



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS**  
LABOR SPIEZ



Fachhochschule Nordwestschweiz  
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik

# **Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Bestimmung der Radon-Aktivitätskonzentration und die Dosisberechnung für Personen mit Radonexposition**

Prüfung von Einstufungsparameter für die mögliche Zulassung von Radon-Personendosimeter

## **Teil 6**

**Raphael Grapentin**

29. September 2023

## Danksagung

Ich danke dem Labor Spiez, insbesondere Markus Zürcher und dem gesamten Fachbereich Nuklearchemie für die Unterstützung während der Bearbeitung des Forschungsprojektes. Ausserdem danke ich Roger Blaser und Antoine Geiser von der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW für das gemeinsame Entwickeln von Ideen und das Ermöglichen sowie Umsetzen verschiedenster Versuche und Experimente. Weiter danke ich unseren Partnern in diesem Projekt, Peter Peier vom Eidgenössischen Insitut für Metrologie METAS, Fabio Barazza und Martha Palacios vom Bundesamt für Gesundheit BAG. Zusätzlich danke ich dem Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS für die Finanzierung dieses Projektes. Des weiteren danke ich Joëlle Goyette, Joan Rey und Luca Pampuri die mit ihren Ideen und kritischen Fragen die Qualität dieser Arbeit sichergestellt haben. Zuletzt gilt mein Dank allen weiteren Personen die hier nicht namentlich aufgeführt sind und einen Beitrag zu diesem Projekt erbracht haben.

## Vorwort

Dieser Bericht schliesst die Bearbeitung des sechsten Ziels des Forschungsprojektes Radon VBS ab, daher handelt es sich bei diesem Bericht um Teil 6. Das Forschungsprojekt ist eine Zusammenarbeit des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz BABS des Eidgenössischen Departements für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS und der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW. Es besteht aus sieben Zielen, die im Zeitraum von September 2022 bis August 2025 bearbeitet werden. Zu jedem der sieben Ziele wird ein Bericht im selben Format erscheinen. Der Titel des hier bearbeiteten sechsten Ziels ist „Prüfung von Einstufungsparameter für die mögliche Zulassung von Radon-Personendosimeter“. Dieser Bericht soll verschiedene Erkenntnisse zusammentragen und eine Entscheidungsgrundlage für die zukünftige Einführung einer Radon-Personendosimetrie bilden. Er richtet sich an Leserinnen und Leser mit fundierten Kenntnissen im Radonbereich, weshalb auf eine allgemeine Einführung in das Thema verzichtet wird.

## Physikalische Grössen im Zusammenhang mit Radon

Grundlegend ist die Radonaktivitätskonzentration, die in  $\text{Bq}/\text{m}^3$  angegeben wird, nur selten wird die Radonkonzentration, zum Beispiel in  $\text{mol}/\text{L}$  oder  $\text{g}/\text{L}$ , verwendet. Die Radonaktivitätskonzentration kann über verschiedene Verfahren gemessen werden, gängig sind dabei der Nachweis in einer Ionisationskammer oder über Kernspurdetektoren. Zur Angabe der vorhandenen Folgeprodukte wird meist die potenzielle Alphaenergiekonzentration PAEC in  $\text{J}/\text{m}^3$  verwendet. Diese gibt an, wie viel Energie in Form von Alphastrahlung pro Kubikmeter abgegeben wird, wenn alle Radonfolgeprodukte bis zu  $^{210}\text{Pb}$  zerfallen. Aus dieser Grösse, kann man die theoretisch nötige Radonkonzentration berechnen, bei der im Gleichgewichtszustand die gleiche Menge an Folgeprodukten vorhanden wäre. Dieser Wert wird häufig Equilibrium Equivalent Concentration EEC genannt. Aus dem Verhältnis dieser Gleichgewichtskonzentration EEC und der tatsächlich gemessenen Radon Aktivitätskonzentration berechnet sich nun der Gleichgewichtsfaktor  $F$ . Die Folgeprodukte des Radons sind geladen und werden sich daher an Aerosole binden. Der Anteil der Folgeprodukte, die nicht an Aerosole gebunden sind, wird Unattached Fraction  $f_p$  genannt und beträgt ungefähr 0.08 [1]. Für die Radondosimetrie besonders relevant ist der Dosiskonversionsfaktor  $c_B$ . Dieser gibt an, wie gross die effektive Dosis durch Radonexposition ist, er wird angegeben in  $\text{mSv}/(\text{Bq h}/\text{m}^3)$  oder  $\text{mSv}/(\text{mJ h}/\text{m}^3)$ , wobei das EEC respektive PAEC relevant sind. Historisch wurden ebenfalls die Grössen Working Level WL und Working Level Month WLM verwendet. Dabei entspricht  $1 \text{ WL} = 2.08 \times 10^{-5} \text{ J}/\text{m}^3$  beziehungsweise  $1 \text{ WLM} = \frac{1}{F} 6.37 \times 10^5 \text{ Bq h}/\text{m}^3$  für Radon. Weitere Informationen und Hintergründe zu diesen Grössen finden sich in [1], [2] und [3].

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
1.1	Gesundheitliche Gefährdung durch Radon . . . . .	4
1.2	Situation in der Schweiz . . . . .	4
1.3	Situation im Ausland . . . . .	5
1.4	Was beschreibt dieser Bericht? . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Messmethoden der persönlichen Radondosimetrie</b>	<b>8</b>
2.1	Messung des Radongases . . . . .	8
2.1.1	Ortsbezogene Messung des Radongases . . . . .	9
2.1.2	Personenbezogene Messung des Radongases . . . . .	10
2.2	Messung der Radonfolgeprodukte . . . . .	13
2.2.1	Messmethode . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Radonmessgeräte und Radondosimeter</b>	<b>15</b>
3.1	Radonmessgerät . . . . .	15
3.2	Radondosimeter . . . . .	15
3.3	Personendosimeter für Photonen-, Beta- und Neutronenstrahlung . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Radon-Personendosimetrie</b>	<b>17</b>
4.1	Einsatz von Radon-Personendosimetern . . . . .	17
4.2	Anforderungen an Radon-Personendosimeter . . . . .	18
4.2.1	Messgrösse . . . . .	18
4.2.2	Messbereich . . . . .	19
4.2.3	Linearität . . . . .	21
4.2.4	Reproduzierbarkeit . . . . .	21
4.2.5	Weitere Anforderungen . . . . .	21
4.2.6	Zeitliches Ansprechverhalten . . . . .	22
4.2.7	Fazit . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Diskussion und Empfehlungen</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>26</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Gesundheitliche Gefährdung durch Radon

Radon kann über verschiedene Wege inkorporiert werden und so eine gesundheitliche Gefahr für Menschen darstellen. Die externe Bestrahlung durch Radon ist in der Regel vernachlässigbar, da es sich beim Radonzerfall um einen Alphazerfall handelt. Der häufigste Weg der Inkorporation ist die Inhalation. Dabei wird das sich in der Luft befindliche Radon eingeatmet. Einerseits kann das Radon in der Lunge zerfallen und so Schäden am Lungengewebe verursachen. Andererseits kann ein Teil des Radons über die Blutgefässe in der Lunge im Blut gelöst werden und sich im Körper verteilen. Vom Blut aus kann es in verschiedene weitere Gewebe eindringen. [1] fasst die wichtigsten Studien zusammen, die untersucht haben, wie sich Radon im Körper verteilt. Besonders interessant ist dabei, dass eine effektive Dosis von  $1.8 \times 10^{-7}$  mSv/(Bq h/m<sup>3</sup>) angegeben wird, für die langfristige Inhalation von reinem Radon.

Weitaus grösser ist der Anteil zur effektiven Dosis, der durch die Inhalation der Folgeprodukte des Radonzerfalls zustande kommt. Die Folgeprodukte, die in der weiteren Zerfallsreihe vom Radon vorkommen, sind Feststoffe. Diese binden sich grössten Teils an andere Schwebeteilchen in der Luft, können aber auch ungebunden vorkommen. Gebunden oder ungebunden werden sie eingeatmet und lagern sich im Lungengewebe ab. Dabei wird dieses Gewebe durch die weiteren Zerfälle der Radonfolgeprodukte geschädigt. Dies führt, im Vergleich zur Inhalation von reinem Radon, zu einer deutlich höheren Dosis von  $1.3 \times 10^{-5}$  mSv/(Bq h/m<sup>3</sup>) bei einem Gleichgewichtsfaktor von  $F = 0.4$  [1].

Um die Radonexposition von Personen zu überwachen und gesundheitliche Risiken zu minimieren, werden Radonmessungen in Gebäuden durchgeführt und die persönliche Radondosimetrie angewendet. Dabei ist das Ziel der persönlichen Radondosimetrie die Radonexposition einer Person möglichst genau über alle Standorte zu messen oder abzuschätzen. Im Gegensatz dazu dient eine Radonmessung in Gebäuden der Überwachung von Radonkonzentrationen in einzelnen Räumen. Wie und wann solche Messungen durchzuführen sind, ist in vielen Ländern gesetzlich geregelt. Nachfolgend wird die Situation in der Schweiz und anschliessend in einigen anderen Ländern beschrieben.

### 1.2 Situation in der Schweiz

Der Schutz vor Radon ist in der Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 26. April 2017 geregelt [4]. Art. 155 Abs. 2 StSV definiert den Referenzwert für die jährliche gemittelte Radonkonzentration

von  $300 \text{ Bq/m}^3$  für Räume, „in denen sich Personen regelmässig während mehrerer Stunden pro Tag aufhalten“ (Art. 155 Abs. 2 StSV). Bei einer Überschreitung dieses Referenzwertes gilt:

„Wird der Referenzwert nach Artikel 155 Absatz 2 überschritten, so trifft die Gebäudeeigentümerin oder der Gebäudeeigentümer die notwendigen Sanierungsmassnahmen. [...]“  
(Art. 166 Abs. 1 StSV)

Weiter wird in Art. 156 Abs. 2 StSV der Schwellenwert für die jährliche gemittelte Radonkonzentration von  $1000 \text{ Bq/m}^3$  für radonexponierte Arbeitsplätze definiert. Es heisst:

„Als radonexponiert gelten Arbeitsplätze, an denen der Schwellenwert sicher oder vermutungsweise überschritten ist. Dies sind insbesondere Arbeitsplätze in unterirdischen Bauten, Bergwerken, Höhlen und Wasserversorgungsanlagen sowie solche, die von der Aufsichtsbehörde als radonexponiert eingestuft werden.“  
(Art. 156 Abs. 3 StSV)

Nach Art. 156 Abs. 1 StSV sind bei der Überschreitung des Schwellenwertes an radonexponierten Arbeitsplätzen Massnahmen nach Art. 167 StSV zu treffen. Gemäss Art. 167 Abs. 1 StSV „muss der Betrieb die jährlich durch Radon verursachte effektive Dosis der exponierten Person ermitteln und diese mindestens alle fünf Jahre überprüfen“ (Art. 167 Abs. 1 StSV). In den folgenden Absätzen 2 und 3 wird verordnet, dass über einer effektiven Dosis von  $10 \text{ mSv}$  pro Kalenderjahr organisatorische und technische Massnahmen ergriffen werden müssen, um die Dosis zu reduzieren, erzielen diese Massnahmen keine Reduktion unter  $10 \text{ mSv}$  pro Kalenderjahr so gilt die Person als beruflich strahlenexponiert. Wie die Ermittlung der effektiven Dosis stattzufinden hat, ist in der Verordnung des EDI (Eidgenössisches Departement des Inneren) über die Personen- und Umgebungsdosimetrie (Dosimetrieverordnung) vom 26. April 2017 geregelt [5]. Anhang 12 der Dosimetrieverordnung besagt, dass die effektive Dosis  $E$  einer Person das Produkt des Gleichgewichtsfaktors  $F$ , des Dosiskonversionsfaktors  $c_B$  und der über ein Jahr integrierten Radonkonzentration während der Aufenthaltszeit (abgekürzt JIRK) ist. Hierbei müssen alle Arbeitsplätze einer Person mit den entsprechenden Aufenthaltszeiten berücksichtigt werden. Dabei ist die Radonkonzentration durch eine anerkannte Radonmessung gemäss Art. 159 Abs. 1 StSV nach dem Messprotokoll für radonexponierte Arbeitsplätze zu messen.

Zusammengefasst bedeutet das, dass an den meisten Arbeitsplätzen der Referenzwert von  $300 \text{ Bq/m}^3$  einzuhalten ist, bei einer Überschreitung ist das Gebäude zu sanieren. Ausgenommen davon sind radonexponierte Arbeitsplätze, diese finden sich vor allem in unterirdischen Bauwerken, können sich aber auch an anderen Orten befinden, wo Radonkonzentrationen über  $1000 \text{ Bq/m}^3$  gemessen wurden. Liegt eine Überschreitung dieses Schwellenwertes vor, muss die jährlich effektive Dosis der exponierten Personen nach obigem Verfahren ermittelt werden und alle fünf Jahre überprüft, dass heisst neu gemessen, werden. Im privaten Bereich gilt ebenfalls der Referenzwert von  $300 \text{ Bq/m}^3$ , jedoch gibt es keine Dosisabschätzung oder Dosimetrie. Daher wird in diesem Bericht nur die Dosisermittlung während der Arbeitszeit behandelt.

### 1.3 Situation im Ausland

In der Europäischen Union ist vor allem die Richtlinie 2013/59/EURATOM vom 5. Dezember 2013 massgebend [6]. Darin werden den Mitgliedstaaten Empfehlungen gemacht, wie die nationale Gesetzgebung im Zusammenhang mit Radon aussehen sollte. Ähnlich wie in der Schweiz sollen die Mitgliedstaaten einen nationalen Referenzwert für die Radonaktivitätskonzentration definieren, der bei  $300 \text{ Bq/m}^3$  oder tiefer liegt. An Arbeitsplätzen sollen bei dessen Überschreitung Massnahmen ergriffen werden, um die Radonkonzentration zu senken. Besteht die Überschreitung

weiterhin, soll die effektive Dosis von exponierten Personen ermittelt werden. Ist diese Dosis grösser als 6 mSv pro Jahr, so soll dieser Arbeitsplatz als geplante Expositionssituation behandelt werden. Wie die effektive Dosis zu messen ist, wird nicht spezifiziert. Allerdings besteht die Möglichkeit, als Grenzwerte nicht eine effektive Dosis, sondern eine zeitintegrierte Radonexposition in Becquerelstunden pro Kubikmeter zu verwenden.

In Deutschland wird der Schutz vor Radon im Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG) [7] und in der Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) [8] geregelt. Wie in der Richtlinie 2013/58/EURATOM empfohlen, existiert ein Referenzwert von 300 Bq/m<sup>3</sup> an Arbeitsplätzen, bei dessen Überschreitung eine Dosisabschätzung nötig wird. Wird ein Schätzwert von 6 mSv pro Jahr oder mehr ermittelt, ist die Dosis durch Radonexposition zu überwachen. Es heisst:

„[Es ist] die Radon-222-Exposition, die potenzielle Alphaenergie-Exposition oder die Körperdosis der an anmeldungsbedürftigen Arbeitsplätzen beschäftigten Arbeitskräfte auf geeignete Weise durch Messung zu ermitteln [...]“  
(§ 131 Abs. 1 StrlSchG)

Anmeldungsbedürftig sind alle Arbeitsplätze, die den Referenzwert von 300 Bq/m<sup>3</sup> überschreiten. Wie die Messung „auf geeignete Weise“ durchgeführt werden muss, ist nicht geregelt. Weiter ist geregelt, dass eine effektive Dosis von 1 mSv durch eine Radonexposition von 0.32 MBq h/m<sup>3</sup> bei einem Gleichgewichtsfaktor von  $F = 0.4$  oder durch eine potenzielle Alphaenergieexposition von 0.71 mJ h/m<sup>3</sup> verursacht wird. In weiteren europäischen Ländern ist die Gesetzgebung sehr ähnlich.

Anders ist die Situation in Kanada. Das Thema Radon ist dort, im Vergleich zu europäischen Ländern, nur wenig reguliert. In dem Radiation Protection Regulation [9] wird beschrieben, welche Pflichten ein Bewilligungsinhaber von sogenannten „Nuclear Energy Worker“, vergleichbar mit strahlenexponierten Personen in der Schweiz, hat. Es heisst:

„A licensee must ascertain the magnitude of exposure to radon progeny and the effective dose and equivalent dose

- (a) by direct measurement as a result of monitoring; or
- (b) if the time and resources required for direct measurement as a result of monitoring outweigh the usefulness of ascertaining the amount of exposure and doses using that method, by estimating them.“

(Art. 5 Abs. 2 Radiation Protection Regulation)

Übersetzt könnte das bedeuten, dass der Bewilligungsinhaber die Exposition durch Radonfolgeprodukte ermitteln muss, entweder durch direkte Messung oder Abschätzung, falls der Aufwand die Nützlichkeit übersteigt. Weiter relevant ist das Nuclear Safety and Control Act [10], dort wird geregelt, dass eine anerkannte Dosimetriestelle technische Anforderungen erfüllen muss, die in einem regulatorischen Dokument beschrieben sind. Insbesondere wird die Messgenauigkeit der Systeme spezifiziert. Es wird unterschieden zwischen Messungen des Radongases und der Folgeprodukte, weiter wird zwischen stationären und persönlichen Messungen unterschieden. Die Messgrössen für die verschiedenen Messmethoden sind in Tabelle 1.1 dargestellt. Die stationären Messsysteme messen dabei die Radonaktivitäts- oder potenzielle Alphaenergiekonzentration, wohingegen die persönlichen Messsysteme die Radonexposition oder die potenzielle Alphaenergieexposition messen. Auf der Webseite des Canadian Nuclear Safety Commission ist ersichtlich, dass es aktuell nur einen anerkannten Anbieter für Radondosimetrie gibt [11].

	Radongas	Folgeprodukte
Stationär	[10 kBq/m <sup>3</sup> , 20 kBq/m <sup>3</sup> )	[1.03 μJ/m <sup>3</sup> , 2.08 μJ/m <sup>3</sup> )
Persönlich	[2 MBq h/m <sup>3</sup> , 4 MBq h/m <sup>3</sup> )	[177 μJ h/m <sup>3</sup> , 354 μJ h/m <sup>3</sup> )

Tabelle 1.1: Übersicht über die Messgrößen und Messbereiche von Messsystemen für die Radondosimetrie in Kanada [12]. Für jede Messmethode ist ein Messbereich angegeben, für den die Abweichung maximal +100% oder −50%, und darüber maximal +50% oder −33% betragen darf. Für den Messbereich darunter wird die Abweichung nicht angegeben.

## 1.4 Was beschreibt dieser Bericht?

In Abschnitt 1.2 wurde die aktuelle Gesetzeslage in der Schweiz beschrieben. Das Verfahren zur Ermittlung einer effektiven Dosis einer Person durch Radonexposition erfordert eine anerkannte Radonmessung am betroffenen Arbeitsplatz sowie die Bestimmung der Aufenthaltszeit. Dieses Verfahren könnte in Zukunft durch die Zulassung von Radon-Personendosimetern verändert werden. In diesem Bericht wird zuerst die aktuelle Methode der ortsbezogenen Messung präsentiert und mögliche Innovationen vorgestellt. Anschliessend werden verschiedene Messsysteme aufgezeigt, wie die effektive Dosis durch Messung der Radon- oder potenziellen Alphaenergieexposition ermittelt werden kann. In Kapitel 3 wird eine Übersicht über die Anforderungen an Radondosimeter und -messgeräte sowie an Personendosimeter gegeben, zusätzlich werden mögliche Anforderungen für eine zukünftige Zulassung von Radon-Personendosimeter präsentiert. Abschliessend werden die wichtigsten Punkte hervorgehoben und Empfehlungen für die Einführung einer persönlichen Radondosimetrie gemacht.



## Kapitel 2

# Messmethoden der persönlichen Radondosimetrie

Im vorherigen Kapitel wurde erläutert, wieso eine Überwachung der effektiven Dosis durch Radonexposition nötig und wie die Gesetzeslage in der Schweiz und in anderen Ländern ist. Es bestehen zwei verschiedene Ansätze, um die effektive Dosis durch Radonexposition zu bestimmen. In der Schweiz muss die über ein Jahr integrierte Radonkonzentration während der Aufenthaltszeit gemessen werden und mit dem Gleichgewichtsfaktor und den Dosiskonversionsfaktor zur effektiven Dosis umgerechnet werden. In Deutschland und in Kanada besteht ebenfalls die Möglichkeit über eine Messung der potenziellen Alphaenergieexposition die effektive Dosis der exponierten Person zu bestimmen. Eine Bestimmung der Radonexposition erfolgt über eine Messung des Radongases, die Ermittlung der potenziellen Alphaenergieexposition geschieht über eine Messung der Radonfolgeprodukte. Nachfolgend werden zuerst die Methoden präsentiert, mit denen das Radongas gemessen wird, anschliessend wird auf Methoden zur Messung der potenziellen Alphaenergiekonzentration und -exposition eingegangen.

### 2.1 Messung des Radongases

Die Berechnung der effektiven Dosis ist, gemäss Dosimetrieverordnung, abhängig von dem Gleichgewichtsfaktor, dem Dosiskonversionsfaktor und der über ein Jahr integrierten Radonkonzentration während der Aufenthaltszeit. In diesem Abschnitt werden die Messmethoden für die persönliche Radondosimetrie beschrieben, welche direkt das Radongas messen. Dabei ist das Ziel die möglichst präzise Messung der über ein Jahr integrierten Radonkonzentration während der Aufenthaltszeit. Der Gleichgewichtsfaktor, der zur Berechnung der effektiven Dosis verwendet werden muss, kann gemäss Art. 39 Abs. 3 und Abs. 4 Dosimetrieverordnung nach Rücksprache mit der Aufsichtsbehörde „mittels geeigneter Messung“ festgelegt und verwendet werden. Wie diese Messung verläuft und welche Messgeräte verwendet werden müssen, ist nicht weiter spezifiziert.

Die über ein Jahr integrierte Radonkonzentration während der Aufenthaltszeit ist die gesamte Radonexposition, die eine Person während der Arbeit an radonexponierten Arbeitsplätzen erfährt. Es ist nicht klar, wie Personen gehandhabt werden die an radonexponierten und nicht

radonexponierten Arbeitsplätzen arbeiten. Mathematisch könnte man

$$\text{JIRK} = \int_{\text{Arbeitszeit}} a_{Rn}(x(t), t) dt \quad (2.1)$$

schreiben, wobei  $a_{Rn}(x(t), t)$  die Radonkonzentration am Standort  $x(t)$  der Person zum Zeitpunkt  $t$  ist und die gesamte Arbeitszeit in einem Jahr berücksichtigt wird. Arbeitet eine Person immer am selben Standort, dann ist die Messung der Radonkonzentration und der Aufenthaltszeit an diesem Standort nötig um die JIRK zu bestimmen. Hält sich die Person während der Arbeitszeit aber an verschiedenen Standorten auf, so muss an jedem dieser Standorte die Radonkonzentration und die Aufenthaltszeit gemessen werden. Dieses Verfahren wird als ortsbezogene Messung bezeichnet. Anstatt jeden Standort zu bemessen, kann auch ein Messgerät von der Person getragen werden, dieses Verfahren wird als personenbezogene Messung bezeichnet.

### 2.1.1 Ortsbezogene Messung des Radongases

Die ortsbezogene Messung ist das Verfahren, das aktuell angewendet werden muss, um gemäss StSV und Dosimetrieverordnung die effektive Dosis durch Radonexposition einer Person korrekt zu ermitteln. Dabei werden die Messgeräte stationär verwendet, daher ortsbezogen. In Abschnitt 1.2 ist die aktuell gültige Gesetzeslage in der Schweiz beschrieben. Dabei wird verlangt, dass die über ein Jahr integrierte Radonkonzentration durch eine anerkannte Radonmessung an radonexponierten Arbeitsplätzen bestimmt werden muss. Diese anerkannte Radonmessung muss nach dem vorgegebenen Messprotokoll durchgeführt werden (Art. 159 Abs. 1 StSV), welches vorschreibt, dass mindestens 30 Tage während und 30 Tage ausserhalb der Heizperiode mit einem zugelassenen Radonmessgerät oder Radondosimeter gemessen werden muss [13]. Aus diesen Messwerten und den Aufenthaltszeiten der exponierten Person ergibt sich dann die JIRK.

#### Vor- und Nachteile dieser Methode

Vergleicht man die oben beschriebene Methode der ortsbezogenen Messung mit den unten beschriebenen Methoden der personenbezogenen Messung zur Bestimmung der effektiven Dosis durch Radonexposition, so stehen folgende Vorteile fest:

- Die Personen deren effektive Dosis ermittelt werden muss, müssen keine Messgeräte bei sich tragen. Die Methoden der personenbezogenen Messung beinhalten das Tragen eines persönlichen Messgerätes, was je nach Tätigkeit störend oder gar nicht möglich sein kann. Bei der ortsbezogenen Methode werden die Arbeitsplätze einmalig gemessen, wobei die Messgeräte an den Arbeitsplätzen platziert werden. Anschliessend erfolgt gemäss Art. 167 Abs. 1 StSV eine Überprüfung der effektiven Dosis, das heisst eine erneute Messung der Radonaktivitätskonzentration, alle fünf Jahre.
- Die Messwerte an den radonexponierten Arbeitsplätzen können für alle Personen gleich verwendet werden. Gegebenenfalls ist nur eine Berücksichtigung unterschiedlicher Aufenthaltszeiten nötig. Arbeiten mehrere Personen am gleichen radonexponierten Arbeitsplatz, muss dieser Arbeitsplatz nur einmalig gemessen werden, mit anschliessenden Überprüfungen im Abstand von fünf Jahren. Die gemessene Radonaktivitätskonzentration muss anschliessend mit den Aufenthaltszeiten jeder einzelnen Person verrechnet werden. Besonders bei einer grossen Anzahl von Personen am gleichen Standort, kann diese Methode deutlich einfacher und kostengünstiger sein.

Dem gegenüber stehen folgende Nachteile dieser Methode:

- Es wird der Mittelwert einer mindestens 60-tägigen Messung der Radonkonzentration für die Bestimmung der JIRK verwendet. Da diese Messwerte über eine Dauer von fünf Jahren verwendet werden, kann dadurch eine grosse Ungenauigkeit in der Bestimmung der JIRK und somit der effektiven Dosis entstehen. Herrschen an einem Arbeitsplatz starke Schwankungen der Radonkonzentration über die Zeit, zum Beispiel durch das Ausschalten der Lüftung über Nacht und am Wochenende, so kann es zu einer Überschätzung der effektiven Dosis während der Arbeitszeit kommen. Umgekehrt kann es zu einer Unterschätzung der Dosis kommen, wenn die Radonkonzentration während der Arbeitszeit über dem Mittelwert der Messperiode liegt. Diese Fehlerquelle wurde bereits erkannt und kann mit einer aktiven Radonmessung reduziert werden. Dabei ist gemäss dem oben erwähnten Messprotokoll für radonexponierte Arbeitsplätze „[...] nur die Radongaskonzentration zu berücksichtigen, die während des Aufenthalts von Personen gemessen wird“.
- Jede Person muss die Aufenthaltszeiten an jedem radonexponierten Arbeitsplatz ermitteln. Um eine möglichst genaue Berechnung der effektiven Dosis zu erreichen, müssen die Personen die Aufenthaltszeiten möglichst genau erfassen. Das könnte einen grossen zusätzlichen Aufwand neben der eigentlichen Arbeit darstellen. Solange eine Person permanent am gleichen Arbeitsplatz arbeitet, ist die Bestimmung der Aufenthaltszeit relativ simpel. Aufwendig wird es, sobald die Person an mehreren Arbeitsplätzen unterschiedlich viel Zeit verbringt.

### **Entwicklungen der ortsbezogenen Messung**

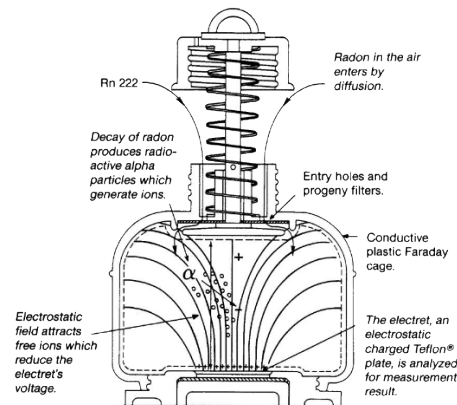
Die Nachteile der ortsbezogenen Messung lassen sich mit technischer Unterstützung umgehen, wobei ebenfalls die Messgenauigkeit der JIRK erhöht wird. Einige Unternehmen entwickeln kombinierte Systeme, die eine gleichzeitige Erfassung des Personenaufenthalts sowie eine Messung der Radonkonzentration erlauben. Ein solches System besteht aus einem aktiven Radonmessgerät und einem Gerät zur Arbeitszeiterfassung. Betritt eine Person einen radonexponierten Arbeitsplatz, so meldet sie sich am Gerät, beispielsweise über eine Chipkarte, an. Das System registriert den Zutritt der entsprechenden Person. Verlässt die Person den Arbeitsplatz wieder, meldet sie sich analog mit der Chipkarte am System ab. Zur Auswertung der Radonexposition einer Person, kann nun die erfasste Anwesenheit mit den gleichzeitig gemessenen Radonkonzentrationen des Messgerätes verrechnet werden. Solche Systeme könnten an jedem radonexponierten Arbeitsplatz installiert werden, um die Aufenthaltszeit und simultan die Radonkonzentration möglichst präzise zu messen, ausserdem kann der administrative Aufwand für die Personen reduziert werden.

#### **2.1.2 Personenbezogene Messung des Radongases**

Im Gegensatz zu der ortsbezogenen Messung steht die personenbezogene Messung. Die ortsbezogene Messung entspricht den genauen Vorgaben aus StSV, Dosimetrieverordnung und dem Messprotokoll für radonexponierte Arbeitsplätze. Die personenbezogene Messung ist in der Schweiz keine zugelassene Methode um die JIRK und somit die effektive Dosis für Personen durch Radonexposition abzuschätzen. Diese Methode könnte jedoch in Zukunft als Möglichkeit zur Radon-Personendosimetrie zugelassen und genutzt werden. Hierbei wird nicht der radonexponierte Arbeitsplatz bemessen, sondern die exponierte Person. Nachfolgend werden verschiedene passive und aktive Messsysteme für personenbezogene Messungen des Radongases vorgestellt und diskutiert.



(a) Bild von zwei Kernspurdetektoren vom Modell Radonova Radtrak<sup>3</sup>.  
Bild: Radonova [14]



(b) Schematische Darstellung des Aufbaus und der Funktionsweise eines Elektretdetektors.  
Bild: Rad Elec Inc. [15]

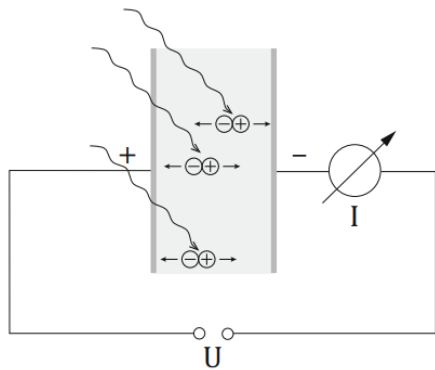
Abbildung 2.1: Darstellungen von zwei verschiedenen passiven Radondetektoren.

### Passive Messsysteme

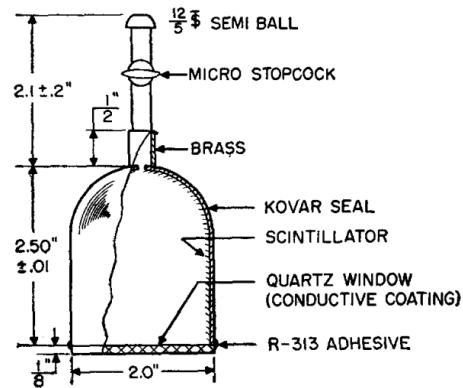
Passive Messsysteme zur Bestimmung der jährlichen integrierten Radonkonzentration während der Aufenthaltszeit verwenden passive Radondetektoren, wobei Kernspurdetektoren und Elektretdetektoren verbreitet sind. Die Durchführung einer personenbezogenen Messung mit passiven Radondetektoren basiert auf der Idee, dass die exponierte Person, den Radondetektor während der Arbeitszeit bei sich trägt. Ausserhalb der Arbeitszeit wird der Detektor deaktiviert oder, da das bei vielen Modellen nicht möglich ist, an einem Lagerort platziert wo bereits im Voraus die Radonkonzentration gemessen wurde. Durch Erfassung der Arbeitszeit kann am Ende einer Messperiode die Radonexposition am Lagerort abgezogen werden und nur die Radonexposition während der Arbeit an radonexponierten Arbeitsplätzen bestimmt werden. Nachfolgend wird kurz auf die beiden Detektortypen eingegangen.

Um die Radonkonzentration, beziehungsweise -exposition, zu messen, bestehen **Kernspurdetektoren** aus einem Gehäuse in dem sich ein Detektormaterial befindet. Dieses ist empfindlich auf Alphastrahlung, die beim Zerfall von Radon und seinen Folgeprodukten entsteht. Typischerweise besteht das Gehäuse aus einem Kunststoff und beinhaltet ein Volumen von einigen Kubikzentimetern. Der Austausch zwischen der zu messenden Raumluft und dem Volumen im Inneren geschieht meist über Diffusion durch eine Membran oder durch sehr kleine Löcher oder Spalten. Das Radon in der Raumluft diffundiert in das Innere der Messkammer, zerfällt dort und die Folgeprodukte lagern sich am Gehäuse ab, wo sie weiter Zerfallen. Trifft nun ein Alphateilchen aus einem Zerfall auf das Detektormaterial kann dort eine Spur hinterlassen werden. Als Detektormaterial wird häufig Polyallyldiglycolcarbonat PADC, auch bekannt als CR-39, und Cellulosenitrat, auch bekannt als LR-115, eingesetzt. Dank einer Kalibrierung, kann nach der Exposition des Detektors, durch chemische Bearbeitung und Auswertung der Spuren in einem Labor, die Radonkonzentration der Raumluft bestimmt werden. Das Detektormaterial kann danach nicht weiter verwendet werden. In Abbildung 2.1a ist ein Beispiel von einem Kernspurdetektor dargestellt.

Ähnlich wie Kernspurdetektoren bestehen **Elektretdetektoren** ebenfalls aus einem Gehäuse mit einer Membran oder sehr kleinen Löchern oder Spalten zum Luftaustausch zwischen dem



(a) Elektrische Schaltung einer Ionisationskammer. Die ionisierende Strahlung des Zerfalls von Radon und den Folgeprodukten verursacht einen messbaren elektrischen Strom in der Messkammer. Bild: [16]



(b) Ursprüngliche Darstellung des Aufbaus einer Lucas Zelle von Henry Lucas. An das untere Ende wird ein Photomultiplier angebaut, die radonhaltige Luft tritt über das obere Rohr in die Messkammer ein. Bild: [17]

Abbildung 2.2: Darstellungen der zwei unterschiedlichen aktiven Messsysteme, die zur Messung von Radongas genutzt werden.

Inneren und der zu messenden Raumluft. Der Nachweis der Radonkonzentration geschieht aber anders als bei Kernsprudendetektoren. Elektretdetektoren nutzen die Ionisierung der Luft durch die Alphastrahlung. Im Inneren des Detektors befindet sich ein Dielektrikum wie zum Beispiel Teflon. Dieses ist scheibenförmig und wird zur Vorbereitung einer Messung einem elektrischen Feld ausgesetzt. Dabei entsteht eine elektrische Spannungsdifferenz zwischen den beiden Oberflächen der Scheibe von mehreren hundert Volt. Die Scheibe wird nun in das Gehäuse gelegt, wodurch im Inneren ein elektrisches Feld entsteht. Jede Ionisierung der Luft im Inneren reduziert nun die elektrische Spannung auf dem Dielektrikum, dadurch kann durch Messen der restlichen Spannung, die nach einer Exposition noch vorhanden ist, die Radonkonzentration bestimmt werden. Im Gegensatz zu Kernspurdetektoren können Elektretdetektoren wiederverwendet werden, indem die elektrische Spannung wieder hergestellt wird. Abbildung 2.1b zeigt schematisch den Aufbau und die Funktionsweise eines Elektretdetektors.

### Aktive Messsysteme

Aktive Messsysteme zur personenbezogenen Messung werden sehr ähnlich angewendet, wie passive. Die exponierte Person trägt während der Arbeitszeit ein aktives Messgerät bei sich. Die meisten aktiven Messgeräte ermöglichen dann eine einfache Auswertung der gesamten Radonexposition während der Arbeitszeit, indem das Messgerät ausserhalb der Arbeitszeit ausgeschaltet oder deaktiviert wird. Bei aktiven Messgeräten zur Messung der Radonkonzentration sind die Ionisationskammer und die Lucas-Zelle zwei häufige Messsysteme. Seltener wird ein Adsorptionsverfahren mit Aktivkohle angewendet um die Radonkonzentration zu messen.

Die **Ionisationskammer** besteht aus einer Anode und einer Kathode die gemeinsam ein Volumen bilden. Dieses Volumen ist durch eine für Radon diffusionsoffene Membran von der zu messenden Raumluft getrennt. Durch die Ionisation der Luft im Inneren durch die Strahlung des Radonzerfalls, kann bei einer konstanten Spannung, ein Strom zwischen Anode und Kathode

gemessen werden. Dieses Messprinzip ist in Abbildung 2.2a dargestellt. Diese Messmethode kann durch eine Luftpumpe ergänzt werden, die den Austausch zwischen Raumluft und Volumen der Ionisationkammer durch die Membran beschleunigt.

Bei einer **Lucas-Zelle** tritt die Raumluft ebenfalls über eine Membran in die Messkammer ein, wobei auch eine Pumpe verwendet werden kann, um den Luftaustausch zu beschleunigen. Diese ist im Inneren mit ZnS(Ag) beschichtet, das bei Eintreffen eines Alphateilchens Photonen aussendet. Die ausgesendeten Photonen werden anschliessend von einem Photomultiplier detektiert. Eine historische Darstellung einer Lucas-Zelle ist in Abbildung 2.2b gezeigt.

Das **Adsorptionsverfahren mit Aktivkohle** besteht aus einem Aktivkohlefilter und einer Luftpumpe. Die Raumluft wird mit einem bekannten Volumenstrom durch den Aktivkohlefilter gepumpt. Ein Grossteil der Radonatome in der Luft adsorbieren an der Oberfläche der Aktivkohle im Filter. Nach einer bestimmten Zeit wird die Messung beendet und der Aktivkohlefilter über Gamma-spektrometrie im Labor ausgewertet. Über die Aktivität der Radonfolgeprodukte, der gesamten Luftmenge und der Dauer der Messung kann die Radonkonzentration in der Raumluft bestimmt werden. Die Messdauer ist dabei abhängig von dem Luftvolumenstrom, dem Aktivkohlefilter und der zu erwartenden Radonkonzentration. Dieses Verfahren kann auch zur Messung der Radonkonzentration in anderen Medien, wie zum Beispiel Wasser, verwendet werden. Eine ähnliche Methode ohne Luftpumpe ist ebenfalls anwendbar. Dabei wird der Aktivkohlefilter der Raumluft ausgesetzt, das adsorbierte Radon erreicht ein Gleichgewicht mit der Radonkonzentration in der Raumluft und kann analog ausgewertet werden.

## 2.2 Messung der Radonfolgeprodukte

Die oben beschriebenen Methoden haben zum Ziel, die über ein Jahr integrierte Radonexposition während der Aufenthaltszeit zu messen und daraus mit Hilfe des Gleichgewichtsfaktors und des Dosiskonversionsfaktor die effektive Dosis der exponierten Person zu bestimmen. Eine grundsätzlich verschiedene Methode ist die Messung der potenziellen Alphaenergiekonzentration oder -exposition. Diese Methode ist in der Schweiz nicht zugelassen um die effektive Dosis an radonexponierten Arbeitsplätzen zu ermitteln. Wie in Abschnitt 1.3 erläutert, wird in der deutschen Strahlenschutzverordnung festgehalten, dass eine potenzielle Alphaenergieexposition von  $0.71 \text{ mJ h/m}^3$  zu einer effektiven Dosis von  $1 \text{ mSv}$  führt, dies entspricht einem Umrechnungsfaktor von  $1.41 \text{ mSv}/(\text{mJ h/m}^3)$ . Die Internationalen Strahlenschutzkommission ICRP empfiehlt in ihrer neusten Publikation zum Thema Radon einen Faktor von  $3 \text{ mSv}/(\text{mJ h/m}^3)$ , bei „substantial physical activities“ wird sogar  $6 \text{ mSv}/(\text{mJ h/m}^3)$  empfohlen [1]. Beide diese Faktoren sind deutlich höher als derjenige, welcher in der deutschen Strahlenschutzverordnung festgehalten ist. Die schweizerische Dosimetrieverordnung und das kanadische Radiation Protection Regulation hingegen, legen keinen Umrechnungsfaktor von potenzieller Alphaenergieexposition in effektive Dosis für die Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten fest.

### 2.2.1 Messmethode

Bei der Messung der potenziellen Alphaenergiekonzentration oder -exposition werden die Radonfolgeprodukte in der Luft gemessen. Dabei kann ebenfalls zwischen ortsbezogenen und personenbezogenen Messungen unterschieden werden. Jedoch basiert die Messmethode immer auf dem gleichen Grundsatz. Die Raumluft wird mit Hilfe einer Luftpumpe durch einen feinen Partikelfilter mit einer Porengrösse von wenigen Zehntel Mikrometer gezogen, wobei die in der Luft befindlichen Schwebeteilchen mit den gebundenen Radonfolgeprodukten im Filter aufgefangen werden. Die Folgeprodukte im Filter zerfallen und können über einen Detektor gemessen werden. Dabei kann die Messung der Zerfälle kontinuierlich während der Akkumulation oder erst im

Nachhinein durchgeführt werden. Stationäre Messgeräte haben meist einen integrierten Detektor und messen die Zerfälle der Folgeprodukte kontinuierlich. Tragbare Messgeräte zur Verwendung für personenbezogenen Messungen bestehen teilweise nur aus einer Luftpumpe und dem Filter, dieser wird im Nachhinein in einem separaten Messgerät ausgemessen.

Der grosse Vorteil dieser Methode ist, dass keine zusätzliche Messung des Gleichgewichtsfaktor nötig ist. Die Messwerte der potenziellen Alphaenergiekonzentration oder -exposition können direkt mit einem Umrechnungsfaktor in eine effektive Dosis umgerechnet werden. Im Gegensatz dazu ist die Berechnung der Dosis über eine Messung des Radongases immer mit einer Messung oder Abschätzung des Gleichgewichtsfaktors verbunden, was eine wichtige Fehlerquelle darstellt.

## Kapitel 3

# Radonmessgeräte und Radondosimeter

Nach dem in Kapitel 1 die Grundlagen und die Notwendigkeit einer Radon-Personendosimetrie sowie die gesetzliche Lage in der Schweiz und in Ausland präsentiert wurde, wurden in Kapitel 2 verschiedene Methoden zur Durchführung einer Radon-Personendosimetrie vorgestellt, einerseits das aktuelle ortsbezogene Messverfahren und andererseits mögliche personenbezogenen Messmethoden. In diesem Kapitel werden nun die gesetzlichen Anforderungen an Radonmessgeräte, Radondosimeter und andere Dosimeter aufgezeigt, wie sie in der Verordnung des EJPD (Eidgenössisches Justiz- und Polizeidepartement) über Messmittel für ionisierende Strahlung (StMmV) vom 7. Dezember 2012 definiert sind [18].

### 3.1 Radonmessgerät

Radonmessgeräte sind in der StMmV definiert als „Messmittel zur Ermittlung der Radonaktivitätskonzentration“ (Anhang 1 StMmV). Dementsprechend besagen die Artikel 22 bis 24 StMmV, dass die Messgrösse  $\text{Bq}/\text{m}^3$  sein muss. Radonmessgeräte müssen zugelassen und eine Ersteichung muss vor Verwendung durchgeführt werden. Anschliessend müssen die Geräte alle vier Jahre von einer ermächtigten Eichstelle nachgeeicht werden. Die weiteren Anforderungen an Radonmessgeräte sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

### 3.2 Radondosimeter

Radondosimeter sind „Messmittel zur Ermittlung der Radonexposition“ (Anhang 1 StMmV), die Messgrösse ist daher  $\text{Bq h}/\text{m}^3$ . Radondosimeter müssen ebenfalls zugelassen werden. Im Gegensatz zu Radonmessgeräten müssen sie jedoch nicht geeicht werden, sondern alle zwei Jahre an einer Vergleichsmessung teilnehmen. Die weiteren Anforderungen an Radondosimeter sind in den Artikeln 25 bis 27 StMmV festgelegt und in Tabelle 3.1 zusammengefasst.



	Radonmessgeräte	Radondosimeter
	Radonaktivitätskonzentration	Radonexposition
Messgrösse	[Bq/m <sup>3</sup> ]	[Bq h/m <sup>3</sup> ]
Messbereich	[10 Bq/m <sup>3</sup> , 100 000 Bq/m <sup>3</sup> ] <sup>(1)</sup>	[50 kBq h/m <sup>3</sup> , 15 000 kBq h/m <sup>3</sup> ]
Linearität	$\Delta \leq 10\%$ <sup>(2)</sup>	$\Delta \leq 15\%$ <sup>(3)</sup>
Reproduzierbarkeit	$\sigma \leq 5\%$	$\sigma \leq 15\%$
Integrationszeit		mehr als einen Monat

<sup>(1)</sup> Die untere Grenze von 10 Bq/m<sup>3</sup> gilt bei einer Integrationszeit von einer Stunde

<sup>(2)</sup> Abweichung unter 10 % zwischen 10 Bq/m<sup>3</sup> und 10 000 Bq/m<sup>3</sup>

<sup>(3)</sup> Abweichung unter 15 % zwischen 50 kBq h/m<sup>3</sup> und 10 000 kBq h/m<sup>3</sup>

Tabelle 3.1: Übersicht über die Anforderungen an Radonmessgeräte und Radondosimeter gemäss StMmV [18]. Es ist zu beachten, dass die Angaben über die Linearität nur in einem bestimmten Bereich gelten, dieser ist kleiner als der Messbereich, der abgedeckt werden muss.

	Photonenstrahlung	Betastrahlung	Neutronenstrahlung
Messgrösse	$H_p(10)$ , $H_p(0.07)$	$H_p(0.07)$	$H_p(10)$
Messbereich $H_p(10)$	[0.1 mSv, 5 Sv]		[0.5 mSv, 5 Sv]
Messbereich $H_p(0.07)$	[1 mSv, 5 Sv]	[1 mSv, 5 Sv]	
Linearität	$\Delta \leq 15\%$ <sup>(1)</sup>	$\Delta \leq 15\%$ <sup>(1)</sup>	$\Delta \leq 30\%$ <sup>(1)</sup>
Reproduzierbarkeit	$\sigma \leq 10\%$	$\sigma \leq 10\%$	$\sigma \leq 50\%$
*			

<sup>(1)</sup> Angegebene Abweichungen zwischen 1 mSv und 5 Sv

\* Weitere Anforderungen: Energie-, Winkelabhängigkeit und Fading

Tabelle 3.2: Übersicht über die Anforderungen an Personendosimeter für verschiedene Strahlungsarten gemäss Dosimetrierordnung [5]. Auf die weiteren Anforderungen, wie Energie- und Winkelabhängigkeit sowie Fading, wird hier nicht weiter eingegangen.

### 3.3 Personendosimeter für Photonen-, Beta- und Neutronenstrahlung

Die Anforderungen an Personendosimeter für Photonen-, Beta- und Neutronenstrahlung sind in der Dosimetrierordnung geregelt [5] und in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Dabei gibt es noch weitere Anforderungen an Personendosimeter, wie Energie- und Winkelabhängigkeit der Messung sowie Fading, die in der Tabelle nicht dargestellt sind. Personendosimeter für Photonenstrahlung müssen die Tiefen-Personendosis  $H_p(10)$  und die Oberflächen-Personendosis  $H_p(0.07)$  messen können, Dosimeter für Betastrahlung nur die Oberflächen-Personendosis und Dosimeter für Neutronenstrahlung nur die Tiefen-Personendosis. Der Messbereich aller Dosimeter liegt im Bereich von 0.1 mSv bis 5 Sv. Dabei sind für Dosimeter für Photonen- und Betastrahlung eine Abweichung von 15 % und eine Standardabweichung von 10 % zulässig, im Gegensatz dazu dürfen die Abweichungen für Neutronendosimeter mit 30 % beziehungsweise 50 % für die Standardabweichung deutlich grösser sein.

## Kapitel 4

# Radon-Personendosimetrie

Im vorherigen Kapitel wurden die Anforderungen an Radonmessgeräte, Radondosimeter und persönliche Dosimeter für Photonen-, Beta- und Neutronenstrahlung gemäss StSV, StMmV und Dosimetrieverordnung präsentiert. Zudem wurde in Kapitel 1 dargelegt, wann eine Dosisabschätzung notwendig ist. Der Aktionsplan Radon beschreibt, wie der Radonschutz in der Schweiz weiterentwickelt werden soll. Ein zentraler Punkt in diesem Aktionsplan ist die Sicherstellung des Arbeitnehmerschutzes, wobei die Einführung der persönlichen Radondosimetrie und die Zulassung von Radon-Personendosimetern ein wichtiges Anliegen sind [19]. In diesem Kapitel soll nun diskutiert werden, was mögliche Anforderungen an solche Radon-Personendosimeter sein könnten. Dazu werden zuerst die Fragen geklärt, was Radon-Personendosimeter sind und was das Ziel und das Anwendungsgebiet sein sollen. Anschliessend werden die Messbereiche und die zu erwartende effektive Dosis diskutiert, bevor eine mögliche Aussage über das zeitliche Ansprechverhalten bei starken Schwankungen in der Radonkonzentration behandelt wird. Abschliessend wird noch die Notwendigkeit von weiteren Anforderungen diskutiert.

### 4.1 Einsatz von Radon-Personendosimetern

In Kapitel 2 wurden verschiedene Methoden präsentiert, wie die effektive Dosis durch Radonexposition abgeschätzt oder gemessen werden kann. Dabei ist nur die Methode der ortsbezogenen Messung zulässig um die effektive Dosis an radonexponierten Arbeitsplätzen gemäss StSV zu bestimmen. Die Methoden der personenbezogenen Messung entsprechen keiner anerkannten Radonmessung und können somit nicht für eine Abschätzung der effektiven Dosis gemäss StSV verwendet werden. In Zukunft soll es möglich werden, Messgeräte als Radon-Personendosimeter zuzulassen und damit die Dosisabschätzung durch personenbezogene Messungen möglich zu machen. Dass heisst, ein Radon-Personendosimeter ist ein Messsystem, das von der exponierten Person getragen wird und es erlaubt, die effektive Dosis durch Radonexposition mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen. Diese Messgenauigkeit sowie weitere Anforderungen sollen im nächsten Abschnitt geklärt werden, dabei wird unterschieden zwischen Messungen des Radongases, also der Radonexposition, und Messungen der Radonfolgeprodukte, also der potenziellen Alphaenergieexposition.

## 4.2 Anforderungen an Radon-Personendosimeter

Nun sollen die genauen Anforderungen an Radon-Personendosimeter diskutiert werden. Dabei werden die einzelnen Punkte, die auch bei den bisher vorhandenen Anforderungen für Radonmessgeräte und Radondosimeter vorgegeben sind, behandelt. Zuerst geht es um die Messgrösse und den Messbereich der abgedeckt werden soll. Anschliessend sind die Linearität und die Reproduzierbarkeit zu beachten. Schlussendlich wird das zeitliche Ansprechverhalten sowie weitere Anforderungen beschrieben.

### 4.2.1 Messgrösse

Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, gibt es zwei mögliche Ansätze um die effektive Dosis durch Radon zu bestimmen. Einerseits kann das Radongas direkt oder andererseits können die Radonfolgeprodukte gemessen werden, wichtig bei beiden Methoden ist jedoch, dass die exponierte Person das Messgerät während der Arbeitszeit permanent bei sich trägt und damit immer am Standort der Person gemessen wird.

#### Messung des Radongases

Typische Messgrössen bei der Messung des Radongases sind die durchschnittliche Radonkonzentration oder die gesamte Radonexposition. Beide Messgrössen haben Vor- und Nachteile und es gibt Gründe die für oder gegen die jeweilige Messgrösse sprechen.

In Abschnitt 1.2 wurde beschrieben, dass die effektive Dosis  $E$  durch Radonexposition, gemäss aktuell gültiger Dosimetrieverordnung, als Produkt der über ein Jahr integrierten Radonkonzentration während Personenaufenthalt  $JIRK$ , dem Gleichgewichtsfaktor  $F$  und dem Dosiskonversionsfaktor  $c_B$ , berechnet wird.

$$E = c_B F JIRK \quad (4.1)$$

Der Dosiskonversionsfaktor  $c_B$  gibt an, wie die Umrechnung der Messgrösse in Sievert ist und damit wie das (Lungen-)Krebsrisiko im Verhältnis zur Radonexposition steht. In der Dosimetrieverordnung wird ein Wert von  $c_B = 1.87 \times 10^{-5} \text{ mSv}/(\text{Bq h m}^{-3})$  vorgegeben [5], wobei dieser Wert aus einer Empfehlung der ICRP von 2010 folgt [2]. Diese Empfehlung ist das Ergebnis einer Analyse diverser Studien, welche die gesundheitlichen Folgen von Radonexposition untersucht haben, und wird international verwendet. Im Jahr 2017 wurde diese Empfehlung angepasst, wonach die Atemrate exponierter Personen berücksichtigt werden soll [1]. In der Schweiz wurde diese Anpassung noch nicht umgesetzt. Daher sollte der Dosiskonversionsfaktor nicht in die Messgrösse einer Radon-Personendosimetrie eingebracht werden, sondern weiterhin auf den Empfehlungen der ICRP basieren.

Damit bietet sich die Variante, dass das Radon-Personendosimeter die  $JIRK$  in Einheiten von  $\text{Bq h}/\text{m}^3$  misst. Somit ergibt sich die Radonexposition in  $\text{Bq h}/\text{m}^3$  als Messgrösse für Radon-Personendosimeter, die das Radongas direkt messen.

Aktive Radonmessgeräte, welche die Radonaktivitätskonzentration in  $\text{Bq}/\text{m}^3$  messen, können ebenfalls die Radonexposition durch eine einfache Berechnung ausgeben. Wird jeder Messwert der Radonkonzentration mit der Integrationszeit multipliziert und diese Werte anschliessend über die gesamte Messdauer summiert, erhält man die Radonexposition. Einige Geräte berechnen standardmässig die Radonexposition, damit wird die Belastung der Messkammer durch Radonfolgeprodukte überwacht.

Bei aktiven und passiven Messgeräten müsste der Gleichgewichtsfaktor durch eine separate Messung bestimmt werden, um die effektive Dosis zu berechnen. Eine Methode dafür müsste noch festgelegt werden.

## Messung der Radonfolgeprodukte

Die Messung der Radonfolgeprodukte kann in verschiedenen Messgrößen geschehen. Typische Beispiele sind die Gleichgewichtskonzentration in  $\text{Bq}/\text{m}^3$  und die potenzielle Alphaenergiekonzentration in  $\text{J}/\text{m}^3$ . Historisch wurde ebenfalls das Working Level verwendet, das heute nur noch von geringer Bedeutung ist. Alle Messgrößen müssen über die Zeit integriert werden, um eine Exposition zu erhalten. Diese kann anschliessend zu einer effektiven Dosis umgerechnet werden. Die Gleichgewichtskonzentration ist diejenige Radonaktivitätskonzentration, die bei einem Gleichgewichtsfaktor von 1 zur gemessenen potenziellen Alphaenergiekonzentration der Folgeprodukte führt. Daher folgt diese Messgrösse aus einer Umrechnung der potenziellen Alphaenergiekonzentration, welche damit die grundlegende Messgrösse darstellt. Somit sollte die potenzielle Alphaenergieexposition in  $\text{J h}/\text{m}^3$  als Messgrösse für Messsysteme, welche die Radonfolgeprodukte messen, verwendet werden. Ebenso kann mit den empfohlenen Umrechnungsfaktoren der ICRP direkt die effektive Dosis berechnet werden.

### 4.2.2 Messbereich

Der Messbereich gibt den Bereich an, den das Messgerät abdecken muss. Der Messbereich sollte alle alltäglichen aber auch Ausnahmesituationen abdecken. Für Radon-Personendosimeter könnte man sich hierfür an den bereits vorhandenen Vorgaben in der Schweiz und im Ausland orientieren. Zuerst wird wieder die Messung des Radongases und anschliessend die Messung der Radonfolgeprodukte behandelt.

#### Messung des Radongases

Für Radon-Personendosimeter, die direkt das Radongas messen, könnte man sich hierfür an den Vorgaben für Radondosimeter, den Radonmessgeräten oder den Dosimeter für Photonen-, Beta- oder Neutronenstrahlung der orientieren. Im vorherigen Abschnitt wurde begründet, wieso die Messgrösse von Radonexposition in  $\text{Bq h}/\text{m}^3$  naheliegend ist. Diese Messgrösse besteht aus der über die Zeit integrierten Radonaktivitätskonzentration und beinhaltet somit zwei Einflussgrößen:

- Die **Messdauer** oder Messperiode gibt an, wie lange das Messgerät im Einsatz ist. Hierbei sind betriebliche Abläufe massgebend. Wird das Radon-Personendosimeter während einem Jahr täglich für acht Stunden verwendet, ergibt sich eine weitaus höhere Messdauer, als wenn es nur während einem Monat täglich verwendet wird.
- Die **Radonaktivitätskonzentration** ist die zweite entscheidende Grösse. Da diese über die Zeit integriert wird und immer grösser oder gleich Null ist, ist die gesamte Radonexposition grösser bei einer höheren Radonaktivitätskonzentration.

Aufgrund der Wahl der Radonexposition in  $\text{Bq h}/\text{m}^3$  als Messgrösse für Radon-Personendosimeter scheint der Messbereich der Radondosimeter also naheliegende Wahl. Bei einer Wochenarbeitszeit von 42 h und 47 Kalenderwochen pro Jahr ergeben sich 1974 also etwa 2000 Arbeitsstunden pro Jahr oder 168 Arbeitsstunden pro Monat. Man betrachte zuerst die untere Grenze des Messbereichs von  $50 \text{ kBq h}/\text{m}^3$ . Wird nun ein Radon-Personendosimeter über ein Jahr während der Arbeitszeit verwendet, kann bei einer unteren Grenze des Messbereichs von  $50 \text{ kBq h}/\text{m}^3$  eine durchschnittliche Radonaktivitätskonzentration von  $25 \text{ Bq}/\text{m}^3$  nachgewiesen werden. Bei einer Verwendung über einen Monat liegt die untere Nachweisgrenze bei etwa  $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$ . Da Radon-Personendosimeter an radonexponierten Arbeitsplätzen zur Dosisabschätzung bei Überschreitung

des Schwellenwertes von  $1000 \text{ Bq/m}^3$  verwendet werden sollen, liegen die unteren Nachweisgrenzen von  $25 \text{ Bq/m}^3$  bei Verwendung über ein Jahr, beziehungsweise  $300 \text{ Bq/m}^3$  bei Verwendung über einen Monat, sehr tief. Betrachte man nun die obere Grenze von  $15\,000 \text{ kBq h/m}^3$  und führt die selben Berechnungen durch, so erhält man eine Nachweisgrenze von  $7500 \text{ Bq/m}^3$  für eine Messdauer von einem Jahr, respektive  $89\,000 \text{ Bq/m}^3$  bei einer Messdauer von einem Monat. Mit dem aktuellen Dosiskonversionsfaktor von  $c_B = 1.87 \times 10^{-5} \text{ mSv}/(\text{Bq h/m}^3)$  und einem angenommenen Gleichgewichtsfaktor von 1 entspricht der Messbereich von  $[50 \text{ kBq h/m}^3, 15\,000 \text{ kBq h/m}^3]$  einem Bereich für die effektive Dosis von  $[1 \text{ mSv}, 280 \text{ mSv}]$ .

Betrachtet man den Messbereich von Radonmessgeräten von  $[10 \text{ Bq/m}^3, 100\,000 \text{ Bq/m}^3]$ , so ergibt sich bei der Verwendung des Radon-Personendosimeters über einen Monat ein Messbereich von  $[1.7 \text{ kBq h/m}^3, 16\,800 \text{ kBq h/m}^3]$  oder bei Verwendung über ein Jahr  $[20 \text{ kBq h/m}^3, 200\,000 \text{ kBq h/m}^3]$ . Bei solch einem Messbereich müsste die technische Umsetzbarkeit und die Verfügbarkeit von Messgeräten weiter geprüft werden.

Ebenfalls denkbar wäre eine Orientierung des Messbereichs an den Messbereichen von Personendosimeter für Photonen-, Beta- oder Neutronenstrahlung. Diese liegen für die Oberflächen-Personendosis bei  $[1 \text{ mSv}, 5 \text{ Sv}]$ . Mit dem aktuellen Dosiskonversionsfaktor ergibt sich ein Messbereich von  $[53 \text{ kBq h/m}^3, 267\,380 \text{ kBq h/m}^3]$  bei einem Gleichgewichtsfaktor von 1. Bei geringeren Gleichgewichtsfaktoren sind diese Werte durch den Gleichgewichtsfaktor zu dividieren. Bereits bei  $F = 1$  müsste die technische Umsetzbarkeit der oberen Grenze des Messbereichs ebenfalls geprüft werden, insbesondere wird diese Grenze höher bei kleineren Gleichgewichtsfaktoren.

Zusammenfassend steht fest, dass mit einer Variation der Messdauer ein breiter Messbereich abgedeckt werden kann. Die Messdauer ist der Zeitraum in dem das Radon-Personendosimeter während der Arbeitszeit verwendet wird und kann zwischen einem und 12 Monaten variiert werden. Dies ermöglicht eine Anpassung des Messbereichs um einen Faktor 12. Damit scheint die Verwendung des bereits vorhandenen Messbereichs für Radondosimeter die Erwartungen für Radon-Personendosimeter zu erfüllen.

## Messung der Radonfolgeprodukte

Werden Messgeräte verwendet, welche die Radonfolgeprodukte messen, wurde oben die Messgrösse der potenziellen Alphaenergieexposition empfohlen. Da es in der Schweiz noch keine zugelassenen Radonmessgeräte mit dieser Messgrösse gibt, muss man sich anderweitig orientieren. Einerseits könnte man sich an den Vorgaben in Kanada, andererseits an den Personendosimetern für Photonen-, Beta- und Neutronenstrahlung orientieren.

In Abschnitt 1.3 wurden die Vorgaben in Kanada für die Messung der Radonfolgeprodukte für die Personendosimetrie präsentiert. Es wird zwar kein konkreter Messbereich definiert, der abgedeckt werden muss, aber es wurde ein Messbereich angegeben, indem bestimmte Voraussetzungen an die Messgenauigkeit erfüllt werden müssen. Dieser Bereich ist  $[177 \mu\text{J h/m}^3, 354 \mu\text{J h/m}^3]$ . Wendet man nun die Dosiskonversionsfaktoren der ICRP Empfehlung von  $3 \text{ mSv}/(\text{mJ h/m}^3)$  beziehungsweise  $6 \text{ mSv}/(\text{mJ h/m}^3)$  an, entspricht dieser Messbereich einer effektiven Dosis von  $[0.531 \text{ mSv}, 1.062 \text{ mSv}]$  beziehungsweise  $[1.062 \text{ mSv}, 2.124 \text{ mSv}]$ . Eine untere Grenze von ungefähr  $0.5 \text{ mSv}$  oder  $1 \text{ mSv}$  ist durchaus sinnvoll, da die durchschnittliche Strahlungsbelastung von Personen in der Schweiz  $6 \text{ mSv}$  pro Jahr beträgt und Werte unter  $0.5 \text{ mSv}$  kaum mehr signifikant für eine Dosimetrie sind [20]. Die obere Grenze des Messbereichs muss jedoch deutlich höher liegen als circa  $1 \text{ mSv}$  oder  $2 \text{ mSv}$ . Ab einer Dosis von  $10 \text{ mSv}$  pro Jahr durch Radon während der Arbeitszeit, gelten Personen als beruflich Strahlenexponiert. Damit folgt eine maximal erlaubte effektive Dosis durch alle Strahlenquellen bei der Arbeit von  $20 \text{ mSv}$  pro Jahr. Eine obere Grenze des Messbereichs von  $20 \text{ mSv}$  ist also naheliegend. Mit den entsprechenden Dosiskonversionsfaktoren ergibt sich ein Bereich von  $[0.17 \text{ mJ h/m}^3, 6.67 \text{ mJ h/m}^3]$ .

Zieht man die Anforderungen an Personendosimetern für Photonen-, Beta- und Neutronenstrahlung bei, können ähnliche Überlegungen angestellt werden. Personendosimeter für Photonenstrahlung müssen für die Oberflächen-Personendosis einen Messbereich von [1 mSv, 5 Sv] abdecken. Wie oben berechnet, entspricht 1 mSv einer potenziellen Alphaenergieexposition von  $177 \mu\text{J h/m}^3$  beziehungsweise  $354 \mu\text{J h/m}^3$ . 5 Sv ergeben  $0.83 \text{ J h/m}^3$  beziehungsweise  $1.67 \text{ J h/m}^3$  je nach Dosiskonversionsfaktor. Die technische Umsetzbarkeit der oberen Grenze müsste geprüft werden.

Analog zu der Messung des Radongases kann bei der Messung der Radonfolgeprodukte ebenfalls die Messdauer variiert werden. Werde die Messgeräte nur während einem Monat verwendet, kann die obere Grenze des Messbereiches über ein Jahr deutlich erhöht werden. Umgekehrt kann die untere Grenze reduziert werden, in dem das Messgerät während einem Jahr verwendet wird.

### 4.2.3 Linearität

Die Linearität beschreibt die Abweichung über den Messbereich, welcher in der Praxis erwartet wird. In Tabellen 3.1 und 3.2 ist ersichtlich, dass neben der erlaubten Abweichung noch ein Bereich spezifiziert ist, in dem diese Linearität erfüllt sein muss. Bei den Anforderungen an die Linearität wird teilweise festgelegt, wie präzise das Messgerät, also das Radon-Personendosimeter, sein muss. Dabei sind die Anforderungen an Radonmessgeräte, mit einer erlaubten Abweichung von 10 %, streng im Vergleich zu den Personendosimetern für Neutronenstrahlung, bei denen 30 % erlaubt sind. Der Wert von 15 % wird für viele Messgeräte verlangt, nebst Radondosimeter, Dosimeter für Photonen- und Betastrahlung auch für Extremitäten- und Augenlinsendosimeter. Wie in Tabelle 1.1 ersichtlich, verlangen die kanadischen Anforderungen an Messgeräte für Radonfolgeprodukte eine maximale Abweichung von +50% oder -33% im Bereich über  $354 \mu\text{J h/m}^3$ . Diese Anforderungen sind deutlich weniger streng als jene aus der schweizerischen Verordnung. Um eine gewisse Konsistenz mit bereits vorhandenen Messmitteln zu erhalten, ist der Wert von 15 % für Radon-Personendosimeter angemessen.

### 4.2.4 Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit gibt an, wie gross die Standardabweichung wiederholter Messungen mit den selben Bedingungen ist. Ähnlich wie bei der Linearität fallen die Anforderungen für Radonmessgeräte strenger aus, als diejenigen für Radondosimeter und Dosimeter für Photonen- und Betastrahlung. Die Anforderungen an die Reproduzierbarkeit für Personendosimeter für Neutronenstrahlung sind dabei wieder deutlich geringer. Da Radon-Personendosimeter dazu verwendet werden sollen, um die effektive Dosis einer Person durch Radonexposition zu messen, wäre es durchaus naheliegend die Anforderungen der Personendosimeter für Photonen- und Betastrahlung zu übernehmen. Eine zweite Möglichkeit wäre die Anforderungen für Radondosimeter zu übernehmen. Strengere Anforderungen könnten die Qualität der Messungen erhöhen, wobei die Gefahr besteht, dass nur sehr wenige oder sogar gar keine Messgeräte diese Anforderungen erfüllen. Hier sind bereits vorhandene Messgeräte zu prüfen, bevor ein Wert festgelegt wird.

### 4.2.5 Weitere Anforderungen

Die Dosimetrieverordnung enthält weitere Anforderungen an Personendosimeter für Photonen-, Beta- und Neutronenstrahlung, wie die Energieabhängigkeit, Winkelabhängigkeit und Fading. Diese weiteren Anforderungen sollen hier kurz diskutiert werden.

## Energieabhängigkeit

Da ein Radon-Personendosimeter nur die effektive Dosis von Radon und seinen Folgeprodukten messen soll, ist es nicht nötig Anforderungen an die Energieabhängigkeit zu stellen. Die häufigsten Radonisotope  $^{222}\text{Rn}$  und  $^{220}\text{Rn}$  und ihre Folgeprodukte sind gut erforscht und die Zerfallsarten, Strahlungsenergien und Halbwertszeiten bekannt. Ein entsprechendes Messgerät muss also nur diese Energie abdecken und korrekt verarbeiten können. Eine Energiekalibrierung des Messsystems ist somit vom Hersteller nötig, um die Anforderungen der Linearität und Reproduzierbarkeit oben zu erfüllen und muss für eine Zulassung nicht über eine weitere Bandbreite an Energien geprüft werden.

## Winkelabhängigkeit

Bei Personendosimeter für Photonen-, Beta- und Neutronenstrahlung ist die Orientierung des Dosimeters relativ zur Strahlungsrichtung variabel. Damit alle Strahlung auf die exponierte Person korrekt gewichtet werden kann, sind Anforderungen an die Winkelabhängigkeit notwendig. Solche Anforderungen sind für Radon-Personendosimeter nicht nötig, da die zu messende Strahlung bei den meisten Radonmesssystemen erst im Messgerät selber unter gleichbleibenden Bedingungen und Geometrien entsteht. Weiter werden bei der Prüfung und Zulassung die Messgeräte homogen aus allen Richtungen mit Radon belastet. Bei einer Anwendung der Messgeräte kann die Radonverteilung auf der Grössenordnung des Messgerätes als homogen angenommen werden. Daher ist es nicht nötig eine mögliche Winkelabhängigkeit zu prüfen oder vorzuschreiben.

## Fading

Ein verbreitetes Messverfahren bei Personendosimeter für Photonenstrahlung ist die Thermolumineszenz. Dabei wird die Energie der Strahlung von einem Material aufgenommen und gespeichert. Wird dieses Material aufgeheizt, wird die gespeicherte Energie in Form von Licht wieder abgegeben. Diese Abstrahlung ist direkt proportional zur absorbierten Energie. So kann bei der Auswertung die aufgenommene Dosis der Person ermittelt werden. Aufgrund von physikalischen Effekten geht ein Teil der gespeicherten Energie mit der Zeit verloren. Diesen Effekt nennt man Fading, ist abhängig vom verwendeten Material und kann bis zu mehrere Prozent pro Monat betragen [21]. Bei passiven Radondosimetern gibt es durchaus Nachweise für verschiedene Alterungs- und Fadingeffekte, [22] vergleicht mehrere Hundert Messungen, bei denen eine Messung über 12 Monate und gleichzeitig zwei aneinander anschliessende sechsmonatige Messungen durchgeführt wurden. Dabei fanden die Autoren, dass die Messergebnisse einer einzelnen Messung über 12 Monate tiefer waren, als diejenigen zweier aneinander folgenden Messungen über sechs Monate. Umgekehrt gibt es Studien, die belegen, dass eine reine Lagerung von CR-39 Detektoren keinen Einfluss auf ihre Messgenauigkeit haben [23]. Weitere Untersuchungen von Alterungs- und Fadingeffekten auf Radondosimeter und -messgeräte sind nötig, um die Fragestellung zu klären, ob solche Anforderungen für Radon-Personendosimeter nötig sind. Ausserdem muss untersucht werden, ob solche Effekte auch bei Messungen der Radonfolgeprodukte auftreten.

### 4.2.6 Zeitliches Ansprechverhalten

Das zeitliche Ansprechverhalten von (passiven) Radondosimetern ist Thema vieler Diskussionen, vor allem vor dem Hintergrund der Radon-Personendosimetrie. Bei mobilen Personen, die häufig zwischen verschiedenen (radonexponierten) Arbeitsplätzen mit unterschiedlichen Radonaktivitätskonzentrationen wechseln, wird vermutet, dass diese schnellen Änderungen der Radonkonzentrationen nicht ausreichend vom Messgerät erfasst werden können. Daher ist es eine

Radon-Personendosimeter		
	Radonexposition	potenzielle Alphaenergieexposition
Messgrösse	[Bq h/m <sup>3</sup> ]	[J h/m <sup>3</sup> ]
Messbereich	[0.05 MBq h/m <sup>3</sup> , 15 MBq h/m <sup>3</sup> ]	[0.17 mJ h/m <sup>3</sup> , 6.67 mJ h/m <sup>3</sup> ]
Linearität		$\Delta \leq 15\%$
Reproduzierbarkeit		$\sigma \leq 10\%$

Tabelle 4.1: Übersicht über die möglichen Anforderungen an Radon-Personendosimeter. Dabei könnten die Messgrösse Radonexposition oder potenzielle Alphaenergieexposition sein, die Werte für Linearität und Reproduzierbarkeit gelten für beide Varianten, können jedoch gelockert werden. Eine Verschärfung dieser Anforderungen könnte die technische Umsetzbarkeit eines solchen Messgerätes erschweren.

zentrale Frage, ob Anforderungen an mögliche Radon-Personendosimeter gestellt werden sollen, die das zeitliche Ansprechverhalten bei kurzzeitigen oder unterschiedlichen Expositionen quantifizieren. Einerseits gibt es die Möglichkeit, Anforderungen an das zeitliche Ansprechverhalten zu definieren. Andererseits können diese Anforderungen in das Zulassungsverfahren von Radon-Personendosimeter einfließen und von den Anforderungen der Linearität und der Reproduzierbarkeit aufgefasst werden. Radonmessgeräte werden aktuell bei drei verschiedenen Radonkonzentrationen getestet, dabei sind die Messwerte der Radonkonzentration massgebend. Bei Radon-Personendosimeter könnte ein zeitlicher Verlauf mit kurzzeitigen Schwankungen in der Radonkonzentration verwendet werden, um anschliessend die berechnete mit der gemessenen Exposition zu vergleichen und die Anforderungen der Linearität und Reproduzierbarkeit anzuwenden. Somit könnte eine explizite Formulierung von Anforderungen an ein zeitliches Ansprechverhalten umgangen, jedoch die Eignung als Radon-Personendosimeter trotzdem bestmöglich überprüft werden.

#### 4.2.7 Fazit

Basierend auf den Anforderungen an Radonmessgeräte, Radondosimeter und Personendosimeter für Photonen-, Beta- und Neutronenstrahlung und auf obigen Erläuterungen werden die Anforderungen an Radon-Personendosimeter wie in Tabelle 4.1 empfohlen. Dabei kann als Messgrösse die Radonexposition oder die potenzielle Alphaenergieexposition gewählt werden. Die Messgrösse der potenzielle Alphaenergieexposition ist besonders für Messgeräte, welche die Folgeprodukte messen, vorteilhaft. Es muss sichergestellt werden, dass der Dosiskonversionsfaktor korrekt gewählt werden kann. Die Werte bei der Linearität und Reproduzierbarkeit können verschärft oder gelockert werden.



## Kapitel 5

# Diskussion und Empfehlungen

Im vorherigen Kapitel wurden verschiedene Möglichkeiten präsentiert, wie die Anforderungen an Radon-Personendosimeter aussehen könnten. Dabei wurde immer unterschieden, zwischen Messgeräten, welche das Radongas oder die Radonfolgeprodukte messen. Da die Folgeprodukte des Radonzerfalls eingeatmet werden und hauptsächlich für die effektive Dosis einer exponierten Person verantwortlich sind, ist eine Messung der potenziellen Alphaenergiekonzentration oder -exposition durch Radonfolgeprodukte die naheliegende Lösung. Mit einem einzelnen Dosiskonversionsfaktor kann anschliessend die Dosis der exponierten Person berechnet werden.

Die über ein Jahr integrierte Radonkonzentration während der Aufenthaltszeit wird aktuell verwendet um die Dosis an radonexponierten Arbeitsplätzen abzuschätzen, die eine Radonaktivitätskonzentration von mehr als  $1000 \text{ Bq/m}^3$  aufweisen. Dabei ist für die Berechnung einer effektiven Dosis die Messung oder Abschätzung des Gleichgewichtsfaktors und anschliessend die Umrechnung mithilfe des Dosiskonversionsfaktors nötig.

Aus den in diesem Bericht präsentierten Untersuchungen ergeben sich folgende Empfehlungen für die Einführung einer persönlichen Radondosimetrie und die Zulassung von Radon-Personendosimetern. Liegt eine Überschreitung des Schwellenwertes vor muss eine Überwachung der effektiven Dosis der exponierten Personen durchgeführt werden. Diese kann entweder durch eine direkte Messung mit einem Radon-Personendosimeter oder, bei stationären Mitarbeitenden, zum Beispiel in einem Büro, durch eine anerkannte Messung der Radonaktivitätskonzentration, des Gleichgewichtsfaktors und der Aufenthaltszeit wie bisher verlangt, durchgeführt werden. Ein Radon-Personendosimeter wird von der Person getragen und misst die potenzielle Alphaenergieexposition durch Radonfolgeprodukte. Anhand der neusten Dosiskonversionsfaktoren wird die effektive Dosis berechnet, dabei wird körperliche Anstrengung berücksichtigt und der entsprechende Umrechnungsfaktor verwendet. Mit diesem Verfahren kann die effektive Dosis der exponierten Personen genau ermittelt und überwacht werden, jedoch wird kein unnötiger Aufwand erzeugt, bei Mitarbeitenden, die sich hauptsächlich am selben Arbeitsplatz aufhalten. Die empfohlenen Anforderungen an Radon-Personendosimeter sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Wird andernfalls die Radonexposition in der Einheit  $\text{Bq h/m}^3$  als Messgrösse für Radon-Personendosimeter zugelassen, kann der Gesundheitsschutz nur geringfügig optimiert werden und die Problematik der mobilen Arbeitnehmenden an radonexponierten Arbeitsplätzen wird nicht gelöst. Wird zwar die Radonexposition einer Person gemessen, verschiebt sich das Problem auf den Gleichgewichtsfaktor. Dieser muss weiterhin stationär gemessen oder abgeschätzt werden. Dadurch ist der Mehrwert einer solchen persönlichen Radon-Dosimetrie unbedeutend. Eine Anpassung der aktuell gültigen Grenzwerte könnte eine Lösung dafür sein. Anstatt ein Grenzwert von  $10 \text{ mSv}$  zu definieren, ab dem eine Person an einem radonexponierten Arbeitsplatz als

strahlenexponiert gilt, könnte ein Wert von  $500 \text{ kBq h/m}^3$  eingeführt werden, dieser entspricht einer effektiven Dosis von  $10 \text{ mSv}$  bei einem Gleichgewichtsfaktor von 1. Dadurch kann direkt aus den Messwerten die Einhaltung der Grenzwerte überprüft werden und keine separate Messung des Gleichgewichtsfaktors ist nötig. Allerdings ergibt sich damit ein grosser Unterschied zwischen den Grenzwerten der effektiven Dosis durch Radon und anderen Strahlenquellen und die Vergleichbarkeit geht verloren.

Weiter wäre es sinnvoll, nicht Arbeitsplätze sondern Personen als radonexponiert anmeldungspflichtig zu machen, analog dem Begriff „strahlenexponiert“. Damit würde die Dosisabschätzung und Radon-Personendosimetrie für Personen, die an radonexponierten und nicht radonexponierten Arbeitsplätzen arbeiten deutlich klarer werden und die Dosis müsste umfassender gemessen werden. Aktuell muss nur die effektive Dosis an radonexponierten Arbeitsplätzen über  $1000 \text{ Bq/m}^3$  abgeschätzt werden. Erreicht eine Person dort eine Abschätzung von minimal weniger als  $10 \text{ mSv}$ , arbeitet aber zusätzlich noch an einem anderen Arbeitsplatz, der nicht als radonexponiert gilt, und erhält dort eine Dosis von einigen  $\text{mSv}$ , kann die Summe über dem Grenzwert von  $10 \text{ mSv}$  liegen. Solche Situationen können aktuell nicht erfasst werden. Würde sich der Begriff „radonexponiert“ auf die Person beziehen, würde die gesamte Arbeitszeit berücksichtigt werden. Damit könnten solche Situationen ebenfalls korrekt erfasst und der Gesundheitsschutz bestmöglich sichergestellt werden.

## Kapitel 6

# Schlussfolgerung

In diesem Bericht wurden die Grundlagen der Radon-Personendosimetrie erläutert, es wurden verschiedene Messmethoden vorgestellt, die zur Messung oder Abschätzung der effektiven Dosis durch Radonexposition einer Person an radonexponierten Arbeitsplätzen eingesetzt werden können. Es wurden ebenfalls die aktuellen Anforderungen an Radonmessgeräte und -dosimeter, sowie für Personendosimeter für Photonen-, Beta- und Neutronenstrahlung präsentiert. Basierend auf diesen Anforderungen, weiteren Berechnungen und neusten wissenschaftlichen Erkenntnissen wurde eine Empfehlung für die Einstufungsparameter für die mögliche Zulassung von Radon-Personendosimeter aufgestellt. Dabei wird als Messgrösse die potenzielle Alphaenergieexposition empfohlen. Diese biete eine einfache Berechnung der effektiven Dosis ohne separate Messung des Gleichgewichtsfaktors. Die Anforderungen an Linearität und Reproduzierbarkeit können bei Bedarf verschärft oder gelockert werden. Das viel Diskutierte Thema des zeitlichen Ansprechverhaltens von möglichen Radon-Personendosimeter kann als Anforderung formuliert werden, jedoch ist es einfacher, diese Anforderungen im Zulassungsverfahren einfließen zu lassen. Dafür können die Messgeräte eine variierenden Radonkonzentration ausgesetzt werden, so wird das zeitliche Ansprechverhalten über die Linearität und Reproduzierbarkeit sichergestellt. Weitere Untersuchungen zu Alterungs- und Fadingeffekten können die Qualität und Messgenauigkeit der Radon-Personendosimetrie weiter steigern. In einem nächsten Schritt müssen verschiedene Messgeräte getestet werden, um zu prüfen, ob es Geräte gibt, die diesen Anforderungen entsprechen. Anschliessend können die gesetzlichen Grundlagen formuliert und umgesetzt werden.

# Literatur

- [1] F. Paquet et al. *ICRP Publication 137: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3*. Bd. 46. England, 2017.
- [2] M Tirmarche et al. *ICRP Publication 115. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon*. Bd. 40. England, 2010.
- [3] International Commission on Radiological Protection. *ICRP Glossary*. [http://icrpaedia.org/ICRP\\_Glossary](http://icrpaedia.org/ICRP_Glossary). Zugriff: Juli 2023. 2021.
- [4] *Strahlenschutzverordnung vom 26. April 2017 (StSV; SR 814.501)*.
- [5] *Verordnung des EDI über die Personen- und Umgebungsdosimetrie vom 26. April 2017 (Dosimetrieverordnung; SR 814.501.43)*.
- [6] *RICHTLINIE 2013/59/EURATOM DES RATES vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom*.
- [7] *Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung vom 27. Juni 2017 (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG, BGBl. I S. 1966)*.
- [8] *Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung vom 29. November 2018 (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV, BGBl. I S. 2034, 2036; 2021 I S. 5261)*.
- [9] *Radiation Protection Regulations vom 31. Mai 2000 (SOR/2000-203)*.
- [10] *Nuclear Safety and Control Act vom 20. März 1997 (S.C. 1997, c. 9)*.
- [11] Canadian Nuclear Safety Commission. *Licensed dosimetry services*. <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/nuclear-substances/dosimetry-service-providers/index.cfm>. Zugriff: September 2023. 2023.
- [12] *Dosimetry, Volume II: Technical and Management System Requirements for Dosimetry Services*. Ottawa, Kanada: Canadian Nuclear Safety Commission, 2020.
- [13] Bundesamt für Gesundheit BAG. *Messprotokoll für radonexponierte Arbeitsplätze*. Februar 2023.
- [14] Radonova Laboratories AB. <https://radonova.de>. Zugriff: September 2023. 2023.
- [15] Rad Elec Inc. <https://www.radelec.com>. Zugriff: September 2023. 2023.
- [16] Hermann Kolanoski und Norbert Wermes. *Teilchendetektoren: Grundlagen und Anwendungen*. 1st ed. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN: 9783662453506.
- [17] Henry F. Lucas. "Improved Low-Level Alpha-Scintillation Counter for Radon". In: *Review of Scientific Instruments* 28.9 (Dez. 2004), S. 680–683. ISSN: 0034-6748. DOI: 10.1063/1.1715975. eprint: [https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-pdf/28/9/680/8342421/680\\_1\\_1\\_online.pdf](https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-pdf/28/9/680/8342421/680_1_1_online.pdf). URL: <https://doi.org/10.1063/1.1715975>.

- [18] *Verordnung des EJPD über Messmittel für ionisierende Strahlung vom 7. Dezember 2012 (StMmV; SR 941.210.5).*
- [19] Bundesamt für Gesundheit BAG. *Aktionsplan Radon 2021 - 2030.* 2020.
- [20] Abteilung Strahlenschutz. *Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität in der Schweiz - Ergebnisse 2021.* Bern: Bundesamt für Gesundheit BAG, 2021. ISBN: 978-3-033-07889-5.
- [21] Hanno Krieger. *Strahlungsmessung und Dosimetrie.* 3., erweiterte und aktualisierte Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Spektrum, 2021. ISBN: 365833388X.
- [22] G Venoso et al. “In-field evaluation of the impact of ageing and fading effects on annual radon concentration measurements for two different techniques”. In: *Journal of radiological protection* 36.4 (2016), S. 922–933. ISSN: 0952-4746.
- [23] Mirosław Janik et al. “Effects of storage time and pre-etching treatment of cr-39 detectors on their response to alpha radiation exposure”. In: *International journal of environmental research and public health* 18.16 (2021), S. 8346–. ISSN: 1661-7827.