

# Zur Kenntnis von [<sup>219</sup>, <sup>220</sup>, <sup>222</sup> Rn] Radon im Wohnbereich

Robert J. Schwankner

**Sonderdruck aus arcus 1986 □ 6**

Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH · Franz-Joseph-Straße 9 · D-8000 München 40

# Zur Kenntnis von $[^{219}, ^{220}, ^{222} \text{Rn}]$ Radon im Wohnbereich

Robert J. Schwankner

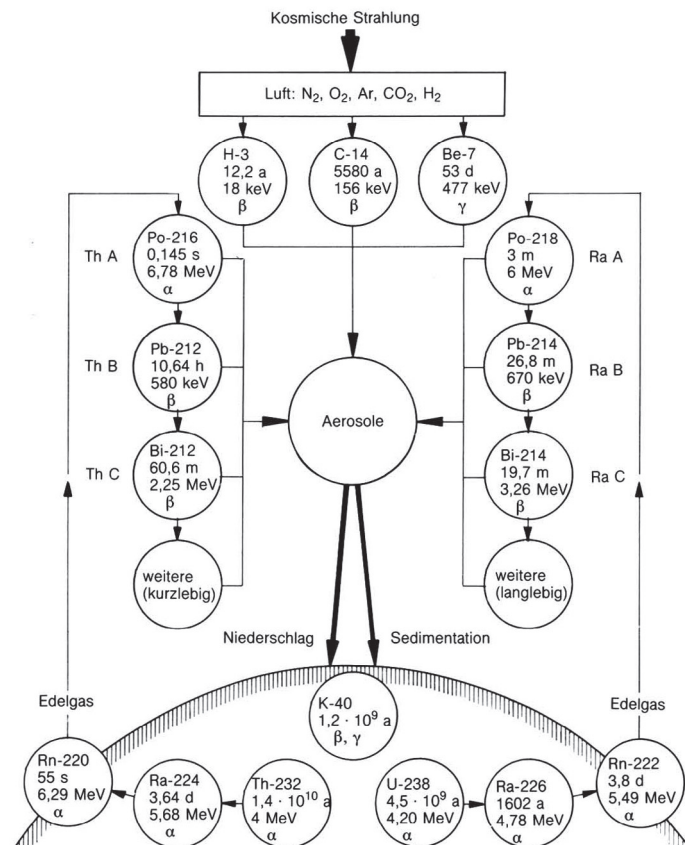
**On Our Knowledge of  $[^{219}, ^{220}, ^{222} \text{Rn}]$  Radon in Living Spaces** *A substantial contribution to man's radiation intake is supplied by exposure of the avleolar and bronchial epithelium to alpha rays through the inhalation of radon isotopes.*

*Based on the omnipresence of the generator nuclide  $[^{238} \text{U}]$  uranium as well as  $[^{232} \text{Th}]$  thorium in building materials, exposure through inhalation is calculated and its magnitude is shown in relation to other amounts of radiation exposure from natural and man-made sources. The rate of air exchange in living spaces is of decisive importance to individual exposure.*

## 1 Zur Physikochemie von Radon-Isotopen

Die Inhalation von Radon-Isotopen leistet – wie im folgenden aufgezeigt werden soll – einen erheblichen zivilisatorischen Beitrag zur inneren Strahlenbelastung des Menschen. Isotope des Radon wurden im Zusammenhang mit der Entdeckungsgeschichte der Radioaktivität 1900 zum ersten Mal beschrieben [1]. Die drei Radonisotope  $[^{219}, ^{220}, ^{222} \text{Rn}]$  sind Glieder der natürlichen Zerfallsreihen mit den Startnukliden  $[^{235} \text{U}]$  Uran,  $[^{232} \text{Th}]$  Thorium, und  $[^{238} \text{U}]$  Uran, entsprechend den  $(4n + 1)$ -,  $(4n)$ -,  $(4n + 2)$ -Zerfallsreihen.

Aufgrund ihrer stark differierenden Halbwertszeiten,  $[^{219} \text{Rn}]$  Radon: 3,96 s,  $[^{220} \text{Rn}]$  Radon: 55,6 s,  $[^{222} \text{Rn}]$  Radon: 3,825 d und der Tatsache, daß das natürliche Isotopenverhältnis  $[^{235} \text{U}]/[^{238} \text{U}] \approx 0,007$  beträgt, spielt für Betrachtungen des praktischen Strahlenschutzes  $[^{219} \text{Rn}]$  Radon nur eine untergeordnete Rolle. Aufgrund der Omnipräsenz (Abb. 1) der langlebigen »Radongeneratoren«  $[^{238} \text{U}]$  Uran (5  $\mu\text{g/g}$  Boden [2]) und  $[^{232} \text{Th}]$  Thorium (10  $\mu\text{g/g}$  Boden [2]) und entsprechend den der Erde entnommenen Baumaterialien gelangt Radon in die Raumluft.



Da es sich bei Radonisotopen um reaktionsträge Edelgase handelt und damit ihre Löslichkeit im Körpergewebe gering ist, erfolgt eine Anreicherung im menschlichen Organismus. Bei ihrem sukzessiven  $\alpha$ -Zerfall entstehen die relativ kurzlebigen Radioelemente Polonium, Blei und Bismut, die infolge ihrer Schwermetalleigenschaften und ihres Ladungszustandes [3, 4] sich rasch an ein Aerosolpartikel anlagern und so bei der Inhalation in der Lunge abgelagert werden können. Wegen ihrer kurzen Halbwertszeiten zerfallen diese Nuklide bereits dort und verursachen als  $\alpha$ -Strahler somit eine hohe Organdosis [3]. Zur Quantifizierung muß hier neben dem bereits verwendeten Begriff der Halbwertszeit, jener Zeitspanne, die verstreichen muß, bis die Hälfte eines vorliegenden Kollektivs radioaktiver Atome zerfallen ist, der Begriff der Aktivität eingeführt werden.

Liegt ein Radionuklid in einer Menge vor, so daß im zeitlichen Mittel gerade mit *einem* Zerfallsakt pro Sekunde (z. B. Aussendung eines  $\alpha$ -Teilchens) gerechnet werden kann, beträgt seine Aktivität 1 Becquerel (1 Bq = 1 s<sup>-1</sup>). Die typische Aktivitätskonzentration bundesdeutscher Wohnräume in Bezug auf Radon beträgt 40 Bq/m<sup>3</sup> [5].

## 2 Vorkommen

In der ersten Hälfte der 80er Jahre wurden an insgesamt 244 Wetterhäuschen der Klimastationen des deutschen Wetterdienstes Radonmessungen der Freiluft durchgeführt, die Mittelwerte für die einzelnen Bundesländer sind in Tabelle 1 aufgeschlüsselt.

Bundesland	Anzahl	Radonkonzentration Bq/m <sup>3</sup>
Schleswig-Holstein	19	8
Hamburg	–	–
Niedersachsen	11	11
Bremen	2	12
Nordrhein-Westfalen	9	16
Hessen	44	17
Rheinland-Pfalz	8	15
Baden-Württemberg	129	23
Bayern	18	20
Saarland	2	15
Berlin	2	16

Tab. 1: Mittlere Radonkonzentration im Freien.

Table 1: Medium atmospheric radon concentration.

1 Entstehung, Zerfall und Ausbreitung natürlicher Radionuklide.

1 Generation, decay and spreading of natural radionuclides.

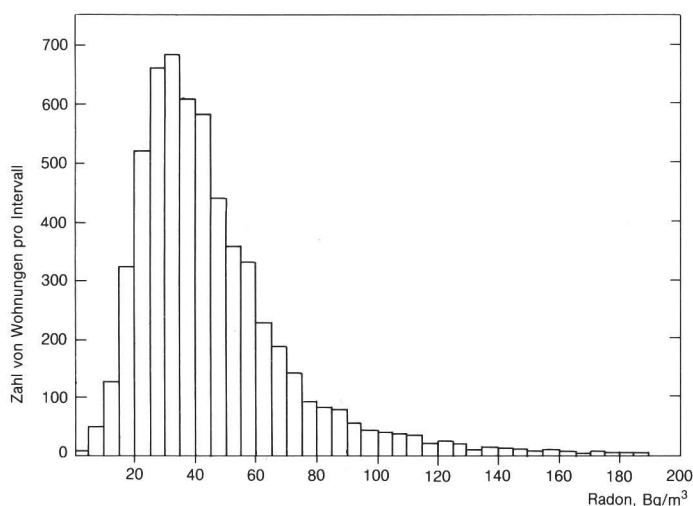
Es zeichnet sich ein Nord-Süd-Gradient ab, der zum einen auf die Tatsache zurückzuführen ist, daß in Küstengebieten ein Verdünnungseffekt durch radon-

Baustoffe	Probenanzahl	Kalium 40 (Bq/kg)	Radium 226 (Bq/kg)	Thorium 232 (Bq/kg)
<b>Natursteine:</b>				
Granit	32	1000 (600–4000)	100 (30–500)	80 (50–200)
andere Erstarrungsgesteine	21	<400 (<10–900)	<40 (<10–200)	<40 (<10–300)
Tuff, Bims	20	1000 (500–2000)	100 (<20–200)	100 (30–300)
Schiefer	8	900 (500–1000)	40 (30–70)	50 (40–70)
Kalkstein, Marmor	20	40 (<40–200)	<20 (<10–<30)	<20 (<4–<20)
Sandstein, Quarzit	18	500 (<40–1000)	<30 (<20–70)	<30 (<20–70)
Sonstige Natursteine	4	1000 (<40–2000)	<40 (20–50)	<50 (<20–80)
<b>Mauersteine usw.:</b>				
Ziegel, herkömmliche Art, ohne Zusätze	109	600 (100–3000)	60 (20–100)	70 (<20–200)
Rotschlammsteine*	23	300 (<40–1000)	300 (<20–2000)	200 (7–700)
Schamotte, zementgebundene Steine oder Betonsteine	9	400 (200–600)	60 (20–100)	80 (40–200)
Bims-Zuschlag	48	900 (500–2000)	80 (20–200)	90 (30–300)
Ziegelsplitt-Zuschlag	3	500 (400–600)	40 (30–70)	60 (30–100)
Blähton-Zuschlag	17	400 (40–700)	<30 (<20–80)	<30 (<20–60)
Schlacke-Zuschlag	9	500 (300–1000)	100 (20–700)	100 (20–200)
Holz-Zuschlag	5	70 (<40–200)	<20 (<7–40)	<10 (7–<20)
natürlicher Zuschlag	4	200 (70–400)	<20 (<20–30)	<30 (<20–30)
Kalksandsteine, Gasbeton	31	200 (40–800)	<20 (<7–80)	<20 (<7–60)
Asbestzement	7	70 (<40–300)	<20 (<20–40)	<20 (<20–40)
<b>Zuschläge und Zusätze:</b>				
natürlicher Sand und Kies	50	300 (<40–700)	<20 (<4–30)	<20 (<4–60)
Blähton und Blähschiefer	11	600 (70–800)	<40 (<20–70)	70 (30–90)
Hochofenschlacke	12	500 (200–1000)	100 (40–200)	100 (30–300)
Flugasche	28	700 (300–1000)	200 (80–400)	100 (60–300)
<b>Bindemittel:</b>				
Portlandzement	14	200 (100–700)	<30 (10–50)	20 (10–40)
Hüttenzement	3	100 (<40–200)	60 (20–100)	80 (30–200)
Tonerdeschmelzzement	2	<40	200 (100–200)	200 (100–200)
Kalk	8	200 (<40–600)	<30 (<7–60)	<20 (<7–50)
Naturgips	23	70 (<40–200)	<20 (<4–70)	<10 (<4–10)
Chemiegips				
(Apatit)	2	<40	60 (40–70)	<20
(Phosphorit)	33	<100 (<40–300)	600 (300–1000)	<20 (<4–100)
(Rauchgasentschwefelung)	7	<20	<10 (<8–70)	<10
sonstige Bindemittel	1	70	<20	<20
Fertigmörtel, Fertigputz	9	300 (<40–500)	30 (<4–100)	<30 (<4–100)
Bitumen, Teer	4	100 (40–300)	<20	<20
<b>Rohstoffe:</b>				
Bauxit, Rotschlamm	14	400 (<10–1000)	<200 (<20–800)	400 (50–1000)
Ton und Lehm	11	1000 (300–2000)	<50 (10–90)	90 (30–200)

\* = keine Produktion, sondern Versuchsprogramm

Tab. 2: Aktivitätskonzentration natürlicher Radionuklide in Baustoffen.

Table 2: Activity of natural radionuclides in building materials.



2 Häufigkeitsverteilung der Radonkonzentration in Wohnungen der Bundesrepublik Deutschland.

2 Distribution of radon concentration in FRG flats.

arme Seeluft auftritt und zum anderen durch die unterschiedliche Bodenbeschaffenheit. Neben der geologisch determinierten Exhalationsrate von Radonisotopen spielen auch meteorologische Faktoren, wie Niederschläge, Luftdruck und Wind eine Rolle.

Als Radonquellen in Wohnhäusern kommen zum einen Baumaterialien und zum anderen – je nach Bodenbeschaffenheit – der Untergrund in Betracht. Tabelle 2 ist dem 1983 erschienenen Bericht »Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung« des BMI entnommen und zeigt neben dem Anteil an natürlichem [<sup>40</sup>K] Kalium die Aktivitätskonzentration von [<sup>226</sup>Ra] Radium, dem Verläufer von [<sup>222</sup>Rn] Radon (in der mit [<sup>238</sup>U] Uran beginnenden (4n + 2)-Zerfallsreihe) und [<sup>232</sup>Th] Thorium in Baustoffen [6].

Für die aktuelle Konzentration von [<sup>220, 222</sup>Rn] Radon, welche starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen sein kann, spielen Lüftungsgewohnheiten in Wohnräumen eine dominierende Rolle. Mit sinkender Luftaustauschrate baut sich eine zunehmende Radonkonzentration und damit einhergehend eine steigende inhalatorische Belastung auf.

Nicht nur der Gehalt an Radon-Generator-Nukliden in Baustoffen ist für die Aktivitätskonzentration in der Atemluft entscheidend, sondern das entstandene Edelgas muß auch die Möglichkeit haben, durch Poren, Risse und Durchführungen (z. B. im Fundament) in die Luft der Innenräume zu gelangen. Naturgesetzlich ergibt sich dabei, daß das wesentlich kurzlebige [<sup>220</sup>Rn] Radon gegenüber [<sup>222</sup>Rn] Radon bei der Diffusion aus Baumaterialien im Nachteil ist.

Die Häufigkeitsverteilung der Radonkonzentrationen in Wohnräumen (Abb. 2 [6]) der Bundesrepublik Deutschland läßt sich mit einer logarithmischen Normalverteilung annähern, der Medianwert beträgt 40 Bq/m<sup>3</sup>. Etwa ein Prozent der vermessenen Wohnungen weisen eine Aktivitätskonzentration von  $\geq 220$  Bq/m<sup>3</sup> auf. Die internationale Strahlenschutzkommission ICRP empfahl 1984 als tolerierbare Grenze für Radonkonzentrationen in Altbauten 200 Bq/m<sup>3</sup>, sowie 100 Bq/m<sup>3</sup> für Neubauten [16]. Im Mittel höhere Werte wurden bei Fachwerkhäusern, speziell bei den Baustoffkombinationen Lehm/Holz und Naturstein aufgefunden. Die Bauweise dieser überwiegend vor 1900 entstandenen

Häuser (Natursteinkeller, Natursteinböden) begünstigt den Radonübertritt vom Erdreich in die Raumluft. Die höchsten Radonkonzentrationen innerhalb eines Hauses wurden – unabhängig von der Bauweise – im Keller aufgefunden. In systematischen Belüftungsexperimenten konnte gezeigt werden, daß die Raumaktivität bei behindertem Luftaustausch stark zunimmt [7].

**3 Strahlenbelastung**

**3.1 Konzepte der Dosimetrie**

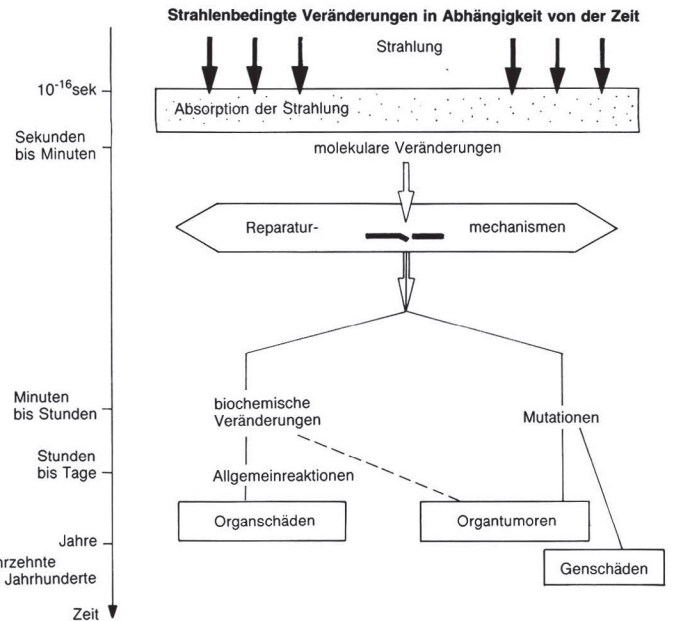
Seit dem Einsatz ionisierender Strahlen (Röntgen-, Kern-Strahlung) ist der Versuch unternommen worden, eine Quantifizierung ihrer Wirkung vorzunehmen (vgl. z. B. [8]). Ausgangspunkt ist dabei immer die physikalische Ebene des Geschehens im Absorber. Kernstrahlung, ob sie nun in Form von Korpuskeln ( $\alpha$ -,  $\beta$ -Teilchen) oder elektromagnetischer Strahlung ( $\gamma$ -Quanten) auftritt, ist in der Regel mit sehr hohen Energien (einige MeV<sup>1</sup>) behaftet und vermag somit bei ihrer Wechselwirkung mit Materie eine *Vielzahl* von Atomen zu ionisieren, bzw. chemische Bindungen zu lösen, ein Ereignis, wozu typischerweise nur einige 10 eV benötigt werden.

An den trägeheitslosen Absorptionsprozeß schließen sich z. B. im komplexen System einer Zelle im Organismus (mit Zeitkonstanten im Sekunden-Minuten-Bereich) molekulare Veränderungen an [9]. Werden diese in ihrer Zahl nicht von den Reparaturmechanismen, die das seit dem Beginn der Evolution der kosmischen Strahlung ausgesetzte Leben entwickelt hat, aufgefangen, kommt es schließlich zu biochemischen und biologischen Manifestationen, was zu somatischen und genetischen Strahlungsschäden führen kann (Abb. 3 aus [9]).

Die beobachtete Strahlenwirkung auf der komplexen Ebene zellulärer Vorgänge ist dann durch eine Reihe unterschiedlicher Faktoren beeinflusst, wobei jedoch die Parameter Strahlenart, -energie sowie die Höhe der wirksam gewordenen Dosis eine Hauptrolle spielen (vgl. Abb. 4 aus [10]). Für die Festlegung der biologisch relevanten Dosis

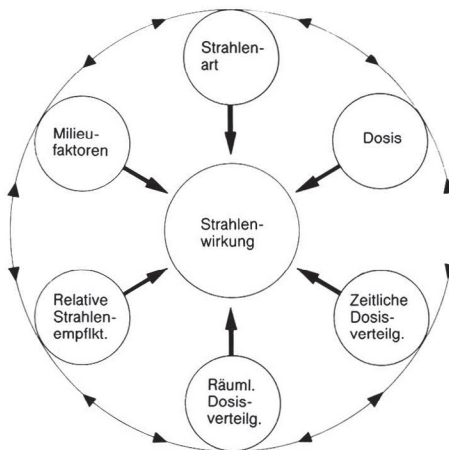
3 Ebenen der Strahlenwirkung.

3 Levels of radiation effects.

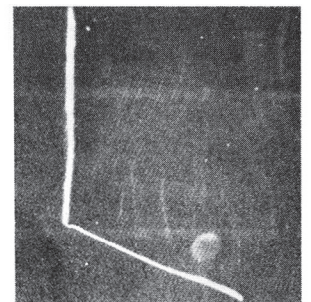


4 Einflußgrößen der Strahleneinwirkung auf zellulärer Ebene.

4 Parameters which influence effects of radiation on cellular level.



5 Nebelkammer – Spuren des sukzessiven zweifachen Alphazerfalls vom <sup>220</sup>Rn Radon.



5  $\alpha$ -tracks of <sup>220</sup>Rn decay in cloud-chamber.

(Äquivalentdosis) ist jedoch nicht allein die Höhe der im Absorber (z. B. Körperzelle) durch Strahlung deponierten Energie entscheidend, sondern die Tatsache, ob es sich um eine locker ( $\beta$ ,  $\gamma$ ) oder dicht ( $\alpha$ ) ionisierende<sup>2</sup> Strahlenart handelt.

Abbildung 5 belegt dies anhand einer Nebelkammeraufnahme des Zerfalls von injiziertem <sup>220</sup>Rn Radon. Dieses Isotop zerfällt unter Aussendung eines  $\alpha$ -Partikels ( $\approx 6,3$  MeV) in <sup>216</sup>Po Polonium mit einer Halbwertszeit von 55,6 s, welches sich seinerseits mit einer Halbwertszeit von 0,15 s unter  $\alpha$ -Emission ( $\approx 6,8$  MeV) in <sup>212</sup>Pb Blei umwandelt. Die Bahnspuren in der Nebelkammer, welche nur wenige cm lang sind, zeigen einen V-förmigen Verlauf, welcher auf diesen sukzessiven Zerfall unter Emission zweier  $\alpha$ -Teilchen hinweist. Außerdem zeigt sich die hohe Ionisationsdichte im Absorber Luft (einige 10000 Ionenpaare/cm Luftweg) [11].

Um der hohen biologischen Wirksamkeit, und damit der hohen Ionisationsdichte der  $\alpha$ -Strahlung gerecht zu werden, wird die absorbierte Energiedosis<sup>3</sup> mit dem dimensionslosen Bewertungsfaktor 20 multipliziert.

Es resultiert die sogenannte *Äquivalentdosis*<sup>4</sup>, welche besonders geeignet ist die Inkorporation  $\alpha$ -strahlender Nuklide (z. B. *Radon-Folgeprodukte*) zu beschreiben. Ihre SI-Einheit ist 1 Sievert (Sv) = 1 J/kg. Häufig wird jedoch noch von der – inzwischen veralteten – Einheit rem (*roentgen equivalent man*) Gebrauch gemacht, wobei für die Umrechnung gilt 1 rem = 1 cSv.

**3.2 Belastung durch <sup>220, 222</sup>Rn Radon**

Es stellt sich nun die Frage, mit welcher Organ-Äquivalentdosis für die Lunge zu rechnen ist, wenn man annimmt, daß in Wohnräumen ungehemmte (z. B. durch Farblacke, bzw. Kunststofftapeten [12]) Radonexhalation erfolgt. Wie oben er-

1 1 eV = 1,602 × 10<sup>-19</sup>J

2 d. h. wenige bzw. viele Ionisationsakte pro Wegelement im Absorber

3 1 Joule/kg = 1 Gray (Gy)

4 1 Joule/kg = 1 Sievert (Sv)

wähnt, ist von einem Medianwert von 40 Bq/m<sup>3</sup> auszugehen. Den entsprechenden Berechnungen, auf die nicht im einzelnen eingegangen werden kann [3], liegt zugrunde, daß wir uns etwa 80% unserer Zeit in Häusern aufhalten. Man erhält eine mittlere Lungendosis von  $\approx 8$  mSv/a (800 mrem/a). Damit ist die Lunge mit Abstand dasjenige Organ des menschlichen Körpers, das der höchsten Strahlenexposition ausgesetzt ist.

Das Radon-Problem unserer zivilisationsbedingten Lebensweise (Aufenthalt in Häusern, geringe Lüftungsrate, Energie sparen!) ist im Hochdosisbereich durch epidemiologische Untersuchungen bei Berg- bzw. Uranbergarbeitern studiert worden, wobei eine Zunahme der Lungenkarzinomrate beobachtet wurde [13]. Will man nun den Organ-Dosiswert in Bezug zur gesamten (natürlichen und zivilisatorischen) Strahlenbelastung des Menschen setzen, so ist auf der Basis des Konzepts der effektiven Äquivalentdosis vorzugehen [8].

Die einzelnen Organdosen werden mit dem Bewertungsfaktor  $w_T$  (siehe Tabelle 3) multipliziert, der die Strahlenempfindlichkeit der *einzelnen* Organe in Bezug auf ihre karzinogene Wirkung (bzw. – bei den Gonaden – genetische Wirksamkeit) erfaßt und aufsummiert. Im Falle der Lungenbelastung durch Radon (Lungen- und Bronchialepithel) tragen also  $\approx 1$  mSv (100 mrem) im Mittel zur sogenannten effektiven Äquivalentdosis bei (vgl. Abb. 6 [3]). Ein nennenswerter Anteil der Strahlenbelastung des Menschen geht somit auf den Aufenthalt in Häusern zurück und ist durch die Lebensgewohnheiten bestimmt.

6 Strahlenexposition des Menschen auf Basis des Konzepts der effektiven Äquivalentdosis.

6 Human radiation exposure.

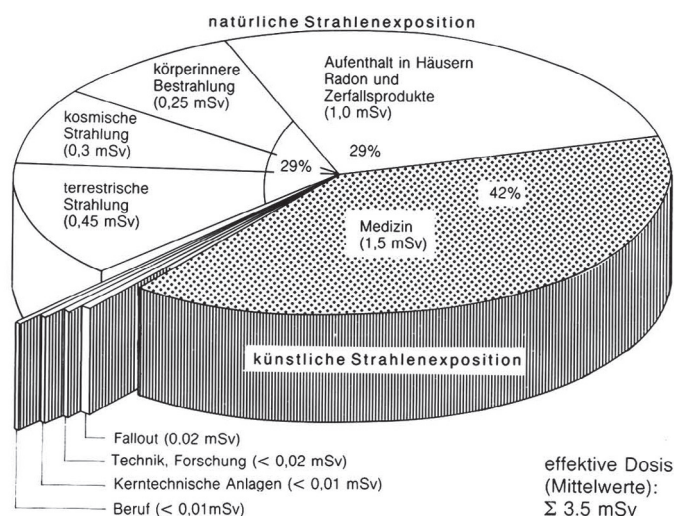
Tab. 3: Wirkungsfaktoren  $w_T$  zur Ermittlung der effektiven Äquivalentdosis (ICRP-26).

Table 3: Balancing factors for determination of effective exposure.

	$w_T$
Keimdrüsen	0,25
Brustdrüse	0,15
rotes Knochenmark	0,12
Lunge	0,12
Schilddrüse	0,03
Knochen (Endost)	0,03
übrige Organe	0,30
	1,00

Aus aktuellem Anlaß ist anzumerken, daß die in Abb. 6 dargestellte jährliche effektive Äquivalentdosis im ersten Folgejahr der Havarie in der Ukraine, d. h. also von Mai 86 bis April 87 um  $\approx 1,2$  mSv (120 mrem)<sup>5</sup> erhöht ist. Nach dem Abklingen der kurzlebigen Iod-Isotope, die aus Tschernobyl auf dem Luftweg eingetragen wurden, schlägt diese Belastung im zweiten und in den folgenden Jahren mit deutlich kleineren

5 rein rechnerischer Maximalwert bei konservativer Abschätzung.



Werten zu Buche [14], man rechnet mit einer 50-Jahresfolgedosis von  $\approx 5$  mSv<sup>4</sup>. Eine weitere Quelle der inhalatorischen Lungenexposition durch Radionuklide stellt im übrigen Zigarettenrauch dar. Die Tabakpflanze reichert aufgrund der Omnipräsenz von Uran Glieder der entsprechenden (4n + 2)-Zerfallsreihe (<sup>226</sup>Ra) Radium und damit [<sup>210</sup>Pb] Blei, [<sup>210</sup>Po] Polonium) an, welche durch den Rauch in der Lunge wirksam werden. Bei mittlerem Zigarettenkonsum ist mit einer *zusätzlichen* Lungenbelastung in der Größenordnung des Radon-Problems in der Wohnraumluft zu rechnen [15].

Die Inhalation von Radon-Isotopen und die damit einhergehende erhöhte Strahlenbelastung stellt einen beachtenswerten Beitrag zur zivilisatorischen Belastung des Menschen dar und man sollte ausgewogene Maßnahmen zu ihrer Reduktion im Auge behalten.

## Literatur

- [1] Schwankner, R. J., Radiochemie-Praktikum, UTB 1068, Schöningh, Paderborn-München-Wien-Zürich, 1980
- [2] Veil, R., Th. Franke, F. Schales, Vorkommen natürlicher Radionuklide im Boden in: Die natürliche Strahlenexposition des Menschen, Hrsg. K. Aurand et. al., Thieme, Stuttgart, 1974
- [3] Jacobi, W., H. G. Paretzke, U. H. Ehling, Strahlenexposition und Strahlenrisiko der Bevölkerung, GSF S-710, Neuherberg, 1981
- [4] Schwankner, R. J., M. Eiswirth, F. Weigel, V. Wishnevsky: Electrostatic Radionuclide Separation, J. chem. educ. **59**, 608–611 (1982)
- [5] Urban, M., H. Kiefer, Strahlenbelastung durch Radon in Wohnhäusern in: Strahlung und Radionuklide in der Umwelt, AGF, Bonn 1984, S. 13–15
- [6] Der Bundesminister des Inneren, Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 1983, Bonn 1983
- [7] Schwankner, R. J., bisher unveröffentlichte Resultate

- [8] Löster, W., Dosimetrie und Strahlenexposition in: Themenheft (Kern- und Radiochemie), Hrsg. Schwankner R. J., W. E. Glöckner, Praxis (Chemie) **34** (7/1986)
- [9] Lissner, J., Th. Vogl: Klinische Befunde zur Strahlenwirkung bei Unfällen und in der Strahlentherapie, GPA-Vortragsmanuskript, München (1984)
- [10] Feinendegen, L. E., A. Feldmann, E. Münch, M. Paschke, Strahlenschutz, Radioaktivität und Gesundheit, Hrsg. StMLU, München 1985
- [11] Schwankner, R. J., M. Eiswirth: Alpha-Zerfall in einer kontinuierlichen Nebelkammer – Zusammenhang zwischen Zerfallskonstanten und Energie MNU **39**, 139–145 (1986)
- [12] Martin, J., Freisetzung von Radon aus Baustoffen und Baugrund, Gesundheits-Ingenieur-Haustechnik-Bauphysik-Umwelttechnik **106**, 141–143 (1985)
- [13] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR): Sources and Effects of Ionizing Radiation, Vereinte Nationen, New York 1977

- [14] GSF, Umweltradioaktivität und Strahlenexposition in Südbayern durch den Tschernobyl-Unfall, Bericht des Instituts für Strahlenschutz der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, GSF 16/86, Neuherberg (1986)
- [15] Little, J. B., A. R. Kermedy, R. B. McGandy, Lung Cancer Induced in Hamsters by Low Doses of Alpha Radiation from Polonium-210, Science **188**, 737–739 (1975)
- [16] Annals of ICRP, Statement from the 1983 Washington Meeting of the ICRP, CRP Publication 39, Principles of Limiting Exposure of the Public to Natural Sources of Radiation 14/1, 1984

## Weiterführende Literatur

- Rausch, L., Mensch und Strahlenwirkung, Piper, München-Zürich 1982
- Laskowski, W., Biologische Strahlenschäden und ihre Reparatur, Strahlenschutz in Forschung und Praxis, Bd. XXV, Thieme, Stuttgart-New York 1985
- Lüscher, E. (Hrsg.): Kernenergie und Kerntechnik, Vieweg, Braunschweig 1982