

## Radon-Messungen in Innenräumen

### INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Grundlagen und Problemstellung	2
1.1. Geschichte	2
1.2. Radon-222	3
2. Wirkung der Radon-Radioaktivität auf den Menschen	4
3. Strahlenbelastung in den Häusern	5
3.1. Ausbreitung der Radon-Radioaktivität in Häusern	5
4. Meßprinzip des passiven Radondetektors	6
4.1. Adsorption von Radon	7
4.2. Desorption von Radon	8
4.3. Berechnung der spezifischen Radon-Aktivität	9
5. Zusammenhang von Radon-Aktivität und Äquivalenzdosis	10
5.1. Empfehlungen und Grenzwerte	10
5.2. Sanierungen	11
6. Auszug aus der Radonstatistik der Arbeitsgruppe Radiochemie	12
7. Literaturhinweise	13

## 1. Grundlagen und Problemstellung

Die Radioaktivität in Schweizer Häusern übersteigt häufig die nach der schweizerischen Strahlenschutzverordnung maximal zulässige Strahlenbelastung für zivile Einzelpersonen von 5 mSv pro Jahr. Die mittlere jährliche Strahlenexposition in der Schweiz beträgt 5 mSv und setzt sich zusammen aus (Fig. 1):

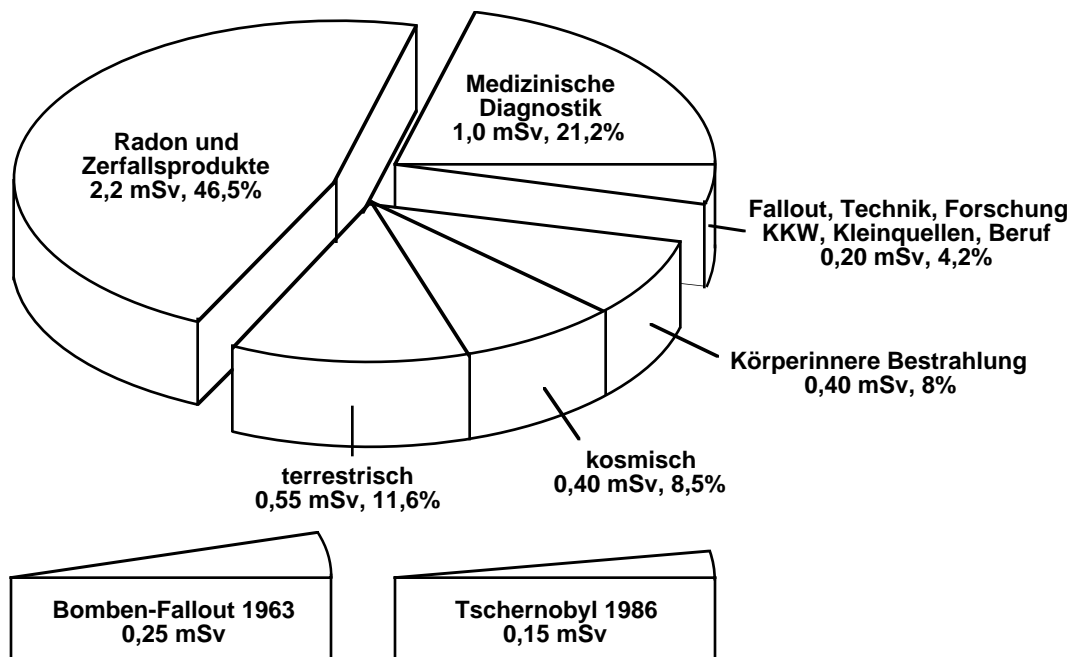


Fig. 1: Mittlere jährliche Strahlenexposition der Bevölkerung in der Schweiz

- 28,1 % natürlicher Radioaktivität (11,6 % terrestrische, 8,5 % kosmische und 8,0 % körperinnere Bestrahlung)
- 25,4 % künstlicher Radioaktivität (21,2 % Medizin sowie 4,2 % übrige Strahlung wie Bomben-Fallout, KKW, Technik und Forschung)
- 46,5 % zivilisatorisch verstärkter Radioaktivität (Radioaktivität in den Häusern durch Radon und Folgeprodukte)

Die Strahlenexposition ist natürlich individuell sehr verschieden. Je nach Ort und Bauart der Häuser kann die zivilisatorisch verstärkte Radioaktivität zwischen 0,2 und 150 mSv/a betragen. Auch die medizinische Strahlenbelastung variiert je nach Behandlung eines Patienten zwischen 0 und 80 mSv/a.

### 1.1. Geschichte

Anfangs dieses Jahrhunderts wurde Radon als eines der Folgeprodukte des  $\alpha$ -Zerfalls von Radium entdeckt. In den 50-er Jahren wurde eine Erhöhung der



Die instabilen Nuklide zerfallen unter  $\alpha$ - und  $\beta$ -Emission über mehrere Zwischenprodukte bis zu den stabilen Blei-Isotopen  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  und  $^{208}\text{Pb}$ .

In jeder der drei Zerfallsreihen kommt ein Radon-Isotop vor ( $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{219}\text{Rn}$  und  $^{222}\text{Rn}$ ). Aber nur  $^{222}\text{Rn}$ , ein Zerfallsprodukt aus der  $^{238}\text{U}$ -Reihe, hat mit 3,8 Tagen eine genügend lange Halbwertszeit, um es dem Gas zu erlauben, aus Gestein und Boden ins Grundwasser oder in die Luft zu wandern. Daher rührt die Radioaktivität in den Häusern vor allem von  $^{222}\text{Rn}$  und seinen Folgeprodukten her [1].

## 2. Wirkung der Radon-Radioaktivität auf den Menschen

Das mit Abstand am meisten gefährdete Organ ist die Lunge mit ihrer großen Oberfläche. Das Radon wird von den Hausbewohnern als Gas eingeatmet, der größte Teil davon wieder ausgeatmet. Ein kleiner Teil des Radons geht ins Blut, wo es zerfällt. Die Radontöchter  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  und  $^{214}\text{Po}$  haben Halbwertszeiten von 30 min und weniger. Somit zerfallen sie, bevor sie aus der Lunge hinausgeschafft werden können. Die zwei Polonium-Nuklide zerfallen unter  $\alpha$ -Emission.

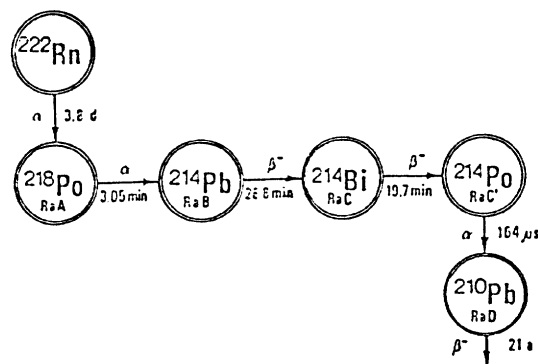


Fig. 3: Die Zerfallsreihe von  $^{222}\text{Rn}$

Die  $\alpha$ -Teilchen haben im weichen Gewebe eine Reichweite von nur 50  $\mu\text{m}$ . Durch ihre Ladung und Energie produzieren sie lokal eine sehr hohe Ionisationsdichte (Fig. 4b), sodaß es leicht zu Doppelstrangbrüchen der DNS-Doppelhelix kommt. Im Gegensatz zu Einfachstrangbrüchen bei der Ionisation von  $\beta$ -Teilchen (Fig. 4a), die durch den körpereigenen Reparaturmechanismus behoben werden können, führen Doppelstrangbrüche entweder zum Absterben der Zelle, oder die teilungsfähigen Lungenzellen werden genetisch so geschädigt, daß sie Lungenkrebs verursachen können.

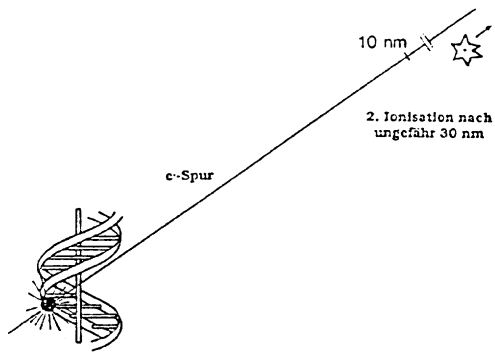


Fig. 4a: Dimension der DNS-Doppelhelix im Vergleich mit der Ionisationsdichte eines Elektrons der Energie 15 keV. Der mittlere Abstand zwischen zwei Ionisationen beträgt ein Mehrfaches des DNS-Durchmessers.

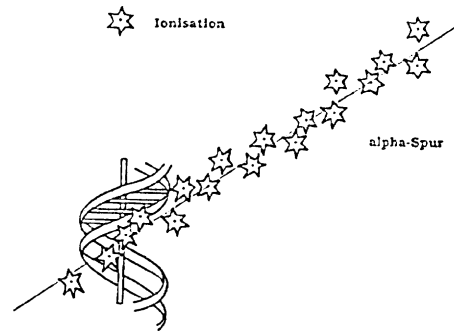


Fig. 4b: Dimension der DNS-Doppelhelix im Vergleich mit der Ionisationsdichte eines Alphateilchens.

Die Radon-Töchter lagern sich zudem in der Luft vorzugsweise an Aerosole an, die dann ebenfalls in der Lunge abgelagert werden können. Darum sind Raucher durch Radon am stärksten gefährdet. Ein Teil der Lungenkrebsfälle von Rauchern ist wahrscheinlich radioaktiv induziert.

### 3. Strahlenbelastung in den Häusern

In Schweizer Häusern werden  $190 \text{ Bq/m}^3$  häufig überschritten [2]. Diese Aktivität entspricht etwa einer effektiven Äquivalenzdosis von  $5 \text{ mSv/a}$  (vgl. Gl. (4)), der nach der schweizerischen Strahlenschutzverordnung maximal zulässigen Strahlenbelastung für Einzelpersonen. In Häusern des schweizerischen Mittellandes ist die durchschnittliche Radioaktivität in Wohnräumen etwa  $66 \text{ Bq/m}^3$ .

#### 3.1. Ausbreitung der Radon-Radioaktivität in Häusern

Die Hauptquelle von  $^{222}\text{Rn}$  ist der Boden. Aus den obersten Metern Boden exhaliert etwa 10 % des Radons. Andere Quellen sind Baumaterial, Wasserversorgung (Quellwasser) und Erdgas. In den neuen Wohnbauten führt eine verbesserte Isolation zu einer Erhöhung der Radonkonzentration und anderen Innenluft-Schadstoffen (Fig. 5).

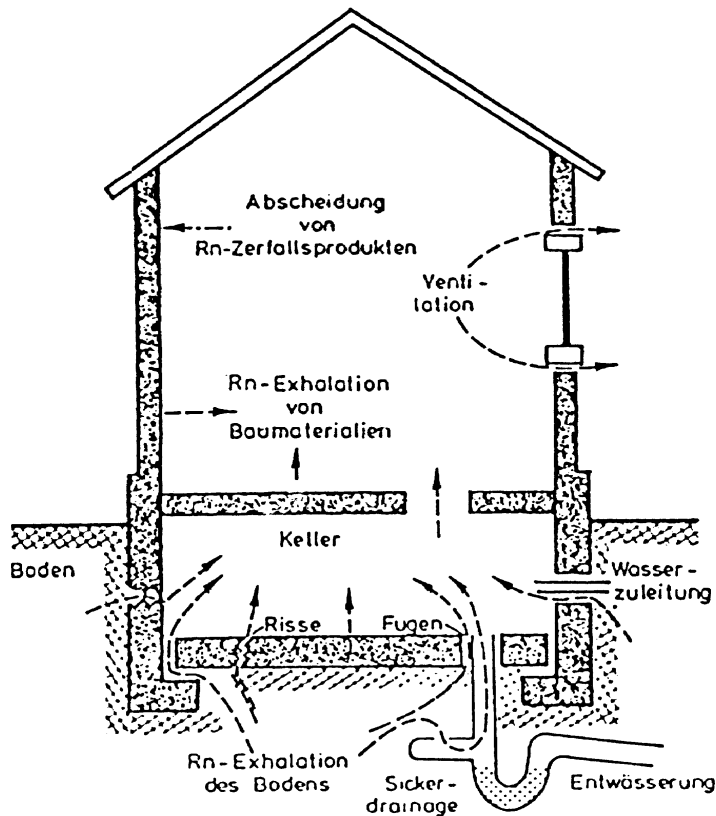


Fig. 5: Quellen und Verteilung von  $^{222}\text{Rn}$  in Häusern

#### 4. Meßprinzip des passiven Radondetektors

Die Konzentration von Radon in Luft ist ausserordentlich klein. Daher ist ein Anreicherungsprozess unumgänglich. Das ist bei Edelgasen schwierig, da sie chemisch inert sind. Eine Möglichkeit besteht im Adsorbieren des Radons an Aktivkohle mit anschließender Desorption und Detektion mittels Flüssigszintillation. Als Aktivkohle-Radonsammler werden die kommerziell erhältlichen Szintillations-Fläschchen, Typ PICO-RAD der Firma Canberra-Packard verwendet [3]. Sie bestehen aus einem Polyethylen-Gehäuse, in dem sich eine kleine nach oben mit einem Gitter als Diffusionsbarriere verschlossenen Patrone mit ca. 1,2 g feingekörnter Aktivkohle und ca. 2 g Silicagel befindet (Fig. 6). Nachdem eine Exposition in der radonhaltigen Atmosphäre stattgefunden hat, werden 10 ml Szintillatorlösung (Insta-Fluor der Firma Canberra-Packard) zugesetzt. Ein Teil des Radons wird nun innerhalb von Stunden von der Aktivkohle desorbiert und wandert in den Szintillator-Cocktail. Mit einem Flüssigszintillations-Spektrometer (Modell TRI-CARB 2200CA, Firma Canberra-Packard) wird schließlich das Impulshöhen-Spektrum gemessen. Es entspricht dem  $\alpha$ -Spektrum des Radons und seiner Töchter und zeigt

die Linien der Nuklide  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$  und  $^{214}\text{Po}$ . Durch Wahl des Meßfensters werden die integrale Zählrate dieser drei Radionuklide für die quantitative Auswertung benutzt. Der Nulleffekt wird durch eine Blindprobe erfasst. Die Meßzeit pro Probe beträgt 30 Minuten.

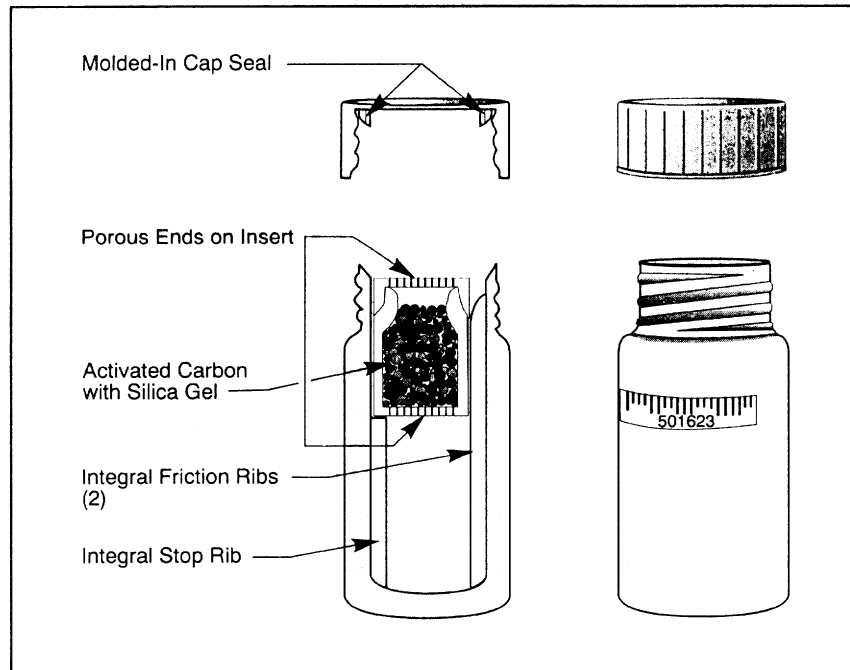


Fig. 6: Schematische Darstellung des PICO-RAD-Detektors

Der zeitliche Ablauf des Versuchs ist in Fig. 7 dargestellt.

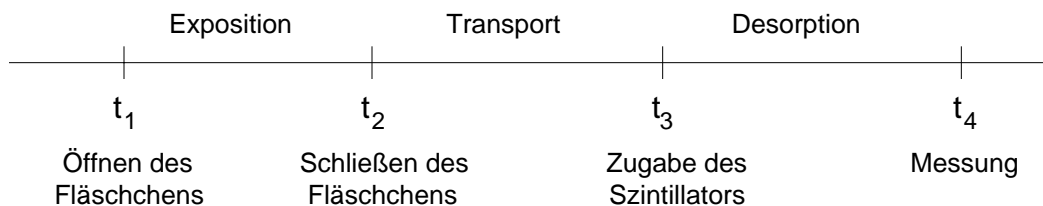


Fig. 7: Zeitlicher Ablauf der Radon-Messung

#### 4.1. Adsorption von Radon

Der Radondetektor wird in einem vom Praktikanten ausgesuchten Raum aufgestellt. Dabei ist zu beachten, daß das Fläschchen möglichst in den Schwerpunkt des Luftvolumens zu stehen kommt. Nur dann kann eine relevante Aussage über die Radon-Aktivität für den Menschen in diesem Raum gemacht werden. Es können auch andere Expositionsorte ausgesucht werden, falls damit eine spezielle Frage

beantwortet werden soll. Mit dem Öffnen des Deckels beginnt die Messung. Der Zeitpunkt ( $t_1$  in Fig. 7) ist im beigefügten Datenblatt einzutragen. Das Radon aus der Luft wird über Konvektion und Diffusion zur Aktivkohle des Detektors transportiert. Nach einigen Tagen hat sich ein Gleichgewicht eingestellt. Die Adsorption von Radon wird durch die Desorption und den Zerfall des Radons kompensiert, wobei der Desorptionsprozess deutlich überwiegt. Nach 48 Stunden ist ein Sättigungsgrad von etwa 95 % erreicht (Fig. 8). Eine längere Expositionszeit hat wenig Sinn.

**Adsorbierter Radon-Anteil  
(% des Maximums)**

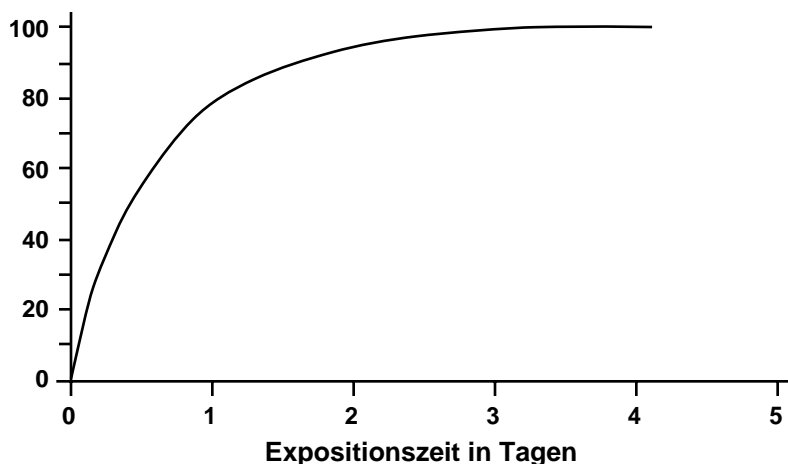


Fig. 8: Adsorption von  $^{222}\text{Rn}$  in PICO-RAD Detektoren

Die Exposition endet mit dem Verschließen des Fläschchens. Der Zeitpunkt ( $t_2$  in Fig. 7) ist wiederum im beigefügten Datenblatt einzutragen.

#### 4.2. Desorption von Radon

Die Versuchsplanung sollte so erfolgen, daß zwischen Ende der Exposition und Zugabe des Szintillators ( $t_2$  und  $t_3$  in Fig. 7) nicht mehr als 36 Stunden liegen, da die Halbwertszeit von  $^{222}\text{Rn}$  3,824 Tage beträgt. Bis spätestens 10.00 Uhr sollte der Radondetektor in der Radiochemie abgegeben werden. Der Radondetektor wird anschließend mit 10 ml Szintillator-Cocktail versetzt und verschlossen. Nicht schütteln! Der Szintillator befindet sich unterhalb der Aktivkohle-Patrone. Die Desorption des  $^{222}\text{Rn}$  erfolgt innert Stunden. Das Gleichgewicht der Zerfallsprodukte ist nach drei Stunden eingestellt. Nach dieser Zeit sind mehr als 80 % des Radons in den Szintillator gewandert. Die Zählrate erreicht ihren maximalen Wert nach ca. acht Stunden (Fig. 9).



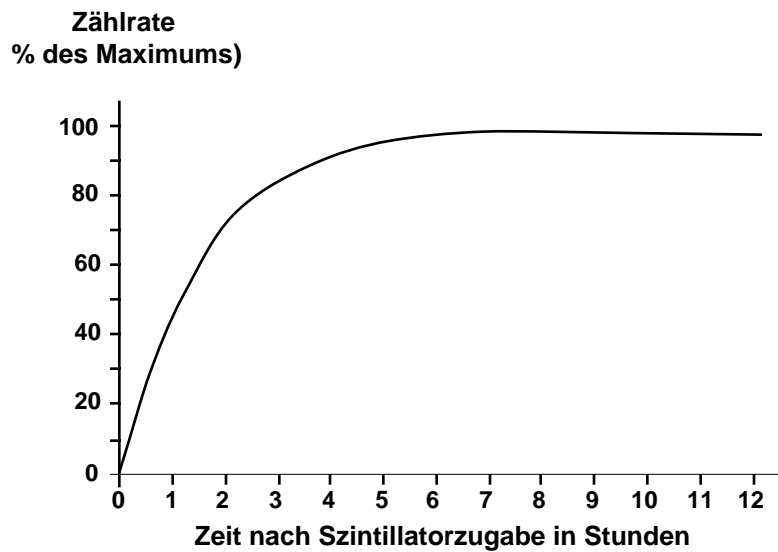


Fig. 9: Desorption von  $^{222}\text{Rn}$  in PICO-RAD Detektoren

### 4.3. Berechnung der spezifischen Radon-Aktivität

Die Zählrate ist von vielen Einflußparametern abhängig. Die wichtigsten lassen sich in der folgenden Gleichung erfassen [4]:

$$A_V(\text{Rn} - 222) = \frac{I_{\text{Kanal A}} \cdot K}{g(t_2 - t_1) \cdot f(t_4 - t_3) \cdot e^{-\lambda(t_3 - t_2)}} \quad (1)$$

wobei:

$A_V(\text{Rn}-222)$  = spezifische Radon-Aktivität (bezogen auf Volumen)

$I_{\text{Kanal A}}$  = Zählrate im Kanal A abzüglich Nulleffekt

$K$  = Kalibrierfaktor =  $67,644 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$

$\lambda$  = Zerfallskonstante des Radons =  $2,098 \cdot 10^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$

$t_1 \dots t_4$  siehe Fig. 7

Die Funktion  $g(\Delta t)$  beschreibt das Adsorptionsverhalten des Radons an der Aktivkohle:

$$g(\Delta t) = 1 - 0,955566 \cdot e^{-\alpha \cdot \Delta t} \quad (2)$$

$$\alpha = 2,4341 \cdot 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$$

Die Funktion  $f(\Delta t)$  berücksichtigt die Desorption des Radons von der Aktivkohle in den Szintillator-Cocktail:

$$f(\Delta t) = 1,1824 \cdot e^{-\lambda \cdot \Delta t} - 1,1156 \cdot e^{-\beta \cdot \Delta t} \quad (3)$$

$$\beta = 9,5347 \cdot 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$$

## 5. Zusammenhang von Radon-Aktivität und Äquivalenzdosis

Von der gemessenen Radon-Aktivität im Hausinnern kann wie folgt auf die effektive Dosis (E) geschlossen werden [2]:

$$E = A_V(\text{Rn-222}) \cdot F \cdot t \cdot DF_{\text{Rn-222}} \quad (4)$$

Dabei ist F ein dimensionsloser Gleichgewichtsfaktor zwischen den Radon-Folgeprodukten und dem Radon. Er wird mit 0,4 abgeschätzt.

t ist die Aufenthaltszeit im Hausinnern

$DF_{\text{Rn-222}}$  ist der Dosisfaktor für den Wohnbereich mit  $10^{-8} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^3$ , gemäß ICRP-50 [5].

Aus dem bezüglich Haustyp, Bevölkerungsverteilung und Sommer-Winter-Unterschied gewichteten, arithmetischen Mittel der spezifischen Radon-Aktivität in Schweizer Wohnhäusern von  $A_V(\text{Rn-222}) = 66 \text{ Bq/m}^3$  ergibt sich eine effektive Dosis von 1,7 mSv/a, wenn man eine Aufenthaltszeit im Haus von 75% annimmt. Wird zusätzlich dem Radon im Freien sowie den Thorium-Folgeprodukten mit je 10% Rechnung getragen, erhöht sich der Wert auf rund 2,1 mSv/a.

Die Radonexposition in der häufig verwendeten Einheit WLM (Working-Level-Month) erhält man mit  $DF_{\text{Rn-222}} = 1,59 \cdot 10^{-6} \text{ WLM} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^3$ .

### 5.1. Empfehlungen und Grenzwerte

Nach den neuesten Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) sollen die Grenzwerte für die Bevölkerung für Expositionen durch künstliche, kontrollierbare Strahlenquellen bei 1 mSv/a liegen. Für beruflich strahlenexponierte Personen wird ein Grenzwert von 20 mSv/a vorgeschlagen. Der Bereich über 20 mSv/a während längerer Zeit wird nach neuen Erkenntnissen (ICRP-60) als inakzeptabel betrachtet.

Da sich die Konzepte, die für eine kontrollierbare Exposition gelten, nicht direkt auf das natürlich bedingte Radon übertragen lassen, werden international für das Radon höhere Dosiswerte als 1 mSv/a akzeptiert. Die Limite könnte in kaum einem Land eingehalten werden. Die ICRP hat denn auch in der neusten Empfehlung das Radonproblem ausgeklammert. Der von der Europäischen Union empfohlene

Grenzwert für die Radonkonzentration in bestehenden Gebäuden von  $400 \text{ Bq/m}^3$  entspricht einer Dosis von  $10 \text{ mSv/a}$ . Schweden hat den seit dem Jahr 1980 gültigen Grenzwert von  $400 \text{ Bq/m}^3$  "gleichgewichtsäquivalente Radonkonzentration", entsprechend einer spezifischen Aktivität von  $1000 \text{ Bq/m}^3$  im Jahr 1990 um einen Faktor 2 reduziert. Der heute in Schweden gültige Grenzwert beträgt somit  $500 \text{ Bq/m}^3$ .

Eine Dosis von mehr als  $20 \text{ mSv/a}$  erscheint inakzeptabel. Es sollte deshalb niemand über längere Zeit einer spezifischen Radon-Aktivität von mehr als  $1000 \text{ Bq/m}^3$  ausgesetzt werden. Im Sinne einer Optimierung müßten jedoch vorsorgliche Massnahmen und einfache Sanierungen bereits bei wesentlich tieferen Radonpegeln einsetzen. Bei Neubauten müßte ein Grenzwert von weniger als  $200 \text{ Bq/m}^3$  angestrebt werden, was nach den Erfahrungen aus den USA und Schweden möglich ist [6].

Die Schweizer Strahlenschutzverordnung [7] legt für Wohn- und Aufenthaltsräume einen Grenzwert von  $1000 \text{ Bq/m}^3$  fest. Im Vergleich zu anderen Ländern ist dies relativ hoch. Es ist jedoch zu beachten, daß es sich um einen zwingenden Grenzwert handelt, oberhalb dessen interveniert werden muß. Bei Neu- und Umbauten sowie bei Sanierungen gilt ein Richtwert von  $400 \text{ Bq/m}^3$ , soweit die mit einfachen baulichen Maßnahmen erreicht werden kann.

## 5.2. Sanierungen

Erhöhte Radonpegel in Wohnräumen lassen sich grundsätzlich immer reduzieren, aber der Aufwand für eine Sanierungsmaßnahme hängt stark von der Höhe der Radonkonzentration und den baulichen Gegebenheiten ab. Ziel jeder Sanierung muß es sein, den Eintritt des Radons zu erschweren und den Unterdruck im Gebäude gegenüber dem Bauuntergrund zu reduzieren. Es konnten in der Schweiz anhand von konkreten Beispielen Erfahrungen für die Sanierung von Häusern gesammelt werden. Die kleine Zahl der bisher sanierten Häuser ist hauptsächlich auf das mangelnde Interesse der Hausbesitzer zurückzuführen. Die im Ausland erprobten Techniken lassen sich an Schweizer Verhältnisse anpassen. Die Besonderheit der schweizerischen Bauweise mit relativ viel Kellerraum erschwert jedoch die Maßnahmen und erhöht den Aufwand. Als wirksamste Methode hat sich die Zwangsbelüftung kombiniert mit der Abdichtung des Hauses gegenüber dem Bauuntergrund erwiesen. Die Methode der Unterbodenbelüftung ist ebenfalls gut und zuverlässig, wogegen Abdichten allein meistens ungenügend ist. Bedingt durch die klimatischen Bedingungen in der Schweiz sollte bei Belüftungsmaßnahmen auch auf Energierückgewinnung geachtet werden. Der finanzielle Aufwand für die

Sanierung eines Einfamilienhauses liegt im Bereich von 10'000 Fr. bis 20'000 Fr.; in besonders schwierigen Fällen können Kosten von bis zu 50'000 Fr. entstehen (Kostenstand 1991). Vorsorgliche Maßnahmen bei Neubauten wie beispielsweise eine Kieslage mit einem Belüftungssystem unter der Bodenplatte kommen wesentlich günstiger zu stehen als nachträgliche Sanierungen. Die Erfahrungen von RAPROS [6] haben gezeigt, daß beim Bau eines Einfamilienhauses mit einer zusätzlichen Investition von etwa 5'000 Fr. genügend gute Resultate erzielt werden können. In bekannten Risikogebieten sollten vorbeugende Maßnahmen vorgeschrieben werden. Nach der oben aufgeführten Hochrechnung würde eine Sanierung aller 10'000 Häuser mit Radon-Aktivitäten im Wohnbereich von mehr als 1000 Bq/m<sup>3</sup> auf etwa 100 bis 200 Millionen Franken, verteilt auf 5 bis 10 Jahre, zu stehen kommen [6].

## 6. Auszug aus der Radonstatistik der Arbeitsgruppe Radiochemie

PLZ	Analysenort	Kanton	Raumbezeichnung	Rn-222 [Bq/m <sup>3</sup> ]
2540	Grenchen	SO	Keller (Kies)	<b>5230</b>
4414	Füllinsdorf	BL	Keller (Kies)	<b>1366</b>
5036	Oberentfelden	AG	Keller1 (Beton) (1)	<b>1790</b>
5036	Oberentfelden	AG	Keller1 (Beton) (2)	<b>1673</b>
5036	Oberentfelden	AG	Keller2 (Beton)	161
5415	Nussbaumen	AG	Keller	706
5415	Nussbaumen	AG	Keller	71
6055	Alpnach	OW	Keller (2.)	<b>1406</b>
6055	Alpnach	OW	Keller (1.)	<b>1393</b>
6055	Alpnach	OW	Keller	207
6055	Alpnach	OW	Wohnraum (EG)	10
6055	Alpnach	OW	Wohnraum (1.OG)	7
6300	Zug	ZG	Keller (NB)	<b>1466</b>
6300	Zug	ZG	Keller (NB)	674
7180	Disentis	GR	Wohnraum (EG) (1.)	<b>1301</b>
7180	Disentis	GR	Wohnraum (EG) (2.)	896
7307	Jenins	GR	Keller (Erde)	<b>1415</b>
8037	ZH-Wipkingen	ZH	Keller	<b>1036</b>
8046	ZH-Affoltern	ZH	Keller (NB) (2.)	<b>3233</b>
8046	ZH-Affoltern	ZH	Keller (NB) (1.)	<b>2323</b>
8046	ZH-Affoltern	ZH	Keller (NB) (3.)	198

## 7. Literaturhinweise

- [1] Radioaktive Innenluft. Praktikumsunterlage Nr.50; Institut für Toxikologie der ETH-Zürich, Prof. Ch. Schlatter
  
- [2] Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 1992. Bundesamt für Gesundheitswesen, Abteilung Strahlenschutz, ISBN 3-905235-09-9, BAG Bern (1993)
  
- [3] PICO-RAD Radon Analysis Software. Operation Manual; Packard Instrument Company, Publication No. 169-4017 (1988)
  
- [4] Untersuchung der Einflußparameter eines passiven Radonmeßsystems mit Aktivekohleadsorber und Flüssigszintillationsspektrometer.  
Staatliches Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen, D-44287 Dortmund; 26. Jahrestagung Fachverband für Strahlenschutz, Karlsruhe,1994
  
- [5] Lung Cancer Risk from Indoor Exposure to Radon Daughters. ICRP Publication Nr. 50; Pergamon Press Oxford 1987 ISBN 0-08-035579-X or ISBN 0146-6463
  
- [6] Radonprogramm Schweiz "RAPROS". Bericht über die Ergebnisse der Jahre 1987 - 1991. Bundesamt für Gesundheitswesen, Abteilung Strahlenschutz; ISBN 3-905235-00-5, BAG Bern (1992)
  
- [7] Strahlenschutzgesetz: 814.50 Bundesgesetz vom 22. März 1991 (StSG)  
Strahlenschutzverordnung: 814.501 Verordnung vom 22. Juni 1994 (StSV)