven Kreisläufe mit einer gas- und gegebenenfalls druckdichten Schutzhülle, die ein Entweichen von Aktivitäten im Gefahrenfall unmöglich macht. Nähere Ausführungen darüber folgen in Abschnitt K.

Um folgenschwere Unfälle zu vermeiden, sind nachstehende Gesichtspunkte zu beachten:

1. Aufstellung möglichst nur von solchen Reaktortypen, bei denen ein „Durchgehen“ aus physikalischen Gründen nicht möglich ist⁷⁾.
2. Zwei voneinander unabhängige, automatische Sicherungssysteme⁸⁾ mit zweifacher Betätigungsmöglichkeit, z. B. elektrisch und mechanisch⁷⁾. Automatische Registrierung der Aktivität in allen Anlageteilen.
3. Verwendung von Schutzbauten um die gesamte Reaktoranlage einschl. Hilfsmaschinen⁹⁾, wie z. B. bei STR I in West Milton (USA). Unterdruck im gesamten gas- und gegebenenfalls druckdichten Gebäude.
4. Leichte Demontierbarkeit aller „heißen“ Teile.

350° C bei Luft. Außerdem liegen bei den Calder Hall-Reaktoren die Moderatortemperaturen so hoch, daß der Anlaßprozeß ständig abläuft; eine Beseitigung der Wigner-Energie ist daher bei diesen Anlagen nur etwa alle 5 Jahre erforderlich. Fernerhin werden die Calder Hall-Anlagen im geschlossenen Kreislauf gefahren, und die Fülllemente sind wesentlich geringeren Korrosionsbeanspruchungen ausgesetzt. Näheres siehe Atomwirtschaft 2, 357 (1957), Nr. 11.

¹⁾ Nucl. Engng. 2, 453 (1957), Nr. 20; Atomwirtschaft 2, 357 (1957), Nr. 11.

²⁾ NU 16, 22 (1958), Nr. 7, 16, 138 (1958), Nr. 11.

³⁾ NU 17, 106 (1959), Nr. 4.

⁴⁾ Atomwirtschaft 4, 80 (1959), Nr. 2.

⁵⁾ NU 17, 107 (1959), Nr. 4.

⁶⁾ Hinweis auf W. J. McCarthy u. a.: "Studies of nuclear accidents in fast power reactors", A/Conf 15/P 2165.

⁷⁾ Siehe Abschnitt Regelungstechnik.

⁸⁾ Gegebenenfalls Kopplung mit Seismographen.

⁹⁾ Hinweis auf E. Teller: NU 11, 80 (1953), Nr. 11; G. Wiesenack: BWK 5, 324 (1953) sowie Abschnitt K.

5. Aufteilung der Reaktorkreisläufe in voneinander unabhängige Systeme.
6. Hinreichende „Schornsteinhöhe“. Verunreinigungen sollen vor dem Verstreuen ausgefiltert werden¹⁾.
7. Leichte Entseuchbarkeit von Böden, Wänden und Decken.
8. Unterhalb von Reaktoren usw., in denen Flüssigkeiten verwendet werden, sollte stets ein wasserdichter und leicht entseuchbarer Auffangbehälter angebracht sein. Beton ist hierfür unzweckmäßig.
9. Einrichtung eines Bassins für die dauernde und für die Notlagerung stark aktiver Substanzen (z. B. Füllelement).
10. Geräte und Instrumente sollen nicht auf dem Boden stehen (wichtig für Forschungsreaktoren).

Beim Durchgehen eines Reaktors gelten die gleichen Gesichtspunkte wie beim normalen Betrieb, da die Gefährdung der Menschen der näheren und weiteren Umgebung nicht durch mechanische Faktoren (Detonation) bedingt ist, sondern durch die radioaktive Verseuchung der Umgebung. Wegen dieser Verseuchung muß im Katastrophenfall ggf. eine (selbstverständlich vorbereitete) Räumung verschiedener Schutzzonen angeordnet werden. Darüber hinaus kann gesagt werden, daß beim Bau von Kernenergieanlagen auf folgenden Hauptgebieten Schutzplanungen durchzuführen sind:

1. Vor Standortwahl²⁾, Planung und Konstruktion: Gründliche Untersuchungen der örtlichen Umgebungsstrahlung³⁾, meteorologischer und geologischer Bedingungen sowie Erforschung der biologischen Lebensräume. Hierzu gehören auch Untersuchungen über die Schüttung und die jahreszeitlichen Schwankungen des Grundwasserstromes³⁾ sowie über die Erdbebengefährdung. Außerdem ist den Belangen der ortsansässigen Industrieunternehmen (Photoindustrie)⁴⁾ Rechnung zu tragen. Die Aufgabenstellung des Standortingenieurs ist also gegenüber der beim normalen Dampfkraftwerk erheblich erweitert.
2. Festsetzung der Sicherheitszonen.
3. Laufende Schutzarbeiten im Rahmen des Reaktorbetriebes, Entwicklung von Geräten und Instrumenten⁵⁾. Zweckmäßig erscheint eine Aufgabenteilung in ein Labor für Messungen und Entwicklung sowie eine Instrumenteneichstelle.
4. Ausbau eines umfassenden Überwachungs- und Warnsystems, das auch die weitere Umgebung erfaßt.
5. Ständige Einbeziehung der Forschung, auch der Radiobiologie und Strahlenschutzmedizin sowie der Aerosolforschung, zur Klärung der zahlreichen noch ungelösten Probleme und zur rechtzeitigen Erkennung noch unbekannter Möglichkeiten und potentieller Gefahren.

In organisatorischer⁶⁾ Hinsicht werden folgende Maßnahmen für erforderlich gehalten:

1. Einsatz eines hauptamtlichen Sicherheitsbetriebsleiters (Strahlenschutzphysiker), der nicht mit Nebenaufgaben belastet sein darf. Keine Verantwortungsteilung!
2. Ständige Anwesenheit eines Sicherheitsschichtingenieurs neben dem Betriebsschichtingenieur. Bereitschaftsdienst eines Physikers, der bei auftretenden Schwierigkeiten als Berater fungiert.
3. Einrichtung einer strahlenschutzärztlichen Dienststelle in jedem mittleren und größeren Betrieb, der eine laufende Überwachung des gesamten Betriebspersonals durchführt.

¹⁾ Hinweis auf R. V. Kleinschmidt: "Principles of gas cleaning", ASME-Bericht 57-A-270; M. A. Wahlgen und W. W. Meinke: "Molecular sieves absorb iodine-131 from air", NU 15, 156 (1957), Nr. 9.

²⁾ Siehe § 144.

³⁾ Lage abseits von Wasserscheiden. Hinweis auf H. Moser u. a.: „Die Anwendung radioaktiver Isotope in der Hydrologie“, Atomkernenergie 2, 26 (1957), Nr. 1 und 2, 225 (1957), Nr. 6; P. F. Carlton: "The application of radioisotopes to the measurement of soil moisture content and density", 57-NESC-17.

⁴⁾ Hinweis auf: „Gefahren für die Photowirtschaft durch radioaktiven Atomzerfall“, Veröffentlichung der Chemischen Gesellschaft für Photographie (1956), Nr. 3.

⁵⁾ Hinweis auf G. H. Whipple: "Health physics instrumentation for a power reactor", 57-NESC-34.

⁶⁾ Hinweis auf L. R. Love und G. N. Oldham: NU 14, 29 (1956), Nr. 7 sowie A/Conf 15/P 2487.

4. Aufstellung einer „kritischen Kommission“ in jedem Betrieb, der mit größeren Mengen spaltbaren Materials (z. B. Aufbereitungsanlagen) arbeitet¹⁾. Die „kritische Kommission“ hat darüber zu wachen, daß sich nirgendwo eine kritische Masse ansammelt oder bilden kann (z. B. in Füllstabsammelgräben²⁾, Chemielabors, Reaktions- oder Vorratsbehältern).
5. Einteilung des Personals in Gefährdungsgruppen³⁾. Persönliche Meßgeräte. Bereitstellung von Schutzanzügen und Atemschutzgeräten.
6. Klare Aufgabenteilung innerhalb der Strahlenschutzgruppe. Keine Verantwortungsteilung!
7. Klare Absprache — einschl. Aufgabenteilung — bei jedem größeren Experiment und bei jeder Reparatur. Diskussion auch der Einzelheiten, ggf. Vorübungen.

In den USA sind die Strahlungsschutzgruppen der einzelnen großen Laboratorien (Brookhaven, Argonne, Oak Ridge, Berkeley, Los Alamos usw.) direkt der Strahlenschutzabteilung⁴⁾ der AEC, also nicht den Laboratorien, unterstellt. Dadurch ist die Gewähr gegeben, daß die Belange des Strahlenschutzes, und zwar der Schutz des Arbeitenden wie der Schutz der gesamten Bevölkerung, in jedem Falle gewahrt bleiben und nicht von organisatorischen, technischen oder gar finanziellen Gesichtspunkten beeinflußt werden.

In den Kernenergieanlagen der USA werden rund 400 DM pro Beschäftigter und Jahr für Sicherheitsmaßnahmen ausgegeben; in England sogar 825 DM. Demgegenüber rechnet man in fast allen Industriebetrieben mit 33 bis 66 DM pro Person und Jahr. Man kann veranschlagen, daß normalerweise 3 bis 5 Prozent aller Betriebsangehörigen einer Reaktorstation oder einer Aufbereitungsfabrik ausschließlich für Sicherheitsmaßnahmen eingesetzt werden müssen. Selbstverständlich ist für die Bearbeitung der gesamten Sicherheitsfragen einschließlich der Prüfung der technischen Planungen eine zentrale Leitung erforderlich. Ähnlich wie die großräumige Überwachung der Atmosphäre und des Erdbodens durch den Wetterdienst geleitet und durchgeführt wird, wäre auch für die Behandlung der Sicherheitsfragen ein Zurückgreifen und Abstützen auf eine vorhandene Organisation möglich, den Technischen Überwachungs-Verein (TÜV), dem auch die Kontrolle der Abfallbeseitigung obliegen sollte.

§ 103. Beseitigung radioaktiver Abfälle⁵⁾

Die endgültige Beseitigung von hochradioaktiven (Spaltprodukt-)Abfällen langer Halbwertzeit stellt ein ernstliches biologisches, soziologisches und wirtschaftliches Problem dar^{5a)}. Die Schwierigkeiten bestehen darin, daß bei der Menge der anfallenden Aktivitäten — man schätzt, daß in den USA im Jahre 1970 die Produktion von Spaltprodukten mindestens 1 Tonne betragen wird — kaum eine Möglichkeit besteht, diese in ungefährlicher Form, also ohne daß irgendwo eine Verseuchung entsteht, unterzubringen. Pro Megawatt-Tag wird, wie in Teil I ausgeführt, rund 1 Gramm Spaltprodukte erzeugt. Da die meisten von ihnen hohe Neutronen-Absorptionsquerschnitte aufweisen, wird die spaltbare Füllung mit der Zeit ver-

¹⁾ Hinweis auf G. A. Graves und H. C. Paxton: "Critical masses of or alloy assemblies", NU 15, 90 (1957), Nr. 6; A. G. Gillieson: "The prevention of unwanted criticality", Nucl. Engng. 1, 186 (1956), Nr. 5.

²⁾ Normalerweise 3 bis 6 m tief mit Wasser angefüllt.

³⁾ Hinweis auf "Safe handling of radioactive isotopes", Handbuch 42 des National Bureau of Standards, Washington D.C. (1949).

⁴⁾ Health Physics Division.

⁵⁾ Siehe: "Radioactive waste disposal, a bibliography of unclassified literature", TID-375 (1950); C. R. Anderson und Ch. A. Rohrman: "The design and operation of high level waste storage facilities", A/Conf 8/P 552; S. Glasstone: "Nuclear reactor engineering", New York (1955), S.570; E. Glueckauf: "Utilization of reactor waste products", Research 8, 314 (1955); "Long-term aspects of fission product disposal", A/Conf 8/P 398 sowie Atomics 6, 270 (1955); H. J. Dunster u. a.: V. Welt-Kraft-Konferenz, Wien (1956), Bericht 100 J/3; G. Wiesenack: BWK 6, 324 (1954); A. Wolman und A. E. Gorman: "The management and disposal of radioactive wastes", A/Conf 8/P 310, Mech. Engng. 77, 321 (1955), Nr. 4; B. Monowitz und D. N. Richman: "Econo-

giftet, so daß die Kettenreaktion abreißt. Aus diesem Grunde ist eine periodische oder kontinuierliche Entnahme und chemische Aufbereitung der Füllung erforderlich. Diejenigen radioaktiven Abfälle, die man — mit oder ohne Vorbehandlung — auf Grund ihrer nur geringen spezifischen Aktivität direkt — ggf. an einer anderen Stelle — in die Umgebung (Luft, Abwasserleitungen, Grundwasser, See) ablassen kann, werden als zerstreubare¹⁾ Abfälle bezeichnet. Alle anderen Abfälle, insbesondere solche mit hoher spezifischer Aktivität, heißen unzerstreubare²⁾ Aktivitäten. Radioaktive Abfälle können in gasförmiger, flüssiger oder fester Phase anfallen³⁾. Je nach der Art der Stoffe, und je nach ihrer spezifischen Aktivität (bis zu 100 C/Liter), ist die Behandlung und die Beseitigung verschieden.

Die gasförmigen Abfallprodukte, die man meist direkt durch hohe Schornsteine in die Luft abläßt, die man aber auch, z. B. in unterirdischen Hohlräumen, speichern⁴⁾ kann, lassen sich in drei Gruppen unterteilen⁵⁾:

- I. Betriebsabfälle aus Reaktoren, Aufbereitungsanlagen usw.,
- II. Abfälle bei Betriebsunregelmäßigkeiten, -störungen und -zwischenfällen,
- III. Abfälle beim Transport oder bei der Beseitigung von vergifteten Reaktorfüllungen.

mic future of fission products for radiation power", NU 14, 98 (1956), Nr. 6; E. W. Titterton: "Nuclear power stations and waste disposal", *Atomics* 7, 394 (1956), Nr. 11; C. B. Amphlett: "Treatment of highly active wastes", *Atomics* 8, 116 (1957), Nr. 4; H. T. Evans: "Structural features of the waste disposal system of the Shippingport atomic power station, Shippingport, Pennsylvania", 57-NESC-18; P. V. Danekwerts: "Fission product disposal from Windscale", *Nucl. Engng.* 1, 25 (1956), Nr. 1; R. E. Burns und M. J. Stedwell: "Comments on waste disposal at Hanford", 57-NESC-58; F. R. Farmer: "Liquid and gaseous effluent disposal", *Atomics* 8, 25 (1957), Nr. 1, *Atomics* 8, 46 (1957) Nr. 2; C. B. Amphlett: "Fixation of radioactive effluent", *Nucl. Engng.* 1, 119 (1956), Nr. 3; A. Abriss u. a.: "Separation of cesium and strontium from calcined metal oxides as a process in disposal of high level wastes", 57-NESC-53; H. R. Zeitlin u. a.: "Economics of waste disposal", NU 15, 58 (1957), Nr. 1, NU 15, 155 (1957), Nr. 11; C. Bernau: "The industrial problems raised by the processing of radioactive liquids; some of the specific solutions applied at Marcoule", A/Conf 15/P 1178; C. A. Rohrmann, O. H. Pilkey und A. M. Platt: "The storage of high level radioactive wastes—design and operating experience in the United States", A/Conf 15/P 389; E. G. Struxness und J. O. Blomeke: "Multipurpose processing and ultimate disposal of radioactive wastes", A/Conf 15/P 1073; J. A. Liebermann: "The role of waste management in the development of the nuclear energy industry", A/Conf 15/P 2004; „Probleme du rejet des residus radioactifs liquides au C. E. A. traitements aboutissant a des rejets en riviere“, A/Conf 15/P 1175; "The treatment of large-volume, low-level waste by the lime-soda softening process", A/Conf 15/P 2354; M. Milione u. a.: "The elimination of traces of radioactive elements from aqueous solutions", A/Conf 15/P 1515; R. H. Burns und E. Glueckauf: "Development of a self-contained scheme for low activity waste", A/Conf 15/P 308; G. A. Sereda u. a.: "Decontamination of diluted salt solutions and low activity wastes of radiochemical plants", A/Conf 15/P 2024; "Waste characteristics for the resin-in-pulp uranium extraction process", A/Conf 15/P 2359; „Procédé de retention et de recuperation de l'uranium dans les effluents liquides“, A/Conf 15/P 1177; „Recovery of uranium from rejected liquids by ionic exchange“, A/Conf 15/P 1566; T. Jaeger: „Beseitigung radioaktiver Abfallstoffe“, *Atomkernenergie* 3, 190 und 273 (1958); D. A. Manieri und W. H. Truran: "Radioactive waste disposal at Knolls Atomic Power Laboratory", TID-8017 (1958). Dokumentation in TID-3311 (1958).

^{5a)} L. P. Hatch: *Am. Scientist* 41, 410 (1953); E. I. Goodman: "Nuclear waste economics — state of the art", 57-NESC-118.

¹⁾ Englisch: Safe.

²⁾ Englisch: Unsafe.

³⁾ R. J. Morton: "Environmental problems of radioactive waste materials". *The Role of Engineering in Nuclear Energy Development*, TID-5031 (1951); C. C. Ruchoff: "Decontamination and the disposal of radioactive waste radioisotopes in industry", New York (1953), S. 249; W. K. Eister: "The treatment of radioactive wastes", "The Role of Engineering in Nuclear Energy Development", TID-5031 (1951), S. 400.

⁴⁾ Siehe z. B. R. L. Murray: "Storage of radioactive gases from reactor operation", NU 10, 52 (1952), Nr. 12.

⁵⁾ J. Benischek: "Purification of waste gas in the production of energy", V. Weit-Kraft-Konferenz, Wien (1956), Generalbericht Gruppe IV, Abteilung M; "The separation of xenon and deuterium by thermal diffusion", A/Conf 15/P 1124; R. W. Mellroy u. a.: "The recovery of radio krypton from dissolver waste gases by fractional extraction in solvents", A/Conf 15/P 309; A. G. Blasewitz und W. C. Schmidt: "Treatment of radioactive waste gases", A/Conf 15/P 397.

Auf II. und III., die abnormale Entstehungsgruppen umfassen, soll nicht näher eingegangen werden. Zu I. sind folgende Quellen aufzuführen:

- a) Reaktoren mit Luftkühlung im offenen Kreislauf stoßen kontinuierlich größere Aktivitäten (z. B. 10^5 bis 10^6 C/Tag bei 300 MW Wärmeleistung) aus, die vorwiegend durch eine Aktivierung des Kühlmediums entstehen. Der Spaltproduktanteil ist wegen der Füll-elementhüllen meist nur sehr gering, kann jedoch bei einem Füll-elementschaden (Gruppe II) erheblich werden und den Anteil der induzierten Aktivität weit übertreffen. Geringere Mengen gasförmiger Abfälle entstehen auch bei fast allen anderen Anlagen. Es sei z. B. an die Homogenreaktoren erinnert, bei denen die gasförmigen Spaltprodukte mit den dissoziierten H_2 - und O_2 -Mengen abgezogen werden. Bei einer CO_2 -gekühlten Anlage, z. B. von 300 MW Wärmeleistung, muß man mit 0,1 bis 10 C/Tag rechnen.
- b) Chemische Aufbereitungsanlagen erzeugen bei den verschiedensten Arbeitsprozessen gas- oder aerosolförmige Abfälle. Beim kontinuierlichen Betrieb eines 300 MW-Reaktors werden größenordnungsmäßig 100 bis 1000 C/Tag aus der zugehörigen chemischen Aufbereitung abgegeben.
- c) Grundstoffindustrien zur Gewinnung von Erzen und von Reinprodukten geben β -strahlende Emanationen¹⁾ ab, deren Anteil in allen anderen Anlagen gegenüber dem Aufgeführten praktisch vernachlässigt werden kann.
- d) Verschiedene Quellen werden durch die Belüftungssysteme der einzelnen Anlagen und der verschiedensten Laboratorien sowie der Entseuchungszentren gebildet.

Die gasförmigen Abfallprodukte lassen sich in vier Gruppen unterteilen:

1. Chemisch inerte Edelgase, wie z. B. Radioargon mit einer Halbwertszeit von 2 Stunden, können direkt durch hohe Schornsteine in die Atmosphäre abgeleitet werden. Xenon und Krypton lassen sich durch Aktivkohle oder auch durch Siliciumverbindungen von der Luft trennen. Sie entstehen jedoch meist gleichfalls in so geringer Konzentration, daß ihrer Einleitung in höhere Atmosphärenschichten bei genügend feiner Verteilung nichts im Wege steht²⁾. Das Gleiche gilt für Stickstoff und Sauerstoff, die nur kurze Halbwertszeiten besitzen. Die bei der Aufbereitung bestrahlter Füll-elemente freiwerdenden langlebigen gasförmigen Spaltprodukte sind nur relativ schwach aktiv. Bei ihrem Abblasen³⁾ jedoch ist in jedem Falle auf die vorherrschende Wetterlage Rücksicht zu nehmen.
2. Die β -strahlenden Emanationen Radon und Thoron⁴⁾, die vornehmlich bei der Rohstoffgewinnung anfallen, werden, da ihre Halbwertszeiten nur relativ kurz sind, bei größerem Anfall zweckmäßigerweise gespeichert und erst nach einer entsprechend langen Zeit abgelassen. Die Zerfallsprodukte können erforderlichenfalls chemisch aus den Speicherräumen eliminiert werden.
3. Chemisch aktive Gase, wie J^{131} oder Stickoxyde, werden durch alkalische Gaswäscher aus der Luft entfernt. Die anfallende Waschlauge wird als flüssiger Abfallstoff weiter behandelt. Gegebenenfalls auch Verfahren⁵⁾ wie bei 4.
4. Feste staubförmige Partikelchen und Aerosole lassen sich durch Trockenfiltration entfernen. Unter Umständen ist eine Vorreinigung durch Zyklone o. ä., elektrostatische Filter und Gaswäscher angebracht. Da für feinkörnige Teilchen Elektrofilter und Gaswäscher

¹⁾ Hinweis auf A/Conf 8/P 85 und 370 sowie A. A. Smales und L. Airey: "Removal of alpha activity from effluent", AERE C/R-289 (1948); A. A. Smales u. a.: "The monitoring of effluent for alpha emitters", AERE C/R-2223 (1950).

²⁾ Hinweis auf F. R. Farmer: "Liquid and gaseous effluent disposal", *Atomies* 8, 25 und 46 (1957), Nr. 1 und 2; S. K. Friedlander u. a.: "Handbook of air cleaning", Washington (1952). Siehe auch N. R. Beers: "Stackmeteorology and atmospheric disposal of radioactive waste", *NU* 7, 28 (1949), Nr. 4; L. Silverman: "Air and gas cleaning for nuclear energy processes", A/Conf 8/P 571 sowie § 100. Eine besonders feine Verteilung ist mit dem Gitterschornstein nach H. Wislicenus möglich.

³⁾ Man betrachtet z. Z. 10^{-9} $\mu C/cm^3$ an β - oder γ -Aktivität und 10^{-7} $\mu C/cm^3$ an α -Aktivität in und über der äußeren, ständig kontrollierten Schutzzone als zulässig. Hinweis auf A/Conf 8/P 552, S. 6.

⁴⁾ Hinweis auf A/Conf 8/P 85 und 370 sowie A. A. Smales und L. Airey: "Removal of alpha activity from effluent", AERE C/R-289 (1948); A. A. Smales u. a.: "The monitoring of effluent for alpha emitters", AERE C/R-2223 (1950).

⁵⁾ Siehe auch Literaturangaben in § 102.

nicht ausreichen, wurden in den USA HochwiderstandsfILTER aus Asbest-, Glas-, Papier- und Kunststoffasern entwickelt¹⁾.

Die flüssigen Abfallprodukte²⁾ entstammen gleichfalls verschiedenen Quellen:

- a) Reaktoren mit Wasserkühlung im offenen Kreislauf geben ständig Aktivität an das Kühlmittel ab
 - α) durch Aktivierung des Kühlwassers und der darin gelösten Salze,
 - β) infolge Korrosion der Füllelementhüllen,
 - γ) infolge Diffusion von Spaltprodukten durch die Hüllen hindurch.
 Aber auch andere Reaktortypen stellen kontinuierliche Aktivitätsquellen dar, deren Intensität je nach Reaktortyp und Betrieb verschieden ist. Verbrauchte und zum „Abkühlen“ in Wasser gelagerte Füllelemente setzen z. B. auf Grund des Diffusionsmechanismus ständig gewisse Aktivitäten frei. Von beschädigten Füllelementen soll ganz abgesehen werden.
- b) Auswaschung von gasförmigen Abfällen.
- c) In chemischen Aufbereitungsanlagen beträgt der Anfall — wieder bezogen auf den kontinuierlichen Betrieb einer 300-MW-Reaktor-Anlage — täglich 10^4 bis 10^5 Curie; die spezifische Aktivität dieser Abfälle ist sehr hoch. Die Nachbehandlung ergibt nochmals etwa 50 bis 500 Curie pro Tag mit mittlerer bis geringer spezifischer Aktivität.
- d) Verschiedene Quellen bilden die einzelnen Laboratorien und die Entseuchungszentren³⁾. Zum Vergleich sei angeführt, daß — beim gleichen Bezug — 0,1 bis 10 Curie täglich in den Laboratorien und 0,1 bis 1 Curie aus den Entseuchungszentren anfallen; die spezifische Aktivität ist mittelstark bis schwach.

Bei den flüssigen Abfallprodukten ist man bestrebt, einen möglichst großen Anteil in die zerstreubare Form zu überführen. Hierzu werden je nach Art und Konzentration, folgende Wege eingeschlagen:

- α) Aufspeicherung bei vorwiegend kurzlebigen Abfällen in Verweilbehältern, so daß ein Großteil der Aktivität abklingen kann.
- β) Verdünnung, z. B. bei Laborabfällen.
- γ) Konzentration größerer Mengen durch Verdampfer, Filter, Ionenaustauscher oder mit sonstigen chemischen und biologischen Mitteln. Kondensate, Filtrate usw. sind zerstreubar. Der hochkonzentrierte Rückstand muß weiter behandelt werden.

Für die flüssigen Abfälle ist — unter diesen Gesichtspunkten — folgende Einteilung möglich:

1. Kurzlebige Isotope wie J^{131} , P^{32} usw. können in kleinen Mengen direkt in die Abwässer oder in Flüsse und Seen eingeleitet werden, sind also meist direkt zerstreubar oder können verdünnt werden. Die maximal zulässige spezifische Aktivität für die Zerstreung wird mit 10^{-4} C/Liter angegeben.
2. Bei größeren Mengen und mittleren Halbwertszeiten bevorzugt man im allgemeinen eine Anreicherung durch Verdampfen (Kosten: 10 bis 150 \$/m³) mit nachfolgender chemischer Ausflockung. Durch die Verdampfung werden Wasser und flüchtige Säuren von der aktiven Lösung getrennt. Das Kondensat und andere Flüssigkeiten, die nur geringe Salz-

¹⁾ Siehe auch *Atomies* 6, 232 (1955).

²⁾ In *GWF* 98, 133 (1957) sind 128 Literaturstellen aus amerikanischen Veröffentlichungen des Jahres 1955 angegeben; Hinweis auf G. P. Straub und R. J. Merton: "Studies on removal of radioactive contaminants from water", *J. Am. Water Works Ass.* 43, 773 (1951); C. P. Straub: "Removal of radioactive wastes from water", *NU* 10, 40 (1952), Nr. 1; Foser u. a.: "The accumulation of radioactive substances in aquatic forms", *A/Conf 8/P 280*; E. H. Graul und E. K. Reinhardt: „Experimentelle Untersuchungen zur Dekontamination von Wasser“, *Atompraxis* 5, 5 (1959), Nr. 1; W. H. Snavely und P. J. Manno: "Handling contamination in spent-fuel shield water", *NU* 17, 121 (1959), Nr. 3.

³⁾ Hinweis auf K. A. Bolshakov u. a.: "Methods for removal of radioactive substances from wastes of research institutions", *A/Conf 15/P 2025*; P. Dejouge: "Treatment of radioactive effluents at the Mol laboratories", *A/Conf 15/P 1676*.

konzentrationen enthalten, können gegebenenfalls durch Ionenaustauscher nachgereinigt werden. Als Flockungsmittel werden Eisen- oder Aluminiumsalze, wie für die Wasserreinigung üblich, jedoch in wesentlich höherer Konzentration, verwendet¹⁾.

3. Für Lösungen, die Plutonium und komplexe Substanzen enthalten, ist die Behandlung mit Rieselfiltern wirksam. Dadurch werden die Komplexverbindungen zerstört, und die Aktivität wird im zurückbleibenden Schlamm konzentriert.
4. Die biologische Behandlung wird insbesondere bei sehr langlebigen Substanzen angewandt, bei denen die Eindampfung zu teuer wäre. Außerdem führen chemische Verfahren in vielen Fällen zum Ziel. Darüber hinaus sind bestimmte Lehmartens in der Lage, die Aktivitätskonzentration in sich zu steigern.
5. Stark konzentrierte flüssige Abfallstoffe, bei denen selbst eine biologische Assimilation unwirksam ist, werden meist mit Beton vermischt und als feste Abfallstoffe weiterbehandelt.

Die Schwierigkeiten der Aufspeicherung von Abfallaktivitäten in Verweilbehältern sind, je nach dem Grad der Aktivität, den Halbwertszeiten und den Mengen, verschieden. Ein relativ harmloses Problem liegt dann vor, wenn es sich um das Kühlwasser von kleineren Versuchsreaktoren mit offenem Kreislauf handelt, das einfach durch Verweilbecken²⁾ geleitet wird. Spezifisch hohe und langlebige Aktivitäten werden aus Abschirmungsgründen meist in unterirdischen Betontanks, von z. B. 25 m Durchmesser mit Spezialauskleidung³⁾ und gegebenenfalls Stahlzwischenmantel, gelagert. Die Auskleidung ist je nach der Art des Abfalles verschieden. Wegen der Wärmeentwicklung ($\sim 1 \text{ kW/m}^3$) und wegen der bei höheren Temperaturen gesteigerten Korrosionsanfälligkeit der Behälter ist meist ein Kühlsystem erforderlich. In einzelnen Fällen hat man die entstehende Wärme auch zur Selbsteindampfung ausgenutzt⁴⁾. Die Behälter sind fast stets mit Sammelgräben umgeben, in denen — oder zwischen den beiden Stahlmänteln — sich bei Undichtigkeiten die Flüssigkeit ansammelt und festgestellt werden kann. Gefährlich ist jedes unbeabsichtigte Eindringen von Aktivität in den Untergrund. Der Hauptvorteil der Tankaufbewahrung besteht darin, daß die Aktivität ständig unter Kontrolle gehalten wird. Es ist darauf zu achten, daß sich keine kritische Masse bilden kann. In den großen, zum Teil staatlichen Abfall-Lageranlagen⁵⁾ der USA⁶⁾ rechnet man mit Anlagekosten von 100 bis 600 $\$/\text{m}^3$ Flüssigkeit.

Das Ablassen von zerstreubaren flüssigen Abfällen, gleichgültig welcher Entstehung, in die vorhandenen Abwasserleitungen erfordert besondere Vorsichtsmaßnahmen sowie eine laufende Überwachung der gesamten Kanalisationsanlage einschließlich des Vorfluters und des Abzugsgebietes, damit nirgendwo eine gefährliche Aktivitätsanreicherung, z. B. in Biozyklen, vonstatten gehen kann⁷⁾; jedoch sollte

¹⁾ Hinweis auf: "Symposium on radioactive wastes", Ind. and Engng. Chemistry **43**, 1499 (1951); E. Sierp: „Radioaktive Abwässer“, Gesundh. Ing. **74**, 368 (1953), Nr. 21/22 und a. a. O. angegebene Literaturstellen.

²⁾ Hinweis auf E. J. Kilcawley u. a.: "Monitoring of radioactive fall-out in reservoirs", J. Am. Water Works Ass. **46**, 1101 (1954).

³⁾ Hinweis auf P. Voigt: „Neues Verfahren zum Auskleiden von Behältern mit korrosionsfesten Dünnschichten“, Umschau **56**, 454 (1956), Nr. 15.

⁴⁾ C. R. Andersen und Ch. A. Rohrman (A/Conf 8/P 552) geben an, daß sich nach einer gewissen Volumenverkleinerung durch Selbsteindampfung eine weitere künstliche Eindampfung mit nachfolgender Endstapelung als zweckmäßig erwiesen hat. Hinweis auf: "Fission product radioactivity and heat generation", A/Conf 15/P 1071.

⁵⁾ Englisch: Tank farm.

⁶⁾ Siehe z. B. C. R. Anderson und C. A. Rohrman: "The design and operation of high level waste storage facilities", A/Conf 8/P 552; J. W. Ullman und E. D. Arnold: "Decay and storage of irradiated fuel", 57-NESC-93.

⁷⁾ „Der Zweckverband für Kanalisationsförderung“ sowie die „Arbeitsgemeinschaft Abwässer“ haben sich bereits mit dem Problem auseinandergesetzt. Siehe z. B.: Korr. Abwasser, Oktober 1954, Dezember 1955 und März 1956. Hinweis auf: H. Götte: „Das Problem der Verunreinigung von Trink- und Brauch-

man sich hinsichtlich der zu treffenden Maßnahmen vor Übertreibungen hüten. Bei der chemischen Verdünnung werden dem Wasser zweckmäßigerweise die gleichen Elemente in Überkonzentration beigemischt, die auch im Abfall vorhanden sind. Dadurch wird die physiologische Schädigungsmöglichkeit verringert, weil alle Organismen nur eine beschränkte Menge von spezifischen Substanzen aufnehmen können. Im Kantonatshospital Zürich wird daher z. B. zu jedem Millicurie J^{131} 1 Gramm stabiles KJ hinzugegeben, bevor die Einleitung in die Kanalisation erfolgt¹⁾.

Mit der Ableitung von radioaktiven Abwässern in den Erdboden oder in Seen bzw. Flüsse hat sich bereits eine ganze Reihe von Autoren auseinandergesetzt²⁾. Über die biologischen Veränderungen, die durch eine solche Einleitung von radioaktiven Flüssigkeiten vor sich gehen können, liegen naturgemäß noch nicht genügend Erfahrungen vor, um ein abschließendes Urteil fällen zu können. Im Oak Ridge National Laboratory, wo die radioaktiven Flüssigkeiten in den Seen und Sümpfen des White Oak Creek System geklärt werden, nachdem in großen Absetzbecken während der Aufenthaltsdauer von 2 Tagen die kurzlebigen Isotopen ausgeschieden worden sind, wurden während einer Zeit von bisher 7 Jahren nur überraschend wenig Veränderungen des Pflanzen- und Tiersystems beobachtet. Allerdings sind offenbar bei bestimmten Pflanzenarten, z. B. bei der *juncus effusus*, einer Binsenart, gewisse Mißbildungen aufgetreten. Auf die Anreicherung der Aktivität in den Lebewesen des Columbia River, in den die Kühlwässer der Hanfordreaktoren eingeleitet werden, wurde bereits in § 100 eingegangen. Die Abfallbeseitigung durch Einleiten in den Erdboden stellt einen wichtigen Gesichtspunkt bei der Auswahl des Standortes für einen Kernreaktor bzw. ein Atomkraftwerk oder eine Aufbereitungsanlage dar. In den Erdboden eingeleitete aktive Flüssigkeiten vermischen sich nämlich keineswegs sofort mit dem Grundwasser, sondern bewegen sich unter Umständen zusammenhängend über lange Strecken. Daher sind vor dem Bau einer solchen Anlage eingehende und oft langwierige Studien des Grundwassersystems erforderlich. Außerdem ist eine umfassende Untersuchung des Bodens³⁾ auf seine Neutralisationskapazität, sein Ionenaustauschvermögen und seine sonstige physikalische und chemische Beschaffenheit notwendig. Ein möglichst tiefer Grundwasserspiegel unter dem Baugelände ist wegen der Filterwirkung der Zwischenschichten wünschenswert. Auch der geologische Schichtenaufbau am Standort und im Abzugsgebiet des Grundwassers ist von entscheidender Bedeutung⁴⁾ und erfordert eingehende Untersuchungen durch oftmals zahlreiche Bohrungen. Die festgestellten Verhältnisse geben in ihrer Gesamtheit die maximal zulässige spezifische Aktivität der in den Boden

wasser durch radioaktive Stoffe“, GWF 2, 42 (1956); A. E. Gorman: “Mutual interests between the water works and atomic-energy industries”, J. New Engl. Water Works Ass. 64, 148 (1950); E. C. Tsivoglou: “Stream surveys for radioactive waste control”, 57-NESC-21; C. P. Straub und G. R. Hagee: “Radioactive tracers in the field of sanitary engineering”, 57-NESC-87; B. Kahn und A. S. Goldin: “Radiochemical procedures for the identification of the more hazardous nuclides”, 57-NESC-88; E. Roedder: “Atomic waste disposal by injection into aquifers”, 57-NESC-1; F. Hartung: „Wasser im Atomzeitalter“, München (1957).

¹⁾ O. Hug: Bundesarbeitsblatt S. 826 (1955), Nr. 18.

²⁾ Siehe z. B. R. E. Brown u. a.: A/Conf 8/P 565; C. A. Mawson: A/Conf 8/P 12; A. E. Gorman: V. Weltkraft-Konferenz, Wien (1956), Bericht 130 J/6; NESC-Bericht 3 (1955); C. B. Amphlett: “Ground disposal of radioactive wastes”, *Atomics* 9, 242 (1958), Nr. 7; R. E. Brown u. a.: “Experience in the disposal of radioactive wastes to the ground”, A/Conf 15/P 1767; “Disposal of high level radioactive liquid wastes in terrestrial pits — a sequel”, A/Conf 15/P 2351; H. J. Dunster: “The disposal of radioactive liquid wastes into coastal waters”, A/Conf 15/P 297.

³⁾ Hinweis auf T. W. Brockett Jr. und C. R. Placak: “Removal of radioisotopes from waste solutions by soils”, Proc. 8th Industrial Waste Konferenz, Purdue University, Lafayette, Ind. (1953).

⁴⁾ Hinweis auf A. F. Gregory: “Ground water and surface geology at the Chalk River waste disposal area”; C. D. Amphlett: “The selection of sites and treatment of wastes before injection into the ground”, *Atomics* 9, 194 (1958), Nr. 6.

einleitbaren Abfälle. Letztlich muß aber auch an Betriebszwischenfälle gedacht werden, bei denen unter Umständen innerhalb kürzester Zeit größere Aktivitäten in den Erdboden abfließen.

Einfacher als eine Ableitung der flüssigen Abfälle in den Erdboden, in Flüsse oder in sonstige Binnengewässer scheint eine solche in die See¹⁾, und zwar an einer Stelle, an der der Verlauf der Meeresströmungen als hinlänglich bekannt angenommen werden kann. Auch hierzu gibt es verschiedene Verfahren und Möglichkeiten.

1. Einpumpen von hochkonzentrierten Salzlösungen auf den Grund abgelegener, tiefer und geschlossener Meeresbecken.
2. Verpacken der Salzlösungen in schwere Behälter oder Eingießen in Beton (zugleich Abschirmung) und Abwerfen in solche Becken.
3. Kontinuierliches, aber sehr langsames Ablassen aus einem fahrenden Schiff, so daß eine Verteilung — in verkehrsarmer Gegend — über große Entfernungen und somit eine starke Verdünnung erfolgt.

Nähere Einzelheiten können aus der angegebenen Literatur entnommen werden.

Bei der Konzentrierung flüssiger Abfälle durch Eindampfen gelingt es, die spezifische Aktivität im Destillat um einen Faktor 10^5 bis 10^7 gegenüber der ursprünglichen Lösung herabzusetzen. Der Abdampfückstand kann bis auf etwa $1/60$ des ursprünglichen Lösungsvolumens eingeeengt werden²⁾. Das Verfahren, das, wie ausgeführt, recht kostspielig ist, kann normalerweise nur bei kleineren Mengen Anwendung finden. Steht jedoch genügend (Abfall-)Wärmeenergie zur Verfügung, wie bei vielen Reaktoranlagen, dann dürfte das Eindampfen die sicherste, wirksamste und günstigste Konzentrierungsmethode sein.

Die einfache Filterung radioaktiver Abwässer, die über Sand, Ton oder Lehm erfolgen kann, stellt an sich eine unwirksame Methode dar; außer mechanischen und absorptiven Wirkungen sind Austauschvorgänge beteiligt. Eine Filterung durch Sägespäne oder Braunkohle scheint statt dessen erfolgversprechend³⁾. Ein besonderes Verfahren wurde im Brookhaven National Laboratory entwickelt⁴⁾. Montmorillonit, ein Lehm von 1 bis 10μ Teilchengröße⁵⁾, wird im Verhältnis 10:7,3 mit Wasser vermischt, zu einer steifen Paste verrührt und in einer Stahldüse zu Stäbchen gepreßt. Die Stäbchen werden in zylindrische Gefäße eingelegt und bieten dem durchströmenden Wasser eine große Oberfläche, an der die Kationen der Lösung adsorbiert werden. Ist die Adsorptionsfähigkeit der Stäbchen erschöpft, so werden sie aus dem Schutzzyliner entnommen und gebrannt. Je nach der Art des Brennens — in einem Ofen oder in einer Gasflamme — fallen Kristalle oder glasige Kügelchen an; die Kationen werden in wasserunlösliche Silikate überführt, die direkt für eine Endstapelung geeignet sind und z. B. im Ozean versenkt werden können. Bei schwächeren spezifischen Aktivitäten ist eine Anreicherung auch mit Hilfe von Ionenaustauschern möglich.

¹⁾ Hinweis auf C. E. Renn: A/Conf 8/P 569; H. Seligman, H. J. Dunster, D. R. R. Fair und A. S. McLean: A/Conf 8/P 418, 419 und 420; J. Wright: "The disposal of effluent in the sea", *Atomics* **7**, 274 (1956), Nr. 8; A. E. Shaw: "Factors affecting the distance point from the shore in the sea disposal of effluent", IGR-TN/D-443 (1957); B. H. Ketchum: "Biological factors determining the distribution of radioactive isotopes in the sea", A/Conf 15/P 402; B. G. Bogorov und E. M. Kreps: "Discharging radioactive waste into deep-water ocean depressions", A/Conf 15/P 2058 sowie A/Conf 15/P 296, 1355, 2431.

²⁾ R. W. Coopey: *Nuc. Sci. Abs.* **6**, 513 (1952). Hinweis auf T. C. Carnavos und J. W. Hagen: "High purity evaporator for waste concentration", *NU* **16**, 125 (1958), Nr. 2; S. Krawczynski: „Die Verdampfung als Methode zur Entaktivierung von radioaktiven Abwässern“, *Kerntechnik* **1**, 15 (1959), Nr. 1.

³⁾ P. Dejonghe u. a.: „Kern-Wissenschaft und -Technik“, *Dechema Monographien* **30**, 123 (1959). Hinweis auf *EW* **148**, 58 (1957), Nr. 18; *Umschau* **59**, 379 (1959), Nr. 12.

⁴⁾ W. S. Ginell, J. J. Martin und L. P. Hatsch: *NU* **12**, 14 (1954), Nr. 12; L. P. Hatch und W. H. Regan Jr.: "Concentrating fission products", *NU* **13**, 27 (1955), Nr. 12.

⁵⁾ Lieferung durch Filtrol Company, Los Angeles, Cal. Qualität Filtrol X 519 (R 2532).

Die beladenen Austauschharze werden meist verworfen und nur bei sehr kleinen Aktivitäten regeneriert. Weitere Methoden für die Überführung der aktiven Abfälle von der flüssigen in die feste Phase finden sich in der Literatur¹⁾.

Eine Beseitigung der Aktivität mit geeigneten Fällungsmitteln bewirkt ihre Überführung in schwerlösliche Verbindungen, die mittels Metallhydroxyden, Kohle, Kasein, Diatomeenerde usw. adsorbiert werden können. Ist die Art der Aktivität bekannt, so lassen sich auch die einzelnen Elemente nach Zusatz gleichartiger inaktiver Grundstoffe „als Träger“ einzeln ausfällen. Im allgemeinen sind die Fällungsmethoden relativ einfach und wirtschaftlich²⁾. Ein in England (Harwell) angewandtes Verfahren besteht in der Überführung der Aktivität durch Wärmebehandlung in eine wasserunlösliche kalzinierte Form. Ein Verfahren zur direkten Endstapelung aluminiumhaltiger aktiver Spaltproduktlösungen, wie sie bei der Auflösung von Füllelementen mit Aluminiumumhüllung anfallen, wurde von der General Electric³⁾ ausgearbeitet. Gibt man zu einer derartigen Lösung Natriumsilikat, so fällt ein Aluminiumsilicagel aus, das die aktiven Bestandteile aus der Lösung mitreißt und teils durch Adsorptionskräfte, teils chemisch bindet. Durch starke Hitzebehandlung kann das entstehende Gel zu einer steinharten Masse gebrannt werden; die Spaltprodukte sind dann so fest in das Gel eingebunden, daß die Endprodukte direkt in der Erde eingelagert werden können.

Die biologische Reinigung, für die sich radioaktive Abwässer mit langlebigen Isotopen in nicht zu großer Konzentration eignen, kann durch Tropfkörper und Belebtschlammanlagen erfolgen. Selbstverständlich werden alle diejenigen Stoffe nicht erfaßt, die weder für den Aufbau der Organismen gebraucht noch von den biologischen Flocken adsorbiert werden. Befindet sich neben dem Radioisotop auch noch die inaktive Form des betreffenden Elementes im Abwasser, so ist der Reinigungseffekt entsprechend dem Mischungsverhältnis von aktiven und inaktiven Isotopen verringert. Bewährt hat sich die biologische Reinigung bei Anwesenheit synthetischer Waschmittel und Komplexbildner. Nach Ruchhofs⁴⁾ dürfte dem Belebtschlammverfahren eine größere Bedeutung zukommen, da dieses Verfahren die besten Abtrennmöglichkeiten für den aktiven Bakterien Schlamm bietet. Die Stoffwechselfvorgänge der Mikroorganismen in den schlammigen Sedimenten⁵⁾, in denen die Speicherung der Aktivität erfolgt, werden nach den bisherigen Untersuchungen von Grune und Eliassen²⁾ auch durch hohe Strahlungsintensitäten nicht beeinflußt. Durch Organismen erfolgt im übrigen, wie in Paragraph 100 bereits ausgeführt, eine laufende Selbstreinigung der Gewässer, die aber, da die Organismen aus ihnen nicht entfernt werden können, eine Gefahrenquelle bedeuten kann. Im übrigen sind gerade hinsichtlich der biologischen Reinigungsverfahren noch sehr viele Fragen offen.

Die festen Abfallprodukte, die zum Teil direkt als solche anfallen (z. B. aus pyrometallurgischen Trennprozessen), oder deren Entstehung vorstehend beschrieben

¹⁾ Siehe z. B. "Some fundamental problems in fixation of radioisotopes in solids", A/Conf 15/P 2441; J. W. Loeding u. a.: "Fluidized bed conversion of fuel processing wastes to solids for disposal", A/Conf 15/P 1922; "Retention of fission products in ceramic glaze-type fusions", A/Conf 15/P 388; "Essais d'incorporation de solutions concentrées de produits de fission dans des verres et des micas", A/Conf 15/P 1176; L. C. Watson u. a.: "The disposal of fission products in glass", A/Conf 15/P 195.

²⁾ Siehe z. B. B. O. Hug: Bunde Arbeitsblatt S. 826 (1955), Nr. 18.

³⁾ Chem. and Engng. News vom 13. 1. 1958.

⁴⁾ C. C. Ruchhofs: "The possibilities of disposal of radioactive wastes by biological treatment methods: Sewage and Ind. Wastes 21, 877 (1949). Siehe auch Korr. Abwasser Dez. 1955 sowie Lit. Ber. über Wasser, Abw., Luft und Boden 1, 13 (1951), Nr. 24; C. C. Ruchhofs: "Disposal of radioactive wastes by biological methods", *Atomics* 1, 12 (1949) und 1, 52 (1949).

⁵⁾ R. W. Coopey: "Radioactive plankton from the Columbia River", *Nuc. Sci. Abs.* 6, 513 (1952).

wurde, gehören vorwiegend zu den unzerstreubaren Abfällen und sind dann Endstapelungsprodukte. Je nach ihrer Herkunft und ihrer spezifischen Aktivität kann aber auch eine Überführung

1. in die gasförmige Phase durch Verbrennung (organische Verbindungen, Tierkadaver usw.) in Spezialöfen oder
2. in die flüssige Phase, z. B. durch Auflösen in Säure,

zweckmäßig sein, um den Hauptteil in eine zerstreubare Form zu bringen. Die Art der Endstapelung, der häufig noch eine Zwischenstapelung vorausgeht, um die kurzlebigen Körper abklingen zu lassen, stellt ein Einteilungsprinzip für alle Abfälle dar. Die Endstapelung erfolgt nach einem entsprechenden Verpacken, einem Überführen in Beton oder einem Einbrennen in Lehm bzw. Glas usw.

1. in Lagern über der Erde,
2. in Lagern unter der Erde,
3. auf dem Meeresgrund.

Da die Verpackung usw. so erfolgen muß, daß die Aktivität nicht austreten und Verseuchungen verursachen kann, bereitet die Endstapelung manches schwierige Problem. Aus diesem Grunde wurde auch schon vorgeschlagen, die festen Abfälle in der Arktis bzw. Antarktis zu stapeln oder sogar durch Raketen ins Weltall oder auf andere Himmelskörper zu schießen¹⁾. Das Ausmaß der Schwierigkeiten wächst mit zunehmender Abfallmenge. Die geschilderten Probleme sind letztlich dadurch bedingt, daß für die Spaltprodukte kein ihrem Anfall entsprechender Bedarf besteht oder in absehbarer Zeit geweckt werden kann. Der Umfang, in dem Spaltprodukte heute bereits industriell verwendet werden, ist noch sehr gering. An erster Stelle ist wohl die Lebensmittelkonservierung²⁾ zu nennen, die allerdings auch Gefahren in sich trägt. Außerdem dienen Spaltprodukte als Reaktionsbeschleuniger in der Chemie³⁾ und zur Verhütung elektrischer Aufladungen. Man hat in den USA Verfahren zur Trennung der einzelnen Spaltprodukte voneinander ausgearbeitet. In Oak Ridge wurde eine entsprechende Anlage mit einem Kostenaufwand von $1,8 \cdot 10^6$ \$ errichtet⁴⁾.

Abschließend sei vermerkt, daß der Hauptteil der radioaktiven Abfälle in den chemischen Aufbereitungsanlagen anfällt. Bei den einzelnen Versuchsreaktoren, oder auch Kernkraftwerken, bei Laboratorien im landläufigen Sinne, bei medizinischen und technischen Betrieben usw. ist die Abfallbeseitigung praktisch kein Problem, da die anfallenden Aktivitäten so gering sind, daß sie wohl in jedem Falle zerstreubar sind bzw. in die zerstreubare Form überführt werden können, ohne daß eine zu große Dauerbelastung des Abzugsgebietes entsteht. Bei einer größeren Ausweitung der Ausnutzung der Kernenergie muß sich der Staat bzw. der TÜV der Abfall-

¹⁾ Rajewsky schlägt vor, den Abfall für mehrere Länder gemeinsam auf einer abgelegenen und unbewohnten Insel zu stapeln. Hinweis auf L. v. Erichsen: „Die Lagerung radioaktiver Abfallstoffe in ariden Gebieten“, *Atomkernenergie* **3**, 112 (1959), Nr. 3; B. Philberth: „Beseitigung radioaktiver Abfallsubstanzen in den Eiskappen der Erde“, *Atomkernenergie* **3**, 116 (1959), Nr. 3.

²⁾ Hinweis auf D. Duffey: *NU* **11**, 9 (1953), Nr. 10; „QM food program challenged on induced radioactivity“, *NU* **17**, 17 (1959), Nr. 8; L. E. Brownell u. a.: TID-8001 (1955), TID-8002 (1956); J. Kuprianoff: „Zur Problematik der Strahlenkonservierung von Lebensmitteln“, *Atomkernenergie* **4**, 296 (1959), Nr. 7/8.

³⁾ R. Roberts u. a.: „Some recent advances in the chemical utilisation of fission products“, *A/Conf 15/P* 65.

⁴⁾ Hinweis auf: „Separation of long lives radioactive isotopes from a mixture of fission products and corrosion elements“, *A/Conf 15/P* 488; N. E. Brezhneva u. a.: „Isolation of radioactive fission elements“, *A/Conf 15/P* 2295; R. L. Moore u. R. E. Burns: „Fission product recovery from radioactive effluents“, *A/Conf 15/P* 1768; „The removal of strontium from wastes by a calcite-phosphate mechanism“, *A/Conf 15/P* 395; A. Raggenbass u. a.: „A pilot unit for the separation of cesium 137“, *A/Conf 15/P* 1179.

beseitigung annehmen und, wie z. B. in den USA¹⁾, entsprechende zentrale Maßnahmen treffen, Abfall-Lagerungsanlagen einrichten und die Endstapelung in die Hand nehmen²⁾).

XXII. Katastrophenschutz³⁾

§ 104. Nahauswirkungen einer ungesteuerten Kettenreaktion

Das Auftreten einer ungesteuerten Kettenreaktion ist, wie angedeutet und wie im Kapitel Regelungstechnik ausgeführt, bei den meisten Reaktortypen aus physikalischen Gründen praktisch ausgeschlossen. In Aufbereitungsanlagen für bestrahlte Reaktorfüllungen jedoch z. B. ist es zumindest denkbar, daß sich bei ungenügender Vorsicht irgendwo eine kritische Masse bilden könnte. Außerdem kann theoretisch die Erstinbetriebnahme einer neuen Reaktorfüllung derartige Gefahren mit sich bringen. Dennoch ist bis heute noch kein Unfall dieser Art eingetreten. Absichtlich hat man am 22. Juli 1954 den Boiling Water Reaktor BORAX I durchgehen lassen.

Konkrete Angaben über die Nahauswirkungen einer ungesteuerten Kettenreaktion liegen daher praktisch nur von den zahlreichen Explosionen von Atomkernbomben⁴⁾ vor. Eine direkte Vergleichsmöglichkeit ist hierdurch jedoch nicht gegeben, da die Auswirkungen wahrscheinlich um Zehnerpotenzen differenzieren. Auf die Auswirkungen, die sich in größerer Entfernung als Verseuchung bemerkbar machen, wurde bereits eingegangen.

Beim Abwurf der Bombe auf Hiroshima am 6. August 1945 betrug der Radius schwerer Gebäudeschäden etwa 4 km⁵⁾. Die Druckwelle zeitigte im Umkreis von 6 bis 7 km erhebliche Auswirkungen. Schwere Verbrennungen durch Wärmestrahlung traten bis 3 km Abstand auf und verliefen im Umkreis von 1 km momentan tödlich. Die gleiche Wirkung hatte die freiwerdende γ -Strahlung für Ungeschützte bis 1,5 km Entfernung vom Explosionsort. Das Maximum der Wärmestrahlung, der zufolge Feuersbrünste entzündet werden, wird nach einigen Zehntelsekunden erreicht. Leichtere Verbrennungen und Schäden traten bis zu 5 km ein⁶⁾. Nach amtlichen amerikanischen Angaben⁷⁾ wurden 70000 Tote und ebenso viele Verletzte gezählt, rund die Hälfte der Bevölkerung der Stadt⁸⁾. Von den insgesamt in Hiroshima und Nagasaki getöteten 106000 Menschen fielen 60000 der Neutronen- und γ -Strahlung zum Opfer. Der zitierte offizielle amerikanische Bericht über die Wirkung von Atomkernbomben gibt an⁹⁾, daß die auf Hiroshima und Nagasaki abgeworfenen Bomben einer Explosionskraft von 20000 Tonnen Trinitrotoluol (TNT) gleichkamen. Die von der Spaltung erfaßte Substanz soll etwa 1 kg U²³⁵ entsprochen haben.

¹⁾ Für unterirdische Lager haben die USA bis zum Jahre 1958 bereits $65 \cdot 10^6$ \$ aufgewandt.

²⁾ Hinweis auf W. A. Rodger und Fineman: "A complete waste disposal system for a radiochemical laboratory", NU 9, 50 (1951), Nr. 6; E. C. Jensen u. a.: "Problems facing state agencies in handling treatment and disposal of radioactive wastes", 57-NESC-92.

³⁾ Hinweis auf Umschau 55, 257 (1955); T. P. Eberhard: Philadelphia Med. 46, 533—755 (1950/51); K. Bechert: „Probleme des Strahlenschutzes“, Atomkernenergie 1, 219 (1956), Nr. 6.

⁴⁾ Siehe z. B. Pwr. Engng. 59, 62 (Juli 1955).

⁵⁾ Holzhäuser sollen bei einer Bombe gleicher Äquivalentsprengkraft noch im Umkreis von etwa 20 km um den Explosionsherd völlig zerstört und in bis zu etwa 30 km Entfernung schwer beschädigt werden. Beim Abwurf auf eine mittlere Großstadt ist nach L. O. Jakobsen u. a. (J. Am. Med. Ass. 15, 1 (1949) damit zu rechnen, daß ein Drittel der Bevölkerung sofort oder in den folgenden Wochen zugrunde geht.

⁶⁾ Verbrennungen 3. Grades können noch in einem Umkreis von bis zu 50 km und Brandwunden bis zu 80 km entstehen.

⁷⁾ "The effect of atomic weapons", New York (1950).

⁸⁾ Die auf Nagasaki abgeworfene Plutoniumbombe ergab nach den gleichen Unterlagen 36000 Tote und 40000 Verletzte.

⁹⁾ Siehe § 27.

Dieser Bombentyp wird in dem aufgeführten Bericht als „Nominalbombe“ bezeichnet.

Besonders wirksam sind in einer größeren Höhe zur Detonation gebrachte Bomben, von denen sich ein Angreifer eine besondere Breitenwirkung verspricht, und auf die im nächsten Paragraphen eingegangen wird. Aber auch unter der Erde und unter Wasser ausgelöste Bomben zeitigen nach den 1951 und 1955 in der Wüste von Nevada durchgeführten Versuchen eine furchtbare Wirkung. Nach einem im Jahre 1957 vom US-Verteidigungsministerium und von der AEC gemeinsam herausgegebenen Handbuch soll eine einzige tief unter der Erde zur Detonation gebrachte Kernwaffe in der Lage sein, eine ganze Stadt unter einer Stein- und Erdlawine zu begraben. In dem Bericht heißt es dazu: Nach Versuchsergebnissen von Nevada kann geschätzt werden, daß eine Bombe mit einer Sprengkraft entsprechend 10^6 Tonnen TNT, die aus der Luft abgeworfen wird und in leichtem Boden etwa 18 m tief eindringt, ehe sie explodiert, einen Krater von 60 m Tiefe und 450 m Durchmesser reißen würde. Das bedeutet, daß etwa 10 Millionen Tonnen Erde und Gestein ausgeworfen würden. Die Erdsäule würde sich etwa 1,5 km hoch erheben, bevor sie — stark aktiv — zusammenstürzt und alles unter sich begräbt. In dem zitierten Bericht wird diese Art der Anwendung als besonders wirksam beim Einsatz gegen Luftstützpunkte und Industriebetriebe bezeichnet. Eine unter Wasser ausgelöste Bombenexplosion würde bei einer Äquivalentsprengkraft von 10^5 Tonnen TNT in etwa 1,5 km Entfernung vom Explosionsort eine Flutwelle von 60 m Höhe auslösen. Außerdem würde sich aus den hochgeschleuderten Wassermassen eine außerordentlich stark aktive Wolke bilden. Nach dem gleichen Bericht hat man bei einem Wasserstoffbombenabwurf in einer Entfernung bis zu 55 km in Windrichtung noch mit tödlicher Radioaktivität zu rechnen. Und selbst in Entfernungen bis über 160 km würden noch tödliche Auswirkungen der Radioaktivität zu verzeichnen sein, wenn sich die dort befindliche Bevölkerung nicht in Schutzräumen befindet. Eine Wasserstoffbombe mit einer Sprengkraft entsprechend $40 \cdot 10^6$ Tonnen TNT zerstört Eisenbetonhäuser noch in einem Umkreis von 18 km um den Explosionsort völlig. Ein weiteres Eingehen auf die Auswirkungen einer Atomkernbombenexplosion scheint in diesem Rahmen und ergänzend zu den Ausführungen der Paragraphen 27 und 105 nicht angebracht. Da Atomkernbomben darauf „gezüchtet“ sind, bei ihrer Explosion eine möglichst große Energie bzw. Leistung freizusetzen, wird die Wirkung beim Durchgehen eines Kernreaktors erheblich kleiner sein. Bei dem erwähnten Versuch mit Borax I sollen z. B. nur Wirkungen erzielt worden sein, die einer Explosion von wenigen kg TNT entsprachen. Hinsichtlich der großen Zahl an Menschenopfern bei den Bombenabwürfen in Hiroshima und Nagasaki ist noch zu vermerken, daß diese Anzahl besonders hoch war, da es sich um die ersten Bomben dieser Art handelte, und da keine entsprechenden Luftschutzvorkehrungen getroffen waren.

§ 105. Verhalten beim Ablauf einer ungesteuerten Kettenreaktion

Obschon ein absolut sicherer Schutz vor den Auswirkungen einer ungesteuerten Kettenreaktion nicht möglich ist, lassen sich die Verluste an Menschenleben durch geeignete Maßnahmen erheblich verringern, wie z. B. die Untersuchungen von *W. Riezler* im Rahmen der Bundesluftschutzkommission und wie entsprechende Arbeiten in fast allen anderen Ländern ergeben haben. In den USA hat man z. B. festgestellt, daß Menschen die Explosion einer in 150 m Höhe über dem Erdboden auf einem Stahlurm angebrachten Atomkernbombe von doppelter Sprengkraft wie die Nominalbombe ungeschädigt überstehen:

- ab 3,0 km Entfernung in Panzerwagen,
- ab 3,5 km Entfernung in 1,80 m tiefen Gräben mit Balkenabdeckung oder in verstärkten Schutzgräben mit Drahtgitterabdeckung,
- ab 3,9 km Entfernung in Mannschaftswagen.

Wie allein diese Aufstellung zeigt, ist die Wirkung sinnvoller Schutzmaßnahmen in keiner Weise illusorisch¹⁾.

Bei einer Atomkernbombenexplosion in einer gewissen Höhe wird zunächst die intensive Strahlung aus dem Feuerball wirksam, dessen Ausdehnung für A-Bomben mit 140 m und für H-Bomben²⁾ mit 5 bis 6,5 km Durchmesser angegeben wird. Der Feuerball, der über Hunderte von Kilometern zu sehen ist, und der das Vor-signal für die nachfolgenden Zerstörungswellen darstellt, bildet die Zone der absoluten Vernichtung. Personen, die mit ungeschützten Augen in seine Richtung blicken, werden — gegebenenfalls bis zu zeitweiliger Blindheit für Stunden und Tage — geblendet. Nach *Byrnes* u. a.³⁾ sind dauernde Schäden der Augen — abgesehen von einer direkten Gewebeerstörung — durch die Hitzewelle oder die Neutronenstrahlung am Tage bis zu 58 und bei Nacht bis zu 65 km Entfernung von der Detonationsstelle möglich. Um der Strahlung aus dem Feuerball zu entgehen, reicht im allgemeinen ein Abdecken der nicht bekleideten und daher besonders gefährdeten Körperstellen, insbesondere des Gesichtes. Wenn keine andere Möglichkeit besteht, sollte man zumindest Augen und Gesicht mit den Händen schützen oder das Gesicht vom Feuerball abwenden. Einen gewissen Blendungsschutz, vornehmlich gegen den schädlichen Ultraviolettanteil der Strahlung, geben geeignete Sonnenbrillen in dichtanschließender Ausführung mit reflektierender Oberfläche. Die gleichzeitig mit dem Sichtbarwerden des Feuerballes wirksam werdende Wärmestrahlung (Hitzewelle) setzt alle entzündlichen Gegenstände in Brand, sofern sie der direkten Bestrahlung ausgesetzt sind. Die Schattenseite bleibt von dieser Gefährdung frei. Daher ist es zweckmäßig, beim Sichtbarwerden des Feuerballes hinter eine Mauer oder einen anderen Schattenspender zu treten. Je dicker dieser Schattenspender ist, um so mehr schützt er vor der gleichzeitig mit der Wärmestrahlung eintreffenden sehr harten γ -Strahlung. Bei direkter Bestrahlung ist dunkle Kleidung gefährlicher als helle. Lose Kleidung ist besser als festliegende. Dunkle Muster auf einem hellen Kleid führen unter Umständen zu Teilverbrennungen. Bei Kraftfahrzeugen können Schäden an den Reifen oder am Lack entstehen; die Polster können in Brand gesetzt werden. Eine Entzündung des im Tank befindlichen Benzins ist im allgemeinen nicht wahrscheinlich. Häuser und Waldbrände entstehen noch in erheblicher Entfernung vom Explosionsort. Berechnungen über die Reichweite von Hitzewellen und ihre Auswirkungen hat *Knapp*⁴⁾ für Wasserstoffbomben mit einer Sprengkraft von $20 \cdot 10^6$ Tonnen TNT durchgeführt. Die mechanischen Auswirkungen der Explosion, über die *Knapp* gleichfalls berichtet, werden durch die Druckwelle ausgelöst, die sich etwa mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet. Der Druckwelle folgt eine Unterdruckwelle. Der Unterdruck ist so beträchtlich, daß ein Großteil des in der Luft vorhandenen Wasserdampfes kondensiert und als Nebel niedergeschlagen wird. Der Nebel beendet die Wirkungen der Hitzewelle. Infolge der Unterdruckwelle und des thermischen Auftriebs im Feuerball entsteht eine kräftige Luftströmung auf den Explosionsort hin, die sich schnell zu einem Feuersturm verstärkt, der die gezündeten Brände weiter entfacht.

¹⁾ Hinweis auf: V. L. Couch: "The H-Bomb and industry defense", ASME-Bericht 56-SA-3.

²⁾ R. E. Lapp: "Civil defense faces new peril", Bulletin of the Atomic Scientists 10, 306 (1954).

³⁾ Mitteilung auf dem 7. Congress of Ophthalmology am 15. 9. 1954.

⁴⁾ H. A. Knapp: "South Woodley looks at the H-Bomb", Bulletin of the Atomic Scientist 10, 305 (1954).
Siehe auch Umschau 55, 260 (1955), Nr. 9.

Auf Grund der kurz skizzierten Explosionsauswirkungen sollte man beim Erscheinen des Feuerballs mit davon abgewandtem, also geschütztem Gesicht eine geeignete Stelle, z. B. einen festen Keller, aufsuchen. Im Freien ist es zweckmäßig, sich an einem Platze hinzuwerfen, der nicht im Schuttkegel eines Gebäudes liegt, und sich vollständig überdecken, z. B. mit einem Mantel, den man einige Zeit nach dem Abklingen der direkten mechanischen Wirkungen abwirft und evtl. an Ort und Stelle liegen läßt, weil sich auf dem Mantel starke Aktivität absedimentiert hat¹⁾. Auf jeden Fall sollte man sich gut abschütteln und bei allernächster Gelegenheit die Aktivität mit sehr viel unverseuchtem fließendem Wasser und mit Seife abwaschen. Es ist selbstverständlich, daß man danach trachten muß, die Verseuchungszone so schnell wie möglich zu verlassen. Bei jeder Nahrungs- und Wasseraufnahme²⁾ muß mit einer Verseuchung gerechnet werden. Gegebenenfalls empfiehlt es sich, jede Nahrungs- und Wasseraufnahme zu unterlassen. Beim Passieren des Verseuchungsgebietes kurz nach der Explosion hänge man sich ein möglichst dichtes Tuch (Gummituch) über und atme, wenn möglich, nur durch ein Filter (Gasmasken oder nasses, inaktives Tuch)³⁾.

Für den Fall, daß eine Vorwarnung erfolgt, z. B. in einem Krieg, begeben man sich unverzüglich in entsprechende Schutzbauten⁴⁾. Besonders geeignet sind bergwerkähnliche Stollen oder Großbunker für z. B. 250 bis 1500 Menschen. Für einzelstehende Häuser, für aufgelockerte Siedlungen und für Parkstädte, die im allgemeinen nicht als „angriffswürdig“ angesehen werden dürften, hat man in der Bundesrepublik drei Typen von Bunkerkästen für je maximal 25 Personen entworfen. Die Bunkerkästen sollten, oben erdbodengleich, außerhalb des Schuttkegels größerer Gebäude errichtet werden. Für die Decke sowie für alle Seiten ist Eisenbeton erforderlich. Die Auslegegrößen für die drei Typen betragen:

Wandstärken [cm]	Preis [DM/Person]	Maximaler Außendruck [atü]
60	450	9
40	270	3
30	115	1

Bei allen derartigen Schutzeinrichtungen sind Sandfilter für die Atemluftzuführung brauchbar. Für eine zweckmäßige Gestaltung des Zuganges, für hitzebeständige Türen sowie für Nahrungsmittel- und Wasservorräte muß Sorge getragen werden. Für jeden Schutzbau ist ein geeignetes Strahlungsmeßgerät erforderlich. Es empfiehlt sich, alle Bunker mit einer halbkugelförmigen Kuppeldecke, gegebenenfalls aus Schwerkton, zu versehen und ihnen eine gewisse Eigenbewegungsmöglichkeit zu belassen, damit sie den mechanischen Beanspruchungen besser Widerstand leisten können. Über die Planung von unterirdischen Krankenhaus-Schutzbauten berichtet *H. H. Kress*⁵⁾.

¹⁾ Hinweis auf A. Rudloff: „Schutz gegen die Gammastrahlung des radioaktiven Fallout bei Atombombenexplosionen“, *Atompraxis* 4, 444 (1958), Nr. 12.

²⁾ Reinigung durch Vollentsalzungsanlage — gegebenenfalls nach vorherigem Desinfizieren — möglich. Dem vollentsalzten Wasser müssen vor dem Gebrauch Neutralsalze zugesetzt werden. Einsatz fahrbarer Vollentsalzungsanlagen zweckmäßig.

³⁾ In den USA sollen z. B. Schutzkoffer mit Ventilator und Filter im Handel erhältlich sein, in denen Kleinkinder während eines Transportes nach einer Explosion vor direktem Zutritt von aktivem Staub geschützt werden können.

⁴⁾ Siehe z. B. H. H. Schloßberger: „Bautechnischer Luftschutz“, 2. Aufl., Düsseldorf (1956).

⁵⁾ H. H. Kress: *Z. VDI* 97, 243 (1955).

H. Die Strahlenabschirmung¹⁾

XXIII. Grundlagen

§ 106. Wirksame Absorptionsprozesse²⁾

Sowohl über die physikalischen Eigenschaften als auch über die Auswirkungen der verschiedenen Kernstrahlungen und über ihre Absorptionsmöglichkeiten ist in den vorstehenden Kapiteln und Abschnitten bereits mehrfach berichtet worden. Insbesondere in den Kapiteln IV, XI und XIX sowie in Paragraph 21 finden sich viele grundlegende Ausführungen, die an dieser Stelle nur noch verschiedener Ergänzungen bedürfen. Für die Absorption der verschiedenen Strahlungen in Materie³⁾ gilt Gleichung (V/6) bzw. (V/8), ein Exponentialgesetz.

α -Teilchen mit einer Energie unter 7,5 MeV können die menschliche Haut nicht durchdringen. Liegt die α -Energie höher als 7,5 MeV, so haben die emittierenden instabilen Isotope wegen des *Geiger-Nuttal-Gesetzes* (IV/18) nur Halbwertzeiten in der Größenordnung von Sekunden und Sekundenbruchteilen: α -Teilchen sind also für normale Abschirmbetrachtungen ohne Belang. Sie sind von Bedeutung, wenn es sich um die Berechnung einer Aufwärmung infolge radioaktiver Bestrahlung handelt; α -Teilchen kombinieren mit zwei Elektronen zu Heliumgas, dessen Druckwirkungen in manchen Fällen berücksichtigt werden müssen.

β^- - und β^+ -Teilchen sind um Zehnerpotenzen leichter als alle anderen geladenen Partikel einschließlich der Mesonen, die aber in diesem Zusammenhang keine Berücksichtigung zu finden brauchen. Bei gleicher kinetischer Energie ist die Geschwindigkeit von β -Teilchen daher entsprechend größer⁴⁾ und die Ionisationsdichte demnach kleiner als bei den anderen geladenen Teilchen. Die Berechnung der

¹⁾ R. Stephenson: "Introduction to nuclear engineering", New York (1954). Siehe auch H. E. Stone: "Shielding concepts for nuclear reactors", ASME-Bericht 55-S-20; T. Rockwell: "Reactor shielding design Manual", New York (1956) und (1958), (TID-7004); E. P. Blizard: "Elements of radiation shielding", New York (1956); E. P. Blizard: "Nuclear radiation shielding principles". The Role of Engineering in Nucleon Energy Development, Oak Ridge (1951); J. G. Beckerley: "Annual review of nuclear science", Bd. 5, Stanford (1955); "Radiation shielding: information bibliography", IGRL-IB/R-30 (1957); C. C. Horton: "The theory and practice of shielding", AERE RS/L-3 (1954); C. C. Horton u. a.: "Radiation shielding handbook", New York und London (1957); C. E. Iliffe: "Shielding against nuclear radiation", J. of British Nucl. Energy Conference 1, 3, 241 (1956); C. J. Engberg: "Radiation shields and shielding". A. Bibliography of unclassified AEC-Report Literature, TID-3032 (1952) und Supplement Nr. 1 (1. 12. 1954) von H. E. Voress; B. T. Price u. a.: "Radiation shielding", New York, (1957); W. J. Henderson und A. C. Whittler: "AC-Report" 578 (Rev.) (1957); H. M. Glen: "Advances in nuclear engineering", Bd. 2; A. R. Vernon: NAA-SR-1949. (1957); W. W. Brown und B. A. Enghom: NAA-SR-Memo-1143 (1957); E. P. Blizard: "The shielding of nuclear reactors", A/Conf 15/P 2162; J. Seetzem: „Bericht über den heutigen Stand der Abschirmprobleme bei Kernspaltungsreaktoren“, Atomkernenergie 4, 140 (1959), Nr. 4 und dort angegebene Quellen; C. C. Horton: "Reactor shielding analysis", Nucl. Engng. S. 515 (1958). Hinweis auf Luise Meyer-Schützmeister: Naturw. 37, 501 (1950); M. u. R. Jäger: Strahlentherapie 78, 569 (1949).

²⁾ Hinweis auf W. A. Aron u. a.: "Range-energy curves", AECU-663 (1949).

³⁾ Hinweis auf W. Hanle: „Wechselwirkung energiereicher Strahlung mit Materie“, Atomkernenergie 1, 84 (1956), Nr. 3.

⁴⁾ Siehe § 20.

Schwächung einer β -Strahlung beim Durchgang durch Materie mit Hilfe von (V/6) bzw. (V/8) stößt auf Schwierigkeiten, weil erstens die Emission der β -Teilchen mit einem kontinuierlichen Energiespektrum¹⁾ erfolgt, und weil ein β -Teilchen zweitens einen erheblichen Teil seiner Energie in einem einzigen Stoß abgeben kann. Der Energieverlust durch Ionisation geht in erster Näherung mit $N \cdot Z$, wenn N die Anzahl der Absorberatome pro Kubikzentimeter und Z deren Kernladungszahl bezeichnet. Bei kleinen Energien ist, wie ausgeführt, die Ionisierungsdichte von β -Teilchen sehr hoch. Sie fällt mit steigender Energie sehr schnell auf ein Minimum ab, das bei etwa 1 MeV liegt,

um danach ungefähr konstant zu bleiben. **Abbildung XXIII, 1** zeigt die Energie-Reichweiten-Beziehung für β -Teilchen in verschiedenen Stoffen. Die Kurve für Aluminium²⁾ ist gemessen, die beiden anderen Kurven sind durch Multiplikation der Werte für Aluminium mit $1/N \cdot Z$ berechnet. β -Teilchen höherer Energie geben beim Durchgang durch Materie, abhängig von der Ordnungszahl, zusätzliche Energien durch die Emission der Bremsstrahlung³⁾ ab, die der Erzeugung von Röntgenstrahlen analog ist, bei der man Elektronen hoher Energie auf ein Metallstück, eine Antikathode, auffallen läßt. Wegen der meist höheren Energie der β -Teilchen — verglichen mit der der Elektronen bei der Röntgenstrahlerzeugung — ist die von ihnen ausgelöste Bremsstrahlung meist härter, d. h. kurzwelliger, und liegt meist im Wellenlängenbereich der γ -Strahlung. Insbesondere bei reinen β -Strahlern wie P^{32} oder auch Sr^{89} kann die Bremsstrahlung ggf. mehr Schaden verursachen als die primären β -Teilchen. Der Energieverlust einer β -Strahlung beim Durchgang durch Materie geht in erster Näherung mit der β -Energie E und mit Z^2 . Für Abschirmberechnung ist es ausreichend, wenn der Anteil F , der in Bremsstrahlung umgewandelten β -Energie nach der von Compton⁵⁾ gegebenen Beziehung

$$F = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot Z \cdot E \quad (\text{XXIII/1})$$

berechnet wird, die allerdings etwas zu hohe Werte liefert. Bei β -Energien unter 0,1 MeV ist normalerweise kein Schutz gegen die Bremsstrahlung erforderlich. Bei härteren β -Strahlungen nimmt man an, daß die Energie der Bremsstrahlung gleich der der primären β -Strahlung ist. Als Entstehungsort der Bremsstrahlung legt man

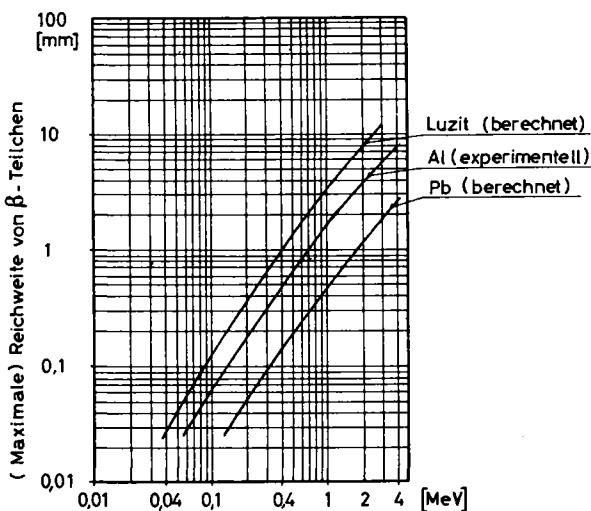


Abb. XXIII, 1.
Energie-Reichweiten-Beziehung für β -Teilchen⁴⁾

¹⁾ Siehe § 18.

²⁾ Hinweis auf C. B. Walker: Phys. Rev. **103**, 547 und 558 (1956).

³⁾ Englisch: Braking radiation.

⁴⁾ Nach L. E. Glendenin: NU **2**, 12 (1948), Nr. 1.

⁵⁾ A. H. Compton und S. K. Allison: "X-rays in theory and experiment", New York (1935).

diejenige Entfernung von der Quelle zugrunde, die der mittleren Reichweite der β -Teilchen entspricht; man liegt auf diese Weise auf der sicheren Seite. Zusätzlich zu den aufgeführten Gesichtspunkten muß bei Positronenstrahlern noch beachtet werden, daß beim Zusammentreffen eines Positrons mit einem Elektron zwei β -Quanten von je $\frac{1,02}{2} = 0,51$ MeV entstehen¹⁾, wobei sich die in der Masse der beiden Teilchen gespeicherte Energie gemäß (II/4) in Strahlungsenergie umsetzt. Auf die Zerstrahlung eines Elektronenzwillings wird am Schluß dieses Paragraphen nochmals eingegangen.

Auf die Abschirmung bei anderen geladenen Teilchen, wie Protonen, Deuteronen, Tritonen usw., soll nicht näher eingegangen werden, da diese Frage bei der Reaktorabschirmung keine praktische Bedeutung besitzt. Ihr muß bei Teilchenbeschleunigern Rechnung getragen werden. Teilchenenergien über 10 MeV liegen in der Größenordnung der Bindungsenergie der Neutronen. Die infolgedessen ausgelösten Teilchen dieser Art besitzen eine immense Durchdringungsfähigkeit. Auf die Reichweite von Spaltproduktionen und ihre Wirkungen wurde bereits in Kapitel XI eingegangen.

Während in der in Kapitel X behandelten Diffusionstheorie das mittlere Verhalten eines Neutrons mit statistischen Mitteln untersucht wurde, interessiert man sich bei den Abschirmbetrachtungen für diejenigen Neutronen, die ein extremes Verhalten an den Tag legen²⁾, also z. B. für solche mit extrem großen Reichweiten. Derartige Teilchen erfahren auf ihrem Wege nur eine kleine Anzahl von streifenden Zusammenstößen, unter kleinem Winkel also, und verlieren folglich pro Stoß nur einen geringen Energieanteil. In eine Abschirmung eintretende schnelle Neutronen erfahren elastische und unelastische Zusammenstöße³⁾ und können wegen des in Paragraph 21 behandelten $1/v$ -Gesetzes erst dann absorbiert werden, wenn ihre Geschwindigkeit genügend reduziert ist. Bei langsamen Neutronen kann man stets mit einem Einfang durch irgendeinen Absorber rechnen, da fast alle Stoffe im niedrigen Energiebereich hohe Neutronenabsorptionsquerschnitte aufweisen. Die Reichweite eines Neutronenstrahles ist also nur vom Verhalten der schnellen Neutronen⁴⁾ abhängig. Wie ausgeführt, folgt auf die Absorption eines Neutrons in den meisten Fällen eine γ -Emission⁵⁾ mit einer Energie von im Mittel etwa 6 MeV. Diese γ -Strahlung muß selbstverständlich bei der Berechnung einer Abschirmung berücksichtigt werden. Um die Anzahl der Einfang- γ -Quanten möglichst gering zu halten, ist eine sinnvolle Werkstoffauswahl für die Abschirmung am Platze. Einzelne Isotope nämlich, wie z. B. B^{10} und Li^6 ⁶⁾ emittieren keine Quanten höher Energie bzw. nur schwere Partikel, die leicht abgebremst werden können; außerdem besitzen beide Isotope hohe Absorptionsquerschnitte gegenüber langsamen, insbesondere gegenüber thermischen Neutronen. Die emittierte Quantenenergie bei B^{10} beträgt in 93 Prozent aller Fälle nur 0,5 MeV. Beim Strahlungseinfang durch normale Wasserstoffatome wird eine Quantenstrahlung von 2,23 MeV frei, deren Energie erheblich kleiner ist als diejenige bei den meisten anderen Stoffen. Bei N^{14} erfolgt in rund 95 Prozent

¹⁾ Siehe §§ 5 und 18. Temperatureffekte bei der Zerstrahlung werden in Phys. Rev. **99**, 593 (1955) beschrieben.

²⁾ Hinweis auf H. Goldstein: "Neutron data needed for shielding and reactor design", NU **11**, 39 (1953), Nr. 7; US Atomic Energy Commission: "Neutron cross sections", New York (1955).

³⁾ Siehe Tasehek: "Elastic, non-elastic and transport neutron cross sections", A/Conf 8/P 573.

⁴⁾ Hinweis auf Weißkopf: "The theoretical prediction of neutron cross-sections of non fissionable elements for energies up to 10 MeV", A/Conf 8/P 830.

⁵⁾ Siehe Groshev u. a.: "Thermal neutron capture γ -ray", A/Conf 8/P 651.

⁶⁾ Hinweis auf F. L. Rike: Phys. Rev. **103**, 741 (1956).