

Bericht zum Forschungsvorhaben

Untersuchung der Messmethoden und
messtechnischen Eigenschaften von Messgeräten
für Radon-220 (Thoron) und ihrer Eignung für den
Einsatz in nationalen Erhebungsprogrammen

Josef Irlinger
Jochen Tschiersch

Auftragnehmer:

Helmholtz Zentrum München
Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt GmbH
Institut für Strahlenschutz
Ingolstädter Landstraße 1
85764 Neuherberg

Laufzeit: 15.01.2015 – 15.06.2015

Inhalt

Inhalt	2
1. Zielsetzung der Arbeit.....	5
1.1. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
1.2. Planung und Ablauf des Vorhabens	6
2. Begriffsdefinitionen	8
2.1. Nomenklatur	8
2.2. Aktivitätskonzentration	9
2.3. Potentielle Alpha-Energiekonzentration	9
2.4. Gleichgewichtskonzentration	9
2.5. Gleichgewichtsfaktor F	10
2.6. Diffusionslänge L	10
2.7. Exposition.....	10
3. Thoron und seine Folgeprodukte	12
3.1. Transportmechanismen	13
3.2. Verteilung von Thoron in Innenräumen	14
3.3. Datenlage zu Thoron in Deutschland	15
3.4. Dosisabschätzung	15
3.5. Internationale Studien zu Thoron	16
4. Messmethoden	18
4.1. Messgrößen	19
4.2. Einflussfaktoren.....	19
4.3. Typprüfung.....	20
4.4. Anforderungen für Messgeräte in Wohnungen und an Arbeitsplätzen	21
4.4.1. Besondere Anforderungen für Messungen in Wohnungen.....	21
4.5. Verfügbare Messsysteme	22
4.6. Prototypen Messsysteme	22
5. Bewertung der Messverfahren und Messgerätesysteme	24
5.1. Bewertungskriterien	24
5.2. Gewichtung der Bewertungskriterien.....	25
5.3. Kostenermittlung.....	28
5.3.1. Gerätekosten.....	28
5.3.2. Auswertungskosten	28
5.3.3. Transportkosten.....	28
5.4. Beschreibung der Messgerätesysteme.....	30
5.4.1. DurrIDGE Rad7	30
5.4.2. Mi.am Radout.....	31

5.4.3.	Pylon WLx	32
5.4.4.	Radosys Raduet	33
5.4.5.	Saphymo AlphaGUARD PQ2000 PRO	33
5.4.6.	Sarad RTM1688-2	34
5.4.7.	Sarad DOSEman PRO	35
5.4.8.	Sarad EQF 3200	36
5.4.9.	TRACERLAB ERS-RDM-PLUS-2S	37
5.4.10.	Unattended battery-operated progeny monitor (UBPM)	38
5.4.11.	FLONEX Thoron Folgeproduktmonitor	39
5.4.12.	BARC DTSP Thoron Folgeproduktmonitor	40
5.5.	Bewertung der Messgerätesysteme	41
5.5.1.	Notenbereiche der einzelnen Kriterien	41
5.5.2.	Anmerkung zu Empfindlichkeit, Messdauer und Unsicherheiten	43
5.5.3.	Bewertungsmatrix	44
5.5.4.	Diskussion der Geräte sowie weitere Hinweise	47
6.	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	49

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung der Auftraggeberin übereinstimmen.

1. Zielsetzung der Arbeit

Durch die neue EU-Richtlinie zum Strahlenschutz 2013/59/EU-RATOM [1] könnte die Strahlenexposition durch das Radon Isotop Radon-220¹ Gegenstand strahlenschutzrechtlicher Regelungen werden. Während zur Verbreitung von Radon-222² in Deutschland ein großer Datensatz vorliegt, aus welchem sich eine durchschnittliche Radon Konzentration von ca. 50 Bq/m³ in Innenräumen ergibt [2], ist wenig über die Verteilung der Aktivitätskonzentration von Thoron in Deutschland bekannt. Dies gilt folglich auch für die durch Thoron verursachte mittlere effektive Jahresdosis.

Für die Durchführung von Erhebungsmessungen, welche als Basis rechtlicher Regelungen dienen können, müssen daher geeignete Messmethoden und Instrumente verfügbar sein. Diese Arbeit gibt einen Überblick zum aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik sowie zu gängigen und angewandten Messmethoden und Messtechniken, welche zur Bestimmung der Exposition durch Thoron und dessen Folgeprodukte eingesetzt werden können. Darüber hinaus wurden Kriterien für die fachliche Bewertung von Messverfahren und Messgerätesystemen hinsichtlich deren Eignung zur Anwendung in nationalen Erhebungsprogrammen erarbeitet und kommerziell verfügbare Systeme dementsprechend bewertet.

Der Bericht gliedert sich in mehrere Themenbereiche, die kapitelweise behandelt werden.

In Kapitel 2 findet sich eine Einführung in die gängigen Begriffe und Definition, welche im Umfeld der Radon und Thoron Dosimetrie für die Diskussion der Fragestellung nötig sind.

Kapitel 3 gibt eine kurze Übersicht zu den Unterschieden zwischen Radon und Thoron, sowie deren Verteilung in Innenräumen. Hier finden sich auch Ergebnisse von bereits veröffentlichten Thoron Konzentrationsmessungen und eine Abschätzung der jährlichen Exposition durch Thoron in Deutschland.

In Kapitel 4 werden verschiedenen Messmethoden und Prinzipien von Messgeräten für Thoron vorgestellt, sowie mögliche Einflussfaktoren und besondere Anforderungen diskutiert. Hier findet sich auch eine Liste mit den kommerziell verfügbaren Geräten.

Im 5. Kapitel werden Kriterien für die Eignung der Messsysteme zur Anwendung in nationalen Erhebungsprogrammen festgelegt. Die in drei Kategorien aufgeteilten Kriterien wurden dabei mittels einer Bewertungsmatrix systematisch gewichtet. Zusätzlich werden alle ermittelten Messsysteme ausführlich beschrieben, um eine transparente Bewertung zu ermöglichen.

Das 6. Kapitel fasst die gewonnen Kenntnisse und Ergebnisse zusammen und mögliche Verbesserungsvorschläge für erhältliche Messsysteme werden gegeben.

Während der Projektlaufzeit wurde dieser Bericht um weitere Ergebnisse der Literaturrecherche ergänzt, welche im Laufe des Forschungsvorhabens durchgehend fortgesetzt wurde. In den betreffenden Kapiteln ist dies entsprechend vermerkt. Unter anderem wurden die Hersteller von Messsystemen kontaktiert und die Messverfahren entsprechend einer entwickelten Bewertungsmatrix eingestuft, sowie die entsprechenden Geräte eingehend beschrieben und

¹ Im Folgenden als Thoron (Rn-220) bezeichnet

² Im Folgenden als Radon (Rn-222) bezeichnet

bewertet. Hieraus resultierte im Kontext mit der laufend ausgewerteten einschlägigen Literatur eine Fortschreibung des aktuellen Kenntnisstandes.

1.1. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Institut für Strahlenschutz am Helmholtz Zentrum München besitzt große Erfahrung in der Messung und Modellierung der Konzentrationen und Eigenschaften von Radionukliden in der Umwelt.

Für das oben genannte Vorhaben sind Erfahrungen in folgenden Arbeitsgebieten durch Publikationen in Fachzeitschriften dokumentiert:

- Charakterisierung und Expositionsbestimmung von natürlichen Radionukliden, insbesondere Radon, Thoron und deren Folgeprodukten [3],[4],[5],[6],[7],[8]
- Bewertung der Expositionsdaten mittels inhalationsdosimetrischer Berechnungen [9],[10],[11],[12],[13],[14],[15]
- Betrieb eines Radioanalytischen Labors mit Radonkammer, Thoronexperimentierhaus [16], Auswerteeinheiten für Kernspurdosimeter und diverser Messgeräten für Radon, Thoron und deren Folgeprodukten

Insbesondere wurden in der Vergangenheit mehrerer nationale sowie internationale Studien zur Exposition durch Thoron in Innenräumen durchgeführt. Dabei ergab sich auch die Notwendigkeit die Messsysteme in Zusammenarbeit mit Herstellern und in Eigenregie weiterzuentwickeln, sowie neue, innovative Messmethoden zu entwickeln. Mit dem Thoron Haus des Helmholtz Zentrum Münchens steht ein praxistaugliches Lehm-Modelhaus für Testmessungen zur Verfügung. Darüber hinaus verfügt das Institut über einen umfangreichen Gerätepark zur Identifizierung und Messung von Thoron und dessen Folgeprodukten in der Luft.

1.2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Bearbeitung des Vorhabens gliederte sich thematisch und organisatorisch in zwei Arbeitspakete:

- Aufarbeitung des gegenwärtigen Standes von Wissenschaft und Technik zur Thematik der messtechnischen Anforderung für die Bestimmung der durch Thoron in Innenräumen verursachten Exposition. Dazu zählen die Ermittlung der relevanten Messgrößen, Anforderung an Messgeräte, die bestimmenden Einflussgrößen, sowie eine Marktübersicht an verfügbaren Geräten. Des Weiteren wurde eine intensive Literaturrecherche durchgeführt und wichtige Untersuchungen und Ergebnisse anderer Stellen aufgeführt. Auf Basis verfügbarerer Daten wurde eine Abschätzungen des Beitrags durch Inhalation von Thoron (Rn-220) und dessen Folgeprodukten zur Exposition durch ionisierende Strahlung in Wohnungen, an Arbeitsplätzen und im Freien auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt.
- Auf Basis des vorangegangenen Teils wurden Kriterien für die fachliche Bewertung der Messverfahren und Messgerätesystemen festgelegt. Eine Gewichtungsmatrix wurde erstellt, um die verschiedenen Kriterien systematisch gegeneinander abzuwägen. Die potentielle Anbieter von Messgerätesystemen wurden ermittelt und Informationen über Kosten und Konditionen für Miete und Kauf der jeweiligen Messgerätesysteme eingeholt

und gelistet. Die recherchierten Messverfahren und Messgerätesysteme wurden entsprechend der Kriterien abgestuft und gewichteten in einer Matrix bewertet.

2. Begriffsdefinitionen

2.1. Nomenklatur

A_j	Aktivität eines Radionuklids j , entspricht der zu erwartenden Anzahl an Zerfällen pro Zeiteinheit, im Üblichen angeben in der SI Einheit Becquerel ($\text{Bq}=1/\text{s}$)
E_{pj}	Potentiell Alpha Energie (PAE) eines Atoms des Zerfallsprodukts j
λ_j	Zerfallskonstante des Radionuklids j
$t_{1/2}$	Halbwertszeit $t_{1/2} = \ln(2)/\lambda$ (s)
D	Diffusionskonstante (m^2/s)
L	Diffusionslänge (m)
E	Exhalationsrate von Radon oder Thoron ($\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$)
C_0	Gas-Aktivitätskonzentration des Mutternuklids (Thoron) in der Luft
C_j	Aktivitätskonzentration, welche die Aktivität eines spezifischen Radionuklids j in einem Volumen ist (Bq/m^3)
C_p	Potentielle Alpha-Energiekonzentration (PAEC) ist die Summe der PAE aller in einer Volumeneinheit vorhandenen Tochternuklide (J/m^3)
C_{eq}	Gleichgewichts Aktivitätskonzentration (EEC), gleicht einer Radon oder Thoron Konzentration welche sich mit all seinen Tochterprodukten im Gleichgewicht befindet und die gleiche PAEC besitzt wie eine im Ungleichgewicht befindliche Mischung (Bq/m^3)
F	Gleichgewichtsfaktor (keine Dimension)
f_p	Unangelagerter Teil, ist der Bruchteil von kurzlebigen Radon Folgeprodukten der PAEC, die nicht den Umgebungsaerosolen angelagert sind (keine Dimension)
P_p	Potenzielle Alpha-Energie-Exposition
P_{EEC}	Gleichgewichts-Exposition
N	Anzahl der registrierten Ereignisse der zu messenden Größe
n	Zählrate N/t
n_0	Untergrundzählrate
t	Messdauer
$u_{\text{rel}}()$	relativer Standardfehler
tph	tracks per hour, Rate mit den Spuren auf einem Detektor entstehen
cph	counts per hour, stündliche Zählrate eines Detektionssystems

2.2. Aktivitätskonzentration

Als Maß für die Radioaktivität wird im Allgemeinen die im Internationalen Einheiten System definierte Einheit Becquerel verwendet ($1 \text{ Bq} = 1/\text{s}$) [17]. Dabei gilt für den stochastischen Zerfallsprozess Formel (2-1) [18],

$$A_j(t) = \frac{\partial N_j(t)}{\partial t} = \lambda_j N_j(t) \quad (2-1)$$

Üblicherweise wird die Konzentration C_j von Radioaktiven Stoffen dann als Aktivität pro Volumeneinheit angegeben (Bq/m^3).

2.3. Potentielle Alpha-Energiekonzentration

Die potentielle Alpha Energie (PAE) ist die Summe der emittierten Alpha Energien E_{pj} eines Nuklids welches seine gesamte Zerfallsreihe durchläuft. Diese endet für Thoron zum Beispiel beim stabilen Blei Pb-208. Die PAE beschreibt die Energie welche möglicherweise in der Lunge freigesetzt werden könnte.

Die potentielle Alpha-Energiekonzentration (PAEC) C_p ist definiert als Summe der PAE aller in einer Volumeneinheit vorhandenen Tochternuklide [19]

$$C_p = \sum_j C_{pj} = \sum_j C_j E_{pj} / \lambda_j \quad (2-2)$$

wobei der Index j dem jeweiligen Nuklid in der Zerfallskette entspricht welches durch Emittieren eines Alphateilchens zerfällt. Im Allgemeinen wird die PAEC im SI-System mit der Einheit J/m^3 angegeben. Die PAEC lässt sich mittels eines Faktors auch in die Gleichgewichtskonzentration (Bq/m^3) umwandeln (für Radon: $1,80 \times 10^8 \text{ Bq}/\text{J}$, für Thoron $1,32 \times 10^7 \text{ Bq}/\text{J}$). Eine ältere entsprechende Einheit der PAEC war das Working Level ($1 \text{ WL} = 2,08 \cdot 10^{-5} \text{ J}/\text{m}$) [20], welche heute üblicherweise nicht mehr verwendet wird.

2.4. Gleichgewichtskonzentration

Die Gleichgewichtskonzentration (equilibrium-equivalent concentration, EEC) gleicht einer Radon oder Thoron Konzentration welche sich mit all seinen Tochterprodukten im Gleichgewicht befindet und die gleiche PAEC besitzt wie eine im Ungleichgewicht befindliche Mischung. Diese Definition führt zu folgender Relation

$$C_{eq} = \sum_j k_{pj} C_j \quad (2-3)$$

wobei $k_{pj} = \frac{E_{pj}}{\lambda_j} / \sum_j \frac{E_{pj}}{\lambda_j}$ dem anteiligen Beitrag des Nuklids j zur totalen PAE entspricht.

Die EEC wird zum Berechnen der akkumulierten Exposition verwendet, welche in eine entsprechende effektive Dosis umgerechnet werden kann.

Die Gleichgewichtskonzentration für Thoron und dessen Folgeprodukte berechnet sich nach Formel (2-3) folglich mit

$$C_{eq,Rn-220} = 7 \times 10^{-6} C_{Po-216} + 0,913 C_{Pb-212} + 0,087 C_{Bi-212} \quad (2-4)$$

wobei C_j der Konzentration (Bq/m^3) des jeweiligen Folgeprodukts im Index j entspricht. Die Konzentration von C_{Po-212} kann wegen seines geringen Faktors (8×10^{-12}) bei der Berechnung in Formel (2-4) vernachlässigt werden.

2.5. Gleichgewichtsfaktor F

Der Gleichgewichtsfaktor beschreibt das Ungleichgewicht zwischen einer Mischung von kurzlebigen Folgeprodukt und dem gasförmigen Mutternuklid im Hinblick auf die potenzielle Alphaenergie (PAE). Er ist definiert als Quotient der EEC (C_{eq}) und der Aktivitätskonzentration C_0 des Mutternuklids in der Luft [21]

$$F = \frac{C_{eq}}{C_0} \quad (2-5)$$

Der Gleichgewichtsfaktor wird verwendet um eine gemessene Radon Gaskonzentration in eine Gleichgewichtskonzentration zu konvertieren. Üblicherweise wird dieser nicht vor Ort ermittelt sondern ein empfohlener Durchschnittswert von 0,4 für Radon verwendet [21],[22],[23],[24]. Gemessenen Werte liegen im Bereich von 0,2-0,4 für übliche Aerosolteilchenkonzentrationen von 10^3 bis 10^4 Teilchen pro cm^3 [25].

2.6. Diffusionslänge L

Die Diffusionslänge L ist definiert als der charakteristischen Abstand welchen ein Radon oder Thoron Atom während seiner Halbwertszeit $t_{1/2}$ durchläuft, und berechnet sich nach [26]

$$L = \sqrt{\frac{D}{\lambda}} \quad (2-6)$$

wobei D der Diffusionskonstanten entspricht.

Im Falle eines durch Diffusion bestimmten Transportverhaltens kann der Konzentrationsverlauf in Abhängigkeit von der Distanz zum Ort der Radon bzw. Thoron Exhalation entsprechend Formel (2-7) beschrieben werden

$$C(z) = \frac{E}{\sqrt{D \lambda}} \times e^{-z/L} = C_0 \times e^{-z/L} \quad (2-7)$$

Hierbei ist C_0 die Aktivitätskonzentration direkt am Austrittsort ($z=0$), welche durch die Exhalationsrate E ($Bq/m^2/s$) bestimmt ist, und z der Abstand (m).

2.7. Exposition

Für die Risikoabschätzung der Belastung durch Thoron und dessen Folgeprodukte in Innenräumen haben bisher keine epidemiologischen Untersuchungen stattgefunden. Daher kann für die Thoron Risikobewertung, nur ein dosimetrischer Ansatz verwendet werden, um die Strahlendosis und

die damit verbundenen Risikofaktoren abzuschätzen. Errechnete Dosiskonversionsfaktoren (dose conversion coefficient, DCF) erlauben einen Zusammenhang zwischen potenzieller Alpha-Energiekonzentration (PAEC), sowohl für Radon und Thoron, mit der effektiven Strahlendosis herzustellen.

Die potenzielle Alpha-Energie-Exposition ist definiert als das Zeitintegral der potenziellen Alpha-Energiekonzentration in der Luft, C_p , der eine Person über einen gegebenen Zeitraum T , ausgesetzt ist

$$P_p(t) = \int_0^T C_p(t) dt \quad (2-8)$$

Die Größe (2-8) wird in der SI-Einheit $\text{h} \times \text{J}/\text{m}^3$ ausgedrückt. Eine weitere entsprechende Größe ist die Gleichgewichts-Exposition, welche durch Formel (2-9) gegeben ist.

$$P_{eq}(t) = \int_0^T C_{eq}(t) dt \quad (2-9)$$

und deren Einheit $\text{h} \times \text{Bq}/\text{m}^3$ ist. Der Umrechnungsfaktor von C_{eq}/C_p für Thoron ist $1,32 \times 10^7 \text{ Bq}/\text{J}$ und $1,80 \times 10^8 \text{ Bq}/\text{J}$ für Radon.

3. Thoron und seine Folgeprodukte

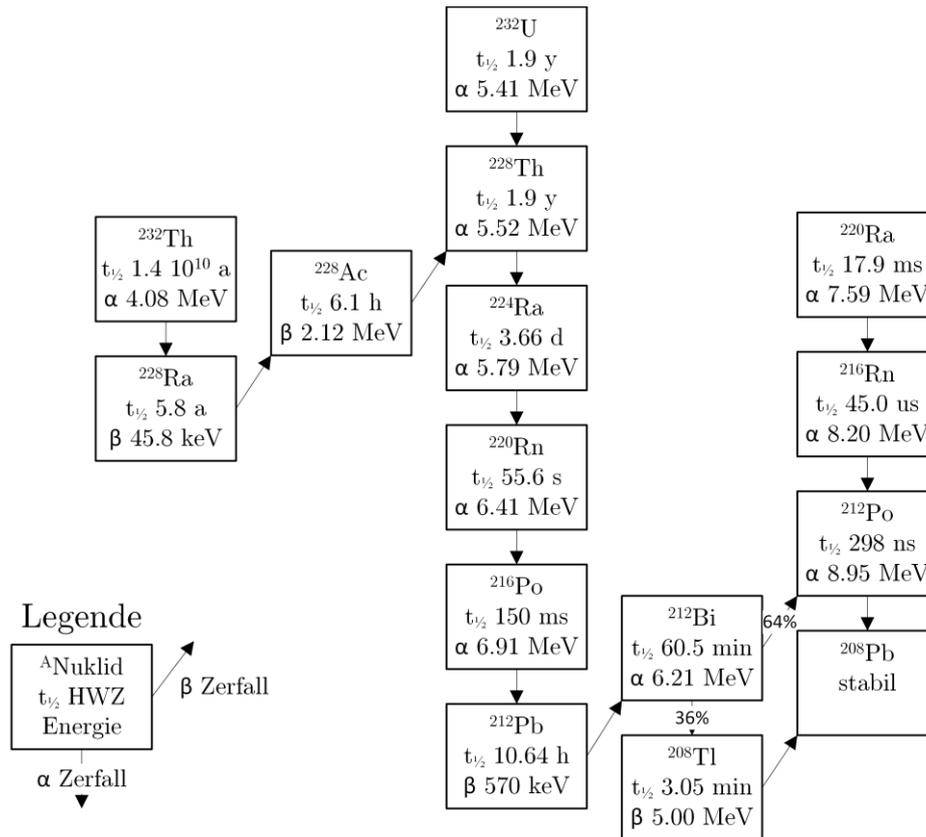


Abbildung 1: Ausschnitt aus der Thorium Th-232 Zerfallsreihe mit Angaben zu Zerfallsart, Energien und Halbwertszeiten.

Thoron ist ein radioaktives Edelgas welches durch Zerfall des natürlich vorkommenden Radionuklids Ra-224 aus der Thorium Zerfallsreihe entsteht [27] (siehe auch **Abbildung 1**).

Dabei ist die spezifische Konzentration von Th-232 in der Erdkruste ca. 4-mal größer als die von U-238 (2,7 mg/kg) [28], welches eine circa 3 mal kleinere Halbwertszeit ($4,5 \times 10^9$ a) besitzt. Folglich liegen deren Aktivität etwa in der gleichen Größenordnung.

Dies gilt demnach auch für Baumaterialien, wobei Untersuchungen zu Massenbaustoffen in Deutschland ergeben haben, dass die spezifische Aktivität von Th-232 generell unterhalb von 100 Bq/kg liegt (vgl. Ra-226 < 80 Bq/kg) [29]. Dennoch ist die Raumluft Konzentration von Thoron generell wesentlich geringer als die von Radon, bedingt durch die kurze Halbwertszeit von Thoron (55,6 s [30]). Ein Großteil des gasförmigen Thoron zerfällt, im Gegensatz zu Radon [31], bereits vor der Exhalation aus Wänden und Böden.

Darüber hinaus lässt sich ein exponentieller Abfall der Thoron Aktivitätskonzentration vom Austrittsort mit zunehmenden Abstand von diesem feststellen [32],[33], weshalb nach ca. einem halben Meter Abstand von Wänden und Böden bereits ein Großteil des gasförmigen Thoron zerfallen ist. Dessen radioaktive Tochterprodukte, welche für den Hauptteil der Dosis verantwortlich sind, verbleiben aber für längere Zeit in der Innenraumluft und verteilen sich homogen.

3.1. Transportmechanismen

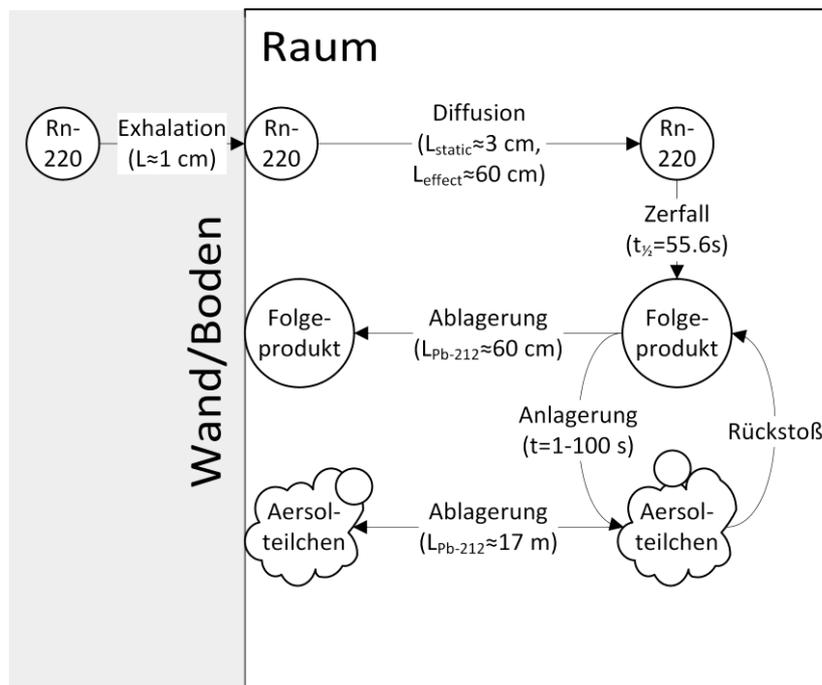


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung der Grundprozesse welche die Verteilung von Thoron und dessen Folgeprodukte beeinflussen, mit Angabe der entsprechenden Diffusionslängen und spezifischen Zeiten (Abbildung nach [34]).

Der Haupttransportmechanismus von Radon und Thoron in festen Materialien erfolgt durch Diffusion [31],[35], welcher sich durch das 1. Fick'schen Gesetz beschreiben lässt [36]. Der charakteristische Parameter der das Transportverhalten beschreibt ist die Diffusionskonstante. Dieser wird unter anderem auch als Diffusionskoeffizient bezeichnet, welcher bei Atomen oder Molekülen proportional zu $M^{-1/2}$ ist, wobei M die Masse des Atoms oder Moleküls darstellt [37]. Daher sind die Diffusionskoeffizienten von Radon und Thoron sowie der jeweiligen Isotopen Folgeprodukte in festen und gasförmigen Materialien identisch [38].

Im einfachen Fall, ohne Einwirkung äußere Kräfte, gilt Diffusion in stehender Luft (keine Ventilation) auch als Haupttransportmechanismus, wie zum Beispiel in Kalibrierkammern. Nach der Exhalation aus dem Material wird die Diffusion in der Luft aber im Allgemeinen wesentlich von den Umweltbedingungen beeinflusst, zu denen Druck- und Temperatur-Unterschiede (Konvektion) [36], sowie Luftfeuchte und Aerosolteilchenkonzentration und Verteilung [39] zählen.

Um diese Effekte zu berücksichtigen führt man eine sogenannte effektive Diffusionskonstante ein [40], welche eine makroskopische Beschreibung des Transports von Radon, Thoron und deren Folgeprodukte in der Luft erlaubt.

Für den unangelagerten und positiv geladenen Teil der Radon und Thoron Folgeprodukte wurden Werte zwischen 0.05×10^{-5} bis $10.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ gemessen [41]. Der Diffusionskoeffizient für neutrale Folgeprodukte liegt im Bereich von 6.8×10^{-6} bis $8,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [42]. Dabei gilt zu beachten das große Abweichungen aufgrund verschiedener Umweltbedingung möglich sind [19], siehe auch **Tabelle 1**.

Tabelle 1: Effektive Diffusionskonstanten für Radon und Thoron in Luft von Innräumen

Referenz	Diffusionskonstante [m^2/s]
Underhill [43]	$0,12 \times 10^{-4}$
Guo et al. [44]	$1,0-7,0 \times 10^{-3}$
Yamasaki et al. [40]	$5,0 \times 10^{-3}$
Zhou et al. [45]	$5,0 \times 10^{-3}$
Urosevic et al. [46]	$5,0 \times 10^{-3}$
Narula et al. [47] ³	$9,98 \times 10^{-6}$

Daher ist die maximale Diffusionslänge von Thoron in Luft und damit dessen Verteilung in Innenräumen nach Gleichung (2-7) sehr stark vom vor Ort vorherrschenden Umweltbedingen beeinflusst.

Für verschiedene Baumaterialien wurden Diffusionskonstanten für Radon im Bereich von 10^{-9} bis $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ gemessen [48], womit sich Diffusionslängen von ca. 0,3 mm bis 1,0 cm für Thoron durch Baumaterialien ergeben. Dies ist auch in **Abbildung 2** dargestellt, wobei hier zur Berechnung der Diffusionslänge die Diffusionskonstante in Beton ($1,30 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) angenommen wurde. Dies bedeutet, dass mögliche Thoron Emanationsquellen, welche zur Exposition in Innenräumen beitragen könnten, nur innerhalb der obersten Zentimeter der Wand- und Bodenflächen relevant sind, da bereits nach 6 Diffusionslängen 98,4 % des emanierten Thoron zerfallen sind. Dies trifft unter anderem auch für Lehm als Baumaterial zu [8].

3.2. Verteilung von Thoron in Innenräumen

Das Verhalten von Radon und seinen Folgeprodukten lässt sich unter der Annahme einer einfachen, konstanten und homogenen Konzentrationsverteilung im Raum als Modell gut beschreiben [49],[50]. Dabei reichen 5 Parameter zu exakten Berechnung aus, unter anderem die Luftwechselrate, die Anlagerungsrate von freien Folgeprodukten an Aerosole, die Depositionsraten von freien und angelagerten Folgeprodukten an die Raumboflächen, sowie der Anteil von abgestoßenen Pb-214 Atome von Aerosolen [51]. Das Modell ermöglicht eine hinreichend genaue Berechnung des Gleichgewichtsfaktors F sowie des unangelagerten Anteils f_p [52].

Bei der Verteilung von Thoron in Innenräumen ist allerdings dessen kürzere Halbwertszeit zu beachten, weshalb nicht mehr von einer homogenen Thoron Konzentrationsverteilung in Innräumen ausgegangen werden kann. Ein dementsprechend erarbeitetes und verifiziertes Modell [8],[53] für Lehmhäuser zeigt einen exponentiellen Abfall der Thoron Konzentrationen mit zunehmenden Abstand von den Raumwänden. Dies ist in Übereinstimmung mit anderen publizierten Ergebnissen [40],[45],[46],[54] für sonstige Raumtypen, welche zu dem Schluss kommen das sich vor allem der angelagerte Teil der Folgeprodukte Bi-212 und Pb-212 homogen im Raum verteilt.

Darüber hinaus konnte experimentell kein Zusammenhang zwischen Thoron und der Folgeproduktkonzentration festgestellt werden, d.h. der Gleichgewichtsfaktor von Thoron ist als unabhängiger Parameter zu betrachten [55],[56]. Bisher wurde meist ein Gleichgewichtsfaktor von 0.02-0.03 für Thoron angenommen, welcher aber mit einer hohen Unsicherheit behaftet ist [23].

³ Bei stehender Luft in geschlossenen Gefäßen

Aufgrund der genannten Punkte kann zur Expositionsbestimmung durch Thoron, im Gegensatz zu Radon, nicht die Messung der Thoron Gas Konzentration empfohlen werden. Vielmehr sollte eine entsprechende Messmethode die Folgeproduktkonzentration von angelagerten Pb-212 und Bi-212 bestimmen. Zum einen, da diese Folgeprodukte den Hauptteil zur Exposition beitragen, siehe Formel (2-4), und zum anderen da diese homogen im Raum verteilt sind. Dies ist auch die Empfehlung der Strahlenschutzkommission [57].

3.3. Datenlage zu Thoron in Deutschland

Tabelle 2: Ergebnisse von Messungen der Thoron Folgeprodukt Konzentration in Innenräumen

Referenz	Anzahl	Typ	Rn-220 EEC (Bq/m ³)		
			Min.	Max.	Ø
Keller et al. [58] ⁴	100	Wohnung	0,1	0,6	0,2
Reineking et al. [59]	6	Diverse	0,1	0,9	0,4
Peter [60]	23	Wohnung	0,1	1,0	0,5
Gierl et al. [61]	9	Lehmhaus	2,0	10,0	4,8

Bisher gibt es für Deutschland keine genügend große Anzahl an Messungen welche eine repräsentative Abschätzung der durchschnittlichen Thoron Gleichgewichtskonzentration erlauben würde. In **Tabelle 2** findet sich eine Auswahl und Zusammenfassung verfügbarer Messdaten [62]. In allen Fällen wurde die Thoron Folgeprodukt Konzentration in Innenräumen ermittelt. In den ersten drei Referenzen von **Tabelle 2** [58],[59],[60] ist nichts über die Beschaffenheit der Innenräume bekannt (Haustyp, Bausubstanz, Stockwerk). Die ermittelten Durchschnittskonzentrationen liegen jedoch innerhalb der gleichen Größenordnung, mit einem mittleren Wert der Thoron EEC von 0,4 Bq/m. In der neuesten Veröffentlichung zum Thema [61] wurden speziell Gebäude in Lehmbauweise untersucht. Die hier ermittelten Durchschnittskonzentrationen liegen eine Größenordnung über den vorhergehenden Ergebnissen.

Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen anderen internationalen Untersuchungen, in denen eine erhöhte Thoron Konzentration in Gebäuden in Lehmbauweise nachgewiesen werden konnte [63],[64],[65].

3.4. Dosisabschätzung

Auf Basis der verfügbaren, aber nicht repräsentativen Ergebnisse in **Tabelle 2** ist es möglich die Exposition durch Thoron abzuschätzen. Als Grundlage dafür dienen Dosiskonversionskoeffizienten die auf Basis eines dosimetrischen Modells für den menschlichen Atemtrakt (human respiratory tract model, HRTM [66]) berechnet wurden. Eine aktuelle Veröffentlichungen zum Thema errechnete einen Dosiskonversionskoeffizienten von 81,7 nSv/(Bq×h×m⁻³) für Erwachsene ab 15 Jahren [15]. Damit liegt der Wert ca. einen Faktor 2 über den bisher empfohlenen Konversionsfaktoren von 39 nSv/(Bq×h×m⁻³) [67] bzw. 40 nSv/(Bq×h×m⁻³) [22], und ist darüber hinaus mehr als einen Faktor 10 größer als der Dosiskonversionskoeffizient für Radon von 7,7 nSv/(Bq×h×m⁻³) [18].

⁴ Konvertiert von WL zu Bq/m³ durch Multiplikation mit Faktor 2,75×10²

Nach **Tabelle 2** ist mit einer mittleren EEC von ca. $0,4 \text{ Bq/m}^3$ in üblichen Räumen zu rechnen. Bei der Berechnung des Mittelwerts wurde auf die Einbeziehung der ermittelten Werte für Häusertypen in Lehmbauweise verzichtet. Somit ergibt sich eine Jährliche Dosis von ca. $0,12 \text{ mSv/a}$ bei einem 10 Stündigen täglichen Aufenthalt in den Wohnräumen. An Arbeitsplätzen ist bei einem täglichen Aufenthalt von 8 Stunden an 220 Tagen im Jahr mit einer Dosis von $0,06 \text{ mSv/a}$ zu rechnen. Im Freien beträgt die Thoron Gleichgewichtskonzentration mindestens einen Faktor 4 weniger [58], und liegt damit bei ca. $0,1 \text{ Bq/m}^3$. Bei einem täglichen Aufenthalt von 2 Stunden im Freien am Tag über das gesamte Jahr ergibt sich demnach eine Dosis von $0,01 \text{ mSv/a}$. Unter der Annahme, dass die restliche Zeit des Jahres auch in geschlossenen Räumen verbracht wird, ergibt sich eine effektive Dosis von $0,27 \text{ mSv/a}$ für ein Individuum in Deutschland.

Dennoch sollten für zukünftige Erhebungsmessungen auch speziell Häuser in Lehm- oder Erdbauweise vermessen werden, da hier unter Umständen höhere Thoron Folgeprodukt Gleichgewichtskonzentrationen zu erwarten sind. Der Dachverband Lehm e.V. geht von ungefähr 2 Millionen Gebäuden in Deutschland aus bei denen Erdbaumaterialien eingesetzt wurden [68]. Somit wäre der Anteil an Gebäuden mit potentiell erhöhter Thoron EEC in Deutschland circa 10%, bei einer Gesamtzahl von 18,5 Millionen Gebäuden in Deutschland [69] im Jahr 2013.

3.5. Internationale Studien zu Thoron

Dies deckt sich mit Ergebnissen aus internationalen Studien, welche einen mittleren Thoron Betrag zur effektiven Radon Dosis von ca. 8 bis 18 % feststellten. In einigen Fällen kann die Dosis verursacht durch Thoron Folgeprodukte die Radon Dosis auch überschreiten.

Tabelle 3: Internationale Ergebnisse von Messungen der Thoron Konzentration in Innenräumen

Referenz	Anzahl	Typ	Rn-220 EEC (Bq/m^3)			Dosis mSv/a	Beitrag %
			Min.	Max.	Ø		
Shang et al. [70]	164	Lehmhaus	-	15,8	$3,8 \pm 3,3$	1,44-4,62	13-57
Yonehara et al. [71]	-	trad. Haus	0	6	2,2	0,6	12-78
Kim et al. [72]	450	-	-	4,94	$0,9 \pm 0,7$	0,25	18
Chen et al. [73]	138	Haus	0,07	8,03	$0,7 \pm 1,0$	-	8
McLaughlin et al. [74]	205	Wohnung	0,1	3,8	0,5	0,35	18
Stojanovska et al. [75]	300	Wohnung	-	-	-	-	10
Dekkers et al. [76]	21	Wohnung	0	7,9	$2,4 \pm 2,0$	bis zu 3,0	-

Bei der in **Tabelle 3** aufgeführten Studien wurden durchweg passive Messsysteme zur Bestimmung der Gas- oder Folgeproduktkonzentrationen verwendet. Dabei wurden vor allem RADUET [77] Detektoren für die Bestimmung der Radon und Thoron Gas Konzentrationen benutzt, sowie ein experimenteller Folgeprodukt Monitor [78]. Bei der Chinesischen Studie (Shang 2005) ergab sich ein Gleichgewichtsfaktor von $F=0,016 \pm 0,013$. Andere Dosiswerte wurden aufgrund der ermittelten der Radon/Thoron Aktivitätskonzentration und mit Hilfe eines Gleichgewichtsfaktor aus der Literatur ($F=0,1$) bestimmt (Yonehara, Kim).

Chen et al. ermittelten die Konzentrationen mittels RADUET und einem passivem Folgeproduktmonitor. Auch hier zeigte sich eine hohe Variabilität des Gleichgewichtsfaktors $F=0,024$ mit einer geometrischen Standardabweichung von 2,7. Die McLaughlin Studie benutzt die gleichen Messsysteme, nennt aber keinen Gleichgewichtsfaktor. Die letzte Studie (Stojanovska) verwendet wieder ausschließlich RADUET Gas-Detektoren zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration.

Eine Pilotstudie (Dekkers) in den Niederlanden auf Basis des am NIRS entwickelten passiven Thoron Folgeprodukt Monitors fand ebenfalls erhöhte mittlere Thoron Folgeprodukt-Gleichgewichtskonzentrationen von $2,4 \text{ Bq/m}^3$, wobei in einigen Fällen die Jahresdosis durch Thoron die von Radon übersteigt. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Berichts lag noch kein Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben vor.

Anhand dieser Auflistung ist ersichtlich, dass es bisher keine Einheitliche Konvention zur Bestimmung der Thoron Exposition gibt. Da sich die Studien aufgrund der verwendeten Messmethoden, Messgrößen, Messdauer sowie verwendeten Dosiskonversionsfaktoren unterscheiden, sind die Ergebnisse aus **Tabelle 3** nur bedingt vergleichbar.

4. Messmethoden

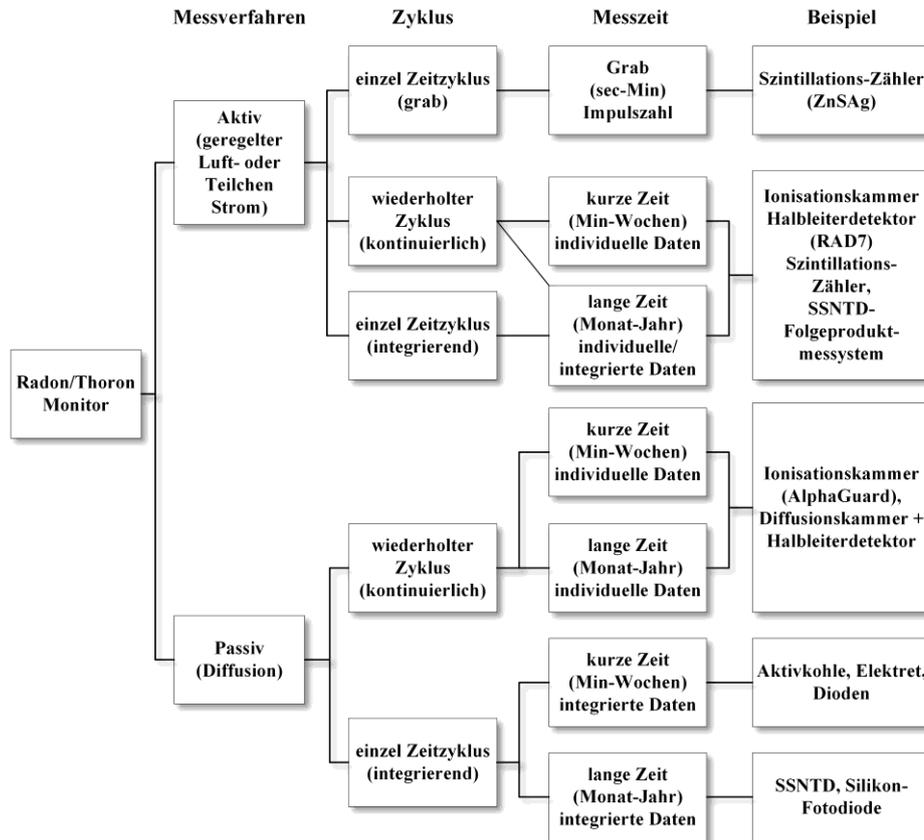


Abbildung 3: Kategorien für Radon und Thoron Messmethoden, nach [79].

Ziel aller Messmethoden ist die Erkennung der aufeinanderfolgenden radioaktiven Zerfälle der Radon/Thoron-Isotope und der produzierten Strahlungen ihrer Zerfallsprodukte. Zur Erkennung eines Zerfalls lassen sich prinzipiell alle Arten ionisierender Strahlung (Alpha, Beta, Gamma) nutzen.

Es gibt insgesamt 7 spezifizierte Detektionssonden [80]:

1. Silber-aktivierte Zinksulfid ZnS (Ag) Szintillatoren
2. Gammaskopische Verfahren (über Aktivkohle gesammeltes Thoron)
3. flüssig Szintillatoren
4. Ionisationskammer
5. Halbleiterdetektoren
6. Festkörper-Kernspurdetektoren (solid state nuclear track detector, SSNTD)
7. Entladung der polarisierten Oberfläche innerhalb einer Ionisationskammer

Dabei ist zu beachten, dass bei den Detektionsarten 2,3. 6 und 7 nur eine verzögerte Auswertung möglich ist, zum Beispiel durch die Zählung der Defektstellen in Kernspurdetektoren nach dem Ätzzvorgang im Labor.

Die direkte Bestimmung der Thoron Raumlufkonzentration über gammaskopische Verfahren ist zwar prinzipiell möglich, bedingt durch eine hohe und zudem ortsabhängige Untergrundzählrate, ist aber ein kompliziertes Messverfahren nötig [81].

Nach **Abbildung 3** können die Messmethoden zur Aktivitätsbestimmung von Thoron, genauso wie für Radon, in zwei Grundkategorien aufgeteilt werden. Man spricht entweder von aktiver

bzw. passiver Probennahme. Bei aktiver Probennahme wird durch das Erzeugen einer Druckdifferenz, z.B. durch eine Pumpe, die zu untersuchende Luft in ein Gefäß oder durch einen Filter geleitet um anschließend die durch radioaktive Zerfälle entstehende Strahlung mit einer Sonde zu detektieren. Neue innovative Methoden zur Probennahme erzeugen einen Teilchenstrom durch elektrostatische Abscheidung, und sind daher wie auch passive Systeme lautlos.

Bei passiven Messsystemen wird auf einen geregelten Luft/Teilchenstrom gänzlich verzichtet, und die radioaktiven Bestandteile der Luft erreichen das Probenvolumen bzw. die Oberfläche der Sonde unter anderem mittels Diffusion, verursacht durch Konzentrationsgradienten, oder durch Konvektion. Daher ist generell mit einer höheren Abhängigkeit von Einflussfaktoren bei passiver Probennahme zu rechnen. Davon ausgenommen sind Radon Gas Konzentrationsmessungen mittels passiven Diffusionskammern, da Radon im Allgemeinen homogen in Innenräumen verteilt ist.

4.1. Messgrößen

Zur Bestimmung der Thoron Exposition muss wahlweise dessen Aktivitätskonzentration mit Gleichgewichtsfaktor, die potentielle Alpha-Energiekonzentration oder die Gleichgewichtskonzentration bekannt sein.

Aufgrund der unter Abschnitt 3.2 diskutierten Punkte einer inhomogenen Thoron-Verteilung in Innenräumen und der daraus resultierten schlechte Bestimmbarkeit des Gleichgewichtsfaktors, kann eine Abschätzung der Exposition aufgrund von mittleren Thoron Konzentrationswerten nicht empfohlen werden. Dafür bereits vorhanden Messmethoden, z.B. beruhend auf Zwei-Kammern-System mit Kernspurdetektoren [82] oder alphaspektrometrischen Verfahren [5], ermöglichen zwar eine Ermittlung der Aktivitätskonzentration, diese ist aber nicht zur repräsentativen Bestimmung der Exposition aus den genannten Gründen verwendbar.

Für die Bestimmung der potentielle Alpha-Energiekonzentration sind sowohl ein integrierendes Messverfahren [83] als auch ein indirektes Messverfahren [84] für Kurzzeitprobennahmen spezifiziert (grab sampling), welches aus den abnehmenden Zählraten nach dem Sammelvorgang, durch Nutzung der Zerfallsgleichungen und Halbwertszeiten der Folgeprodukte, die Konzentration berechnet.

4.2. Einflussfaktoren

Verschiedene Faktoren können zu einer Verzerrung der Messung und daraus folgend zu nicht repräsentativen Ergebnissen führen. Dabei sind, je nach Messverfahren, Einflüsse zu beachten welche sich auf das Ansprechvermögen aufgrund physikalischer Effekte auswirken, beziehungsweise technisch oder organisatorisch bedingt sind [80]. Die wichtigsten Faktoren sind im Folgenden aufgeführt.

Einflussgrößen nach DIN 61577

- Temperatur und Luftdruck während der Probennahme
- Staub- und Aerosolpartikelkonzentration
- Relative Luftfeuchte und deren Einfluss auf die Probenentnahmevorrichtung
- Atmosphärischen Turbulenzen während der Probenahme
- Schwankungen der Radonaktivitätskonzentration und / oder potenzielle Alphaenergiekonzentration der kurzlebigen Radon-Zerfallsprodukte

-
- Konzentration von Radon-Zerfallsprodukten bei der Messung der Thoron-Isotopen
 - Querempfindlichkeit durch das Vorkommen anderer gasförmigen Radionuklide und Emitter von Alpha, Beta oder Gamma-Strahlung im Detektionsvolumen, einschließlich anderer Radon-Isotope und deren Zerfallsprodukte
 - Strahlungshintergrund während der Messung

Technisch und organisatorisch bedingte Einflussgrößen nach ISO 11665

- Luftdurchsatz der Probenentnahmevorrichtung auf die Probenahmen
- Detektorlagerbedingungen vor der Probenahme
- Stabilität der Probenahme- und Nachweissystems während der Messung
- Probenkonservierung und Lagerung (bei verzögerter Auswertung)
- Zeitliche Veränderung des Hintergrund der Messtechnik

4.3. Typprüfung

Auf Grund des besonderen Verhaltens von Thoron und dessen Folgeprodukten in der Atmosphäre und bei der Messung ist es erforderlich, die Prüfverfahren für diese Geräte zu standardisieren [85]. Ein geeignetes Messverfahren für die Thoron Exposition muss den aktuellen Anforderung entsprechen und die Konformität ist mittels bereits spezifizierten Prüfverfahren in Referenzatmosphären zu bestätigen [86]. Des Weiteren sollten auch für Thoron Messgeräte die maximal zugelassen Messabweichungen [86],[87] bei einer Änderung der Einflussfaktoren gelten.

Zur Qualitätssicherung auf dem Gebiet der Messung von Thoron und der Folgeprodukte ist daher eine Kalibrierkammer mit einer Referenzatmosphäre unabdingbar. Zu diesem Zweck wurde an der Physikalischen Technischen Bundesanstalt (PTB) im Rahmen eines BFS Projekts (St.Sch. 4453, [88]) ein Primärnormal für ein Thoron-Folgeprodukt-Referenzfeld entwickelt, welches den normativen Vorgaben entspricht [85] und die Erzeugung definierter Aktivitätskonzentrationen und Umweltbedingungen erlaubt. Im Besonderen es notwendig wichtige Einflussfaktoren/Umweltparameter zu variieren, wie z.B. die Luftfeuchte, Temperatur, Luftdruck, Aerosolteilchendichte und Verteilung. In der neuen Fassung der DIN 61577-4:2015-03 wurde festgelegt, dass in einem Referenzfeld die Umgebungs-Gammadosisleistung und der nichtangelagerten Anteil als vernachlässigbar zu betrachten sind, und somit nicht überwacht werden müssen. Der Service an der PTB zur Vorhaltung einer Primär- und Sekundärnormal-Messeinrichtung zur Rückführung und Qualitätssicherung wurde am 31.12.2014 eingestellt. Damit gibt es derzeit keine Möglichkeit in Deutschland Messgeräte für Thoron und dessen Folgeprodukte nach DIN 61577 zu kalibrieren.

Andere Internationale Institute, wie z.B. die Health Protection Agency (HPA, England), das Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IESN, Frankreich), das National Institute of Radiological Sciences (NIRS, Japan), das Paul Scherer Institut (PSI, Schweiz) oder das National Radiation Protection Institute (NRPI/SURO, Tschechien) bieten nach derzeitigem Kenntnisstand auch keinen Kalibrier- und Typtest-Service für Thoron Folgeprodukt Messgeräte an.

Daher ist die Einrichtung einer den DIN 61577-4 Spezifikation folgenden Thoron Referenzkalibrierkammer in einem nach ISO/IEC 17025 akkreditierten Labor Voraussetzung für die Überprüfung und Kalibrierung von Messgeräten zur Bestimmung der Thoron Exposition.

4.4. Anforderungen für Messgeräte in Wohnungen und an Arbeitsplätzen

Die Strahlenschutzverordnung sieht eine Überwachung der Strahlenexposition durch radioaktive Stoffe in der Luft mittels Messung der entsprechenden Konzentration dieser am Arbeitsplatz vor. Die Anforderungen an ein solches Gerät sind auf die Konformität des Messsystems mit dem Messzweck und auf regelmäßige Prüftest beschränkt. Außerdem sollte eine fortlaufende Messung gewährleistet sein [89].

Da es sich bei den meisten Messsystemen um aktive Geräte mit einer Einrichtung zur Beprobung der Luft handelt, ist einer der ausschlaggebenden Parameter für die Stabilität der Empfindlichkeit über die gesamte Messdauer die Aerosolkonzentration. Die gesammelten Aerosolpartikel werden meist auf Filtern oder Detektoren abgeschieden. Aufgrund des Messaufbaus ergibt sich daraus, je nach Aerosolkonzentration, nach einer gewissen Zeit der Bedarf des Filter- oder Detektorwechsels, beziehungsweise deren Reinigung. Ansonsten ist mit einer veränderten Detektions-Effizienz, zum Beispiel aufgrund der Absorption von Alphateilchen in der Aerosolschicht oder eines verminderten Luftstroms durch den Filter, zu rechnen.

Für einatembarem Staub liegt der Grenzwert nach TRGS 900 bei 10 mg/m^3 für Arbeitsplätze [90]. Daher sollte ein Messgerät auch bei Erreichen des Arbeitsplatzgrenzwerts kontinuierlich messen können. Der Hersteller hat dies mittels Angaben zum Einfluss der Aerosolkonzentration auf die Empfindlichkeit, idealerweise durch eine funktionale Abhängigkeit derer von der integralen Messdauer, nachzuweisen. Weitere Einflussfaktoren wie Umgebungstemperatur, Luftfeuchte und Luftdruck sollten die in [87] spezifizierten Anforderung zu den Mindestbetriebsbedingungen erfüllen.

4.4.1. Besondere Anforderungen für Messungen in Wohnungen

Aufgrund des geplanten Einsatzes der Messsysteme unter anderem zur Thoron Expositions-Bestimmung in bewohnten Innenräumen im Rahmen nationaler Erhebungsprogramme sind besondere Anforderungen zu berücksichtigen. Dazu gehören unter anderem mechanische Stabilität, Manipulationssicherheit, Transporteignung, eine lange autonome Betriebsdauer sowie insbesondere die Betriebslautstärke. Ein entsprechendes Messsystem sollte akustisch nicht wahrnehmbar sein um die Akzeptanz bei den Bewohnern des zu untersuchenden Raums zu gewährleisten. Als Richtwert sollte hier ein Schalldruck zwischen 20 bis 30 dB (0,15-0,4 sone), welches dem Geräuschpegel in einem sehr ruhigen Zimmer entspricht, nicht überschritten werden. Bei der weiteren Erfüllung der in Sektion 4.4 genannten Anforderung ist auch in Wohnungen mit einer Funktionalität der Messsysteme zu rechnen.

4.5. Verfügbare Messsysteme

Im Folgenden findet sich eine Auswahl (**Tabelle 4**) an kommerziell verfügbaren Messsystemen für die Bestimmung der Exposition durch Thoron. Dabei wurden die Geräte nach Art der Probennahme (passiv, aktiv), Messgröße, (Radon/Thoron Gaskonzentration oder jeweilige Folgeprodukt Konzentration, $RnFP_{222}/RnFP_{220}$), Messverfahren (kontinuierlich, integrierend) und nach Art der Stromversorgung (Netz, Batterie, nicht benötigt) klassifiziert.

Die Mehrheit der in **Tabelle 4** aufgeführten Messsysteme verwendet eine aktive Probennahme, ausschließlich durch Erzeugung eines geregelten Luftstroms, üblicherweise generiert durch ein Pumpensystem. Dies garantiert für gewöhnlich eine geringe Abhängigkeit von Einflussfaktoren sowie, je nach Volumenstrom der Pumpe, eine niedrige Nachweisgrenze.

4.6. Prototypen Messsysteme

Darüber hinaus befinden sich einige Messmethoden zur Bestimmung der Thoron Folgeproduktkonzentration, basierend auf SSNTD Detektoren, in der Entwicklung. Diese noch nicht kommerziell verfügbaren Messsysteme sind in **Tabelle 5** aufgeführt.

Dabei wurden die Geräte wieder nach Art der Probennahme (passiv, aktiv), Messgröße (Radon/Thoron Gaskonzentration oder jeweilige Folgeprodukt Konzentration, $RnFP_{222}/RnFP_{220}$), Messverfahren (kontinuierlich, integrierend) und nach Art der Stromversorgung (Netz, Batterie, nicht benötigt) klassifiziert.

Die Institute, welche sich für die Entwicklung verantwortlich zeichnen, sind dabei das Institut für Strahlenschutz am Helmholtz Zentrum München - Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt - (HMGU), das National Institute of Radiological Science (NIRS) in Japan, sowie die Abteilung für Radiological Physics and Advisory am Bhabha Atomic Research Centre (BARC) in Indien.

Der vom NIRS entwickelte passive Folgeprodukt Monitor wurde schon in zahlreichen Studien eingesetzt (siehe auch **Tabelle 3**). In der aktuellsten Studie zur Thoron Exposition in Holland [76] in der dieses Messsystem verwendet wird, findet sich in der Präsentation ein Hinweis auf eine kommerzielle Verfügbarkeit unter dem Namen FLONEX.

Tabelle 4: Übersicht von kommerziell verfügbaren Messsystemen zur Thoron Expositionsbestimmung

Hersteller	Probennahme		Messgrößen				Messverfahren		Versorgung
	aktiv	passiv	Rn-222	RnFP ₂₂₂	Rn-220	RnFP ₂₂₀	kontinuierlich	integrierend	Betriebsdauer
Durridge [92]	x		x		x		x		220 V
Mi.Am [102]		x	x		x			x	n.b.
Pylon [103]	x			x		x	x		220 V
Radosys [77]		x	x		x			x	n.b.
Saphymo [104]	x		x		x		x		220 V
Sarad DoseMan [105]	x			x		x	x		Batt. (40 h)
Sarad EQF [96]	x			x	x	x	x		220 V
Sarad RTM [95]	x		x		x		x		220V, Batt. (14d)
Tracerlab [106]	x		x	x	x	x	x		Batt. (17 h)

Tabelle 5: Übersicht von in Entwicklung befindlichen Prototyp-Messsystemen zur Thoron Expositionsbestimmung

Reference	Probennahme		Messgrößen				Messverfahren		Versorgung
	aktiv	passiv	Rn-222	RnFP ₂₂₂	Rn-220	RnFP ₂₂₀	kontinuierlich	integrierend	Betriebsdauer
BARC [107]	x			x		x		x	Batt. (1 h)
BARC [108]		x		x		x		x	n.b.
HMGU [3],[109]	x			x		x		x	Batt. (3 M)
NIRS [56],[78]		x				x		x	n.b.

5. Bewertung der Messverfahren und Messgerätesysteme

Anhand des ermittelten Standes von Wissenschaft und Technik (Kapitel 3 und 4) sowie der im Untersuchungsgebiet Deutschland zu erwartenden Aktivitätskonzentrationen von Radon-220 und dessen Zerfallsprodukten (Sektion 3.3) werden in diesem Kapitel Kriterien für die fachliche Bewertung von Messverfahren und Messgerätesystemen hinsichtlich deren Eignung zur Anwendung in nationalen Erhebungsprogrammen festgelegt.

Des Weiteren behandelt dieser Teil des Berichtes die Messgerätesysteme im Detail um dem Leser die verschiedenen Messverfahren zu erläutern und ihm an Hand wichtiger Kriterien eine Beurteilung zu ermöglichen. Dabei werden auch die Kosten der Systeme berücksichtigt.

Bei der anonymisierten und kritischen Analyse der auf dem Markt befindlichen Geräte fließen dabei auch Erfahrungen aus dem Umgang mit den Messgeräten in der Praxis ein, vor allem in Bezug auf Zuverlässigkeit und Qualität des Messsystems.

5.1. Bewertungskriterien

Die Kriterien, welche für die abgestufte Bewertung der in Sektion 4.54.4.1 und 4.6 ermittelten Geräte verwendet werden, lassen sich im Wesentlichen in drei Kategorien aufteilen. Dabei handelt sich um messtechnische und wirtschaftliche Kriterien, sowie um besondere organisatorische Anforderung im Hinblick auf den geplanten Einsatz bei nationalen Erhebungsmessungen (**Tabelle 6**).

Tabelle 6: Bewertungskriterien für Messverfahren und Messgerätesystemen

Messtechnische Kriterien	Kriterien für Erhebungsmessungen	Wirtschaftliche Kriterien
Einflussfaktoren	Bedienbarkeit	Abwicklungskosten
Messgrößen	Betriebsdauer	Kauf- / Mietkosten
Nachweiseffektivität	Lautstärke	Verfügbarkeit und Reife
Normenkonformität	Manipulationsfestigkeit	
Nulleffekt	Mechanische Stabilität	

Einflussfaktoren sind spezifisch abhängig vom Messsystem wobei die wichtigsten in Sektion 4.2 aufgeführt wurden. Die Messgrößen wurden unter Punkt 4.1 diskutiert. Der Punkt Nachweiseffektivität fasst die Kriterien Empfindlichkeit, Messbereich, Messunsicherheit, Integrationszeit und Messdauer zusammen. Diese bestimmen in welchem Zeitrahmen die zu erwartende Exposition mit entsprechender Unsicherheit ermittelt werden kann. Das Kriterium Normenkonformität bezieht sich auf die technische Übereinstimmung des Messsystems mit normativen Spezifikationen (IEC 61577 / ISO 11665 Reihe). Der Nulleffekt bezeichnet den Effekt von registrierten Zerfällen trotz der Abwesenheit der eigentlich zu messenden Strahlung. Damit zählt dieser zu den Einflussfaktoren, wird hier aber im Einzelnen aufgeführt, da sich dadurch spezielle Anforderungen für Transport und Durchführung von Messungen ergeben. So muss z.B. bei Kernspurdetektoren ein weiterer Detektor als sogenannten Blank verwendet werden um den Nulleffekt, z.B. bedingt durch Exposition vor oder während des Transports, zu bestimmen.

Die Punkte Bedienbarkeit, Betriebsdauer, Lautstärke, Manipulationsfestigkeit und Mechanische Stabilität sind vor allem für den langfristigen Einsatz von Messgeräten in bewohnten Räumen bei fachlich nicht geschultem Personal von Bedeutung. Hier ist ein Gerät ohne Bedienmöglichkeit optimal, um etwaige Manipulationen der Messgeräte ausschließen zu können. Zudem ist ein autonomer Betrieb über die gewählte Messzeit sowie eine stabile Bauweise (Schutz bei Geräte-Stürzen, mechanischen Schlägen) wünschenswert.

Bei den wirtschaftlichen Faktoren der Abwicklungs-, Kauf- und Mietkosten sowie Verfügbarkeit und Reife der Messgeräte gibt es, bedingt durch deren unterschiedlichen Aufbau, zum Teil große Differenzen. Zu den Abwicklungskosten zählen Kosten für die organisatorische Durchführung, Transportkosten, als auch Kosten für Auswertung.

5.2. Gewichtung der Bewertungskriterien

Die Gewichtungsfaktoren legen eine relative Bedeutung fest, die den einzelnen Kriterien bei der Bewertung zukommen soll. Zur systematischen Bestimmung der Gewichtungsfaktoren wird eine Bewertungsmatrix verwendet. Sie erlaubt die Kriterien jeweils einzeln gegeneinander zu werten. Dabei werden alle entscheidenden Kriterien in Reihen (Index i) und Spalten (Index j) aufgeführt. In jeder Reihe wird jeweils ein Kriterium einzeln gegen alle anderen Kriterien gewichtet. Für die Punkteverteilung wurde dabei folgende Konvention gewählt [91]:

- 2:0 Zeilenkriterium wichtiger als Spaltenkriterium ($K_{ij} > K_{ji}$)
- 1:1 Zeilenkriterium gleich wichtig als Spaltenkriterium ($K_{ij} = K_{ji}$)
- 0:2 Zeilenkriterium weniger wichtig als Spaltenkriterium ($K_{ij} < K_{ji}$)

Da auch jedes Kriterium gegen sich selbst gewichtet wird, ist die Diagonale der Matrix nach obiger Konvention demnach mit Einser Werten gefüllt ($K_{ij} = 1$ für $i=j$). In der jeweiligen Spalte ist dann nach obiger Konvention der entsprechende Zahlenwert einzutragen.

Aus der Summe der in einer Reihe vergebenen Punktezahl für ein Kriterium ergibt sich die relative Wichtigkeit gegenüber den anderen Kriterien. Diese einzelne Summe lässt sich auf die Gesamtsumme aller vergebenen Punkte normieren und ergibt somit den relativen Gewichtungsfaktor.

Aufgrund der besonderen Anforderungen für ein Thoron Expositions-Messsystem sind diese, vor allem im Hinblick auf die erforderlichen Typprüfungen, anhand der messtechnischen Kriterien zu bewerten. Daher werden messtechnische und wirtschaftliche/technische Kriterien separat gewichtet.

Die Gewichtungsfaktoren **G** der technischen und wirtschaftlichen Kriterien sind in **Tabelle 7** aufgeführt, welche in diesem Bericht verwendeten wurden. Dabei wurden alle in Sektion 5.1 genannten Kriterien berücksichtigt. Es zeigt sich, dass vor allem die Lautstärke, Verfügbarkeit und Reife sowie die Kosten entscheidende Kriterien sind.

Tabelle 7: Systematisch ermittelte Gewichtungsfaktoren für die technischen und wirtschaftlichen Auswahlkriterien

	Bedienbarkeit	Betriebsdauer	Lautstärke	Manipulationsfestigkeit	Mechanische Stabilität	Abwicklungskosten	Kauf- / Mietkosten	Verfügbarkeit und Reife	Σ	G
Bedienbarkeit	1	1	0	1	2	1	1	1	8	0,13
Betriebsdauer	1	1	2	1	0	0	0	0	5	0,08
Lautstärke	2	0	1	2	1	2	2	2	12	0,19
Manipulationsfestigkeit	1	1	0	1	0	0	0	0	3	0,05
Mechanische Stabilität	0	2	1	2	1	0	0	0	6	0,09
Abwicklungskosten	1	2	0	2	2	1	0	0	8	0,13
Kauf- / Mietkosten	1	2	0	2	2	2	1	2	12	0,19
Verfügbarkeit und Reife	1	2	0	2	2	2	0	1	10	0,16
Σ									64	1,00

In **Tabelle 8** finden sich die in diesem Bericht verwendeten Gewichtungsfaktoren G_M für die in Sektion 5.1 genannten messtechnischen Kriterien. Dabei zeigt sich, dass vor allem die Messgröße, Empfindlichkeit und Messunsicherheit entscheidende Kriterien sind. In Summe sind allerdings die Abhängigkeiten der Empfindlichkeit eines Messsystems von Einflussfaktoren wie Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Turbulenz und Aerosolkonzentration entscheidend, welche sich auf ca. 50% summieren.

Tabelle 8: Systematisch ermittelte Gewichtungsfaktoren für die messtechnischen Auswahlkriterien

	Messgröße	Temperatur Einfluss	Luftfeuchte Einfluss	Luftdruck Einfluss	Luftturbulenz Einfluss	Aerosolkonzentration	Querempfindlichkeit	Empfindlichkeit	Messbereich	Unsicherheit	Integrationsdauer	Messdauer	Nulleffekt	Normenkonformität	Σ	G_M
Messgröße	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	27	0,14
Temperatur Einfluss	0	1	1	0	0	0	0	1	2	0	2	2	2	2	13	0,07
Luftfeuchte Einfluss	0	1	1	0	0	0	0	0	2	0	2	2	2	2	12	0,06
Luftdruck Einfluss	0	2	2	1	0	0	0	0	2	0	2	2	2	2	15	0,08
Luftturbulenz Einfluss	0	2	2	2	1	1	0	1	1	0	2	2	2	2	18	0,10
Aerosolkonzentration	0	2	2	2	1	1	0	0	2	0	2	2	2	2	18	0,10
Querempfindlichkeit	0	2	2	2	2	2	1	0	0	0	2	2	1	2	18	0,10
Empfindlichkeit	0	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	22	0,12
Messbereich	0	0	0	0	1	0	2	0	1	1	2	1	1	1	10	0,05
Unsicherheit	0	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	1	21	0,11
Integrationszeit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	1	0,01
Messdauer	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	0	2	5	0,03
Nulleffekt	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	2	1	2	7	0,04
Normenkonformität	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	2	0,01
Σ															187	1,00

5.3. Kostenermittlung

Für die Durchführung von Typtest bzw. Erhebungsmessungen werden in diesem Bericht anfallende Materialkosten, Gerätekosten, Personalkosten sowie Transport- und Fremdleistungskosten berücksichtigt.

5.3.1. Gerätekosten

Zur Ermittlung der Kosten für die Miete oder Kauf von Messsystemen wurden Hersteller oder Lieferanten der in **Tabelle 4** und **Tabelle 5** genannten Geräte kontaktiert. Bei den angebenen Preisen handelt es sich um Nettopreise. Beim Import von Messgeräten aus dem Ausland können weiterhin Zollkosten anfallen, die hier aber nicht berücksichtigt werden.

Bei Geräten die nur aus dem Ausland bezogen werden können sind die Angebotspreise in der Landeswährung angegeben, sowie der Preis in Euro mit dem Datum des Wechselkursstandes, welcher zur Konvertierung genutzt wurde.

5.3.2. Auswertungskosten

Zur Ermittlung der gemessenen Werte eines Messsystems und deren Archivierung sind je nach Detektionsprinzip unterschiedliche Schritte erforderlich. Bei Kernspurdetektoren kann zum Beispiel ein chemisch-optisches Verfahren eingesetzt werden um die Spurenanzahl auf dem Detektor zu ermitteln. Bei elektrischen Messsystemen kann die Messgröße meist über ein Display oder eine Software ausgelesen werden. Je nach System unterscheiden sich daher der Zeitaufwand sowie die Kosten für die Auswertung.

Bei Geräten mit verzögerter Auswertung werden daher zum Teil Systemkosten angeben, welche die Kosten für die Ermittlung der Messgrößenwerte bereits beinhalten, beziehungsweise Kostenpauschalen vom Lieferanten. Bei elektronischen Messsystemen welche am PC ausgewertet werden können, werden die Kosten anhand von Zeiteinheiten abgeschätzt. Eine Zeiteinheit ZE entspricht dabei einer Stunde. Der Zeitaufwand zum Auslesen der Werte beinhaltet die Installation der benötigten Software, den Auslesevorgang, sowie die Archivierung und Versand der Daten. Als Bezugspreis für eine Zeiteinheit wird der zurzeit gültige Tarif für eine Techniker Arbeitsstunde von 39,70 EUR am Institut für Strahlenschutz des Helmholtz Zentrums München herangezogen (Buchungsstand 27.01.2015). Inklusive des Stellengemeinkosten- (36,93%) sowie des Verwaltungsgemeinkostensatzes (13,94%) ergibt sich ein Nettopreis von 59,90 EUR für eine Arbeitsstunde.

5.3.3. Transportkosten

Je nach Gewicht und Größe des Messsystems unterscheiden sich Verpackungsaufwand und Transportkosten. In **Tabelle 9** finden sich die für diesen Bericht genutzten Kostenpauschalen zur Abschätzung der Transportkosten für den Transport innerhalb Deutschland. Anfallende Transportkosten für Geräte die vom Hersteller/Vertreiber geliefert werden, sind extra ausgewiesen. Es handelt sich um Bruttopreise.

Tabelle 9: Veranschlagte nationale Transport- und Verpackungskosten für verschiedene Größen

Gewicht	Maximalmaße	Versandkosten in EUR	Verpackungspauschale in EUR
bis 1 kg	35×25×5 cm	2,40	2
bis 2 kg	60×30×15 cm	4,99	5
bis 5 kg	120×60×60 cm	5,99	5
bis 10 kg	120×60×60 cm	7,49	5
bis 31,5 kg	120×60×60 cm	13,99	10

5.4. Beschreibung der Messgerätesysteme

In diesem Teil des Berichts werden die verschiedenen Messverfahren zum Nachweis der Aktivitätskonzentration von Thoron und dessen Folgeprodukte in Luft näher behandelt. Dabei werden die Verfahren und Methoden von zur Verfügung stehenden (Sektion 4.4.1 und 4.6) Messsystemen dargestellt, sowie die wichtigsten Kriterien welche zur Bewertung nötig sind, aufgeführt. Bei den angegebenen Unsicherheiten werden nur systematische Fehler nach [57] oder Herstellerangaben einbezogen, da statistische Fehler von mehreren Faktoren wie Konzentration, Sensibilität sowie Messzeitraum abhängen. Nicht zu allen Kriterien lassen sich Angaben finden. In einem solchen Falle werden Platzhalter *keine Angabe* (k.A.) anstelle der numerischen Werte verwendet.

5.4.1. DurrIDGE Rad7

Hersteller:	DURRIDGE Company, Inc. 524 Boston Road Billerica, MA 01821-2812 USA http://www.durrIDGE.com
Messprinzip:	Es handelt sich um ein zeitaufgelöstes Messverfahren mit einem Halbleiterdetektor als Sonde. Während des variablen einstellbaren Messintervalls wird Raumluft durch einen Filter in die innere Messkammer des Gerätes gesaugt. Auf dem Filter scheiden sich Aerosole und Folgeprodukte ab, somit kann das Gerät nur Gasaktivitätskonzentrationen nachweisen. In der Messkammer selbst werden die neu entstandenen Folgeprodukte mittels eines elektrischen Feldes auf den Halbleiter Detektor abgeschieden (elektrostatische Sammlung). Dieser registriert kontinuierlich Alphateilchen aus Zerfällen, welche mittels eines spektrometrischen Verfahrens den jeweiligen Folgeprodukten zugeteilt werden. Die entsprechende Aktivitätskonzentration wird in Echtzeit berechnet und auf einem Display, bzw. Ausdruck, dargestellt. Der zeitliche Verlauf lässt sich mit einer entsprechenden Software (Capture) auslesen.
Aufbau:	17,7 L Gehäuse (29,5 cm x 21,5 cm x 27,9 cm)
Gewicht:	4,35 kg
Kosten:	6.738 EUR Kaufpreis, (7147 USD, Stand 13.4.2015) 516 EUR (548 USD) monatliche Miete, 93 EUR (99 USD) Mietpauschale, 245 EUR (260 USD) Versand 0,5 ZE Auswertung 17 EUR Versandkosten National
Messgrößen:	Radon und Thoron Gas Aktivitätskonzentrationen
Messbereich:	4-750.000 Bq/m ³
Untergrund:	0,2 Bq/m ³
Sensitivität:	0,41 cph/Bq×m ⁻³ [92], 0,19 cph/Bq×m ⁻³ [93]
Unsicherheit:	±20% absolute Genauigkeit

Einflussfaktoren:	relative Luftfeuchte, daher wird empfohlen eine Trockenkartusche zu verwenden, welche regelmäßig gewechselt werden muss. Volumen des Probennahmens Aufbaus (Schlauchdurchmesser und Länge)
Bemerkung:	Stabiles und zuverlässiges Messgerät zur Bestimmung der Radon und Thoron Gaskonzentrationen in der Raumluft. Kaum beeinflusst durch sich ändernde Umweltbedingungen dank aktiver Probennahme und anschließender Filtrierung durch Entfeuchter. Umfangreiche Bedien- und Einstellmöglichkeiten. Betriebsdauer ohne Stromversorgung ca. 16 Stunden.

5.4.2. Mi.am Radout

Hersteller:	Mi.am via De Amicis 5 29029 Fabiano di Rivergaro Italien http://www.miam.it
Messprinzip:	Es handelt sich um ein integrierendes Messverfahren mit Zwei Kammernsystem und Kernspurdetektoren. Radon diffundiert durch einen Filter in die erste Kammer an deren Boden ein Kernspurdetektor angebracht ist. Der Filter verhindert die Diffusion von Thoron sowie Folgeprodukten in die Messkammer. Alphateilchen, die in dem Messvolumen entstehen und die Sonde treffen, beschädigen die chemische Bindung des Detektormaterials. Durch den Filter der zweiten Kammer können sowohl Radon als auch Thoron diffundieren. Die Differenz der Zählraten der beiden Kammern ist proportional zur Thoron Exposition. Die Beschädigungen des Detektormaterials werden durch ein chemisch-optisches Verfahren erfasst. Es handelt sich demnach um eine verzögerte Auswertungsmethode. Die ermittelte Kernspurdichte ist dabei ein Maß für die Exposition.
Aufbau:	0,1 L Zylinder-Gehäuse (5,0 cm x 2,0 cm)
Gewicht:	<100 g
Kosten:	40 EUR Systempreis pro Detektorpaar (ab 100 St.), inkl. Auswertung 50 EUR Versand (100 Stück) 7 EUR Versandkosten National
Messgrößen:	Radon und Thoron Gas Aktivitätskonzentrationen
Messbereich:	60 - 40.000 Bq/m ³
Untergrund:	Abhängig von Detektorqualität sowie Untergrundexposition
Sensitivität:	2,5 tph/kBq×m ⁻³ ×cm ² für Radon, k.A. tph/kBq×m ⁻³ ×cm ² für Thoron
Unsicherheit:	±25% absolute Genauigkeit
Einflussfaktoren:	Temperatur, Aufstellungsort
Bemerkung:	Erprobtes und zuverlässiges Messsystem zur Bestimmung der Radon Aktivitätskonzentrationen in der Raumluft. Radon Messung kaum beeinflusst durch sich ändernde Umweltbedingungen aufgrund der

Filtrierung. Thoron Konzentrationsbestimmung in Übereinstimmung mit ISO 16641. Keine Bedienungsmöglichkeit. Stromversorgung nicht nötig. Messzeiträume typischerweise zwischen 1 und 12 Monaten.

5.4.3. Pylon WLx

Hersteller:	Pylon Electronics Inc. 147 Colonnade Road Ottawa, Ontario K2E 7L9 Canada http://www.pylonelectronics.com
Messprinzip:	Es handelt sich um ein zeitaufgelöstes Messverfahren mit einem Halbleiterdetektor als Sonde. Während des variablen einstellbaren Messintervalls wird ein definiertes Luftvolumen durch einen Filter gesaugt. Filter und Alphanetektor bilden eine Einheit. Auf dem Filter scheiden sich Aerosole und Folgeprodukte ab. Beim Zerfall der Folgeprodukte freiwerdende Alphateilchen werden durch den Detektor kontinuierlich gezählt, und mittels eines spektrometrischen Verfahrens den jeweiligen Folgeprodukten zugeteilt. Die entsprechende Aktivitätskonzentration wird in Echtzeit berechnet und auf einem Display, bzw. Ausdruck, dargestellt. Der zeitliche Verlauf lässt sich mit einer entsprechenden Software auslesen.
Aufbau:	26,2 L Gehäuse (25,4 cm x 45,1 cm x 22,9 cm)
Gewicht:	13,2 kg
Kosten:	17.600 EUR (18.775 USD, Stand 21.4.2015) Kaufpreis, 1.640 EUR (1740 USD) monatliche Miete, 4.220 EUR (4.500 USD) Kautio 470 EUR (500 USD) Versand 0,5 ZE Auswertung 20 EUR Versandkosten National
Messgrößen:	Radon und Thoron Folgeprodukt Working Level
Messbereich:	0,001-50 WL (Intervall 1 Stunde) (0,3-13.700 Bq/m ³ Rn-220 EEC) ⁵
Untergrund:	< 6 cph
Sensitivität:	k.A.
Unsicherheit:	±5% Radon, ±20% Thoron absolute Genauigkeit
Einflussfaktoren:	Folgeprodukt Untergrundzählrate auf Filter
Bemerkung:	Stabiles und zuverlässiges Messgerät zur Bestimmung der Radon und Thoron Folgeprodukt Konzentrationen in der Raumluft. Umfangreiche Bedien- und Einstellmöglichkeiten Betriebsdauer ohne Stromversorgung ca. 48 Stunden.

⁵ Konvertierung von WL nach EEC mittels Faktor 274.6

5.4.4. Radosys Raduet

Hersteller:	Radosys, Ltd. Vegyész u. 17-25 1116 Budapest Hungary http://www.radosys.com
Messprinzip:	Es handelt sich um ein integrierendes Messverfahren mit zwei Kammernsystem und Kernspurdetektoren. Radon diffundiert durch einen Filter in die erste Kammer an deren Boden ein Kernspurdetektor angebracht ist. Der Filter verhindert die Diffusion von Thoron sowie Folgeprodukten in die Messkammer. Alphateilchen, die in dem Messvolumen entstehen und die Sonde treffen, beschädigen die chemische Bindung des Detektormaterials. Durch den Filter der zweiten Kammer können sowohl Radon als auch Thoron diffundieren. Die Differenz der Zählraten der beiden Kammern ist proportional zur Thoron Exposition. Die Beschädigungen des Detektormaterials werden durch ein chemisch-optisches Verfahren erfasst. Es handelt sich demnach um eine verzögerte Auswertungsmethode. Die ermittelte Kernspurdichte ist dabei ein Maß für die Exposition.
Aufbau:	0,2 L Zylinder-Gehäuse (5,94 cm x 3,22 cm)
Gewicht:	<100 g
Kosten:	35 EUR Systempreis pro Detektorpaar (ab 250 St.), inkl. Auswertung 50 EUR Versand (250 Stück) 7 EUR Versandkosten National
Messgrößen:	Radon und Thoron Gas Aktivitätskonzentrationen
Messbereich:	13 - 8.000 kBq×h/m ³ für Radon (3 monatige Messung) k.A. für Thoron
Untergrund:	Abhängig von Detektorqualität sowie Untergrundexposition
Sensitivität:	2,3 tph/kBq×m ⁻³ ×cm ² für Radon 0,3-0,6 tph/kBq×m ⁻³ ×cm ² für Thoron [94]
Unsicherheit:	±25% absolute Genauigkeit
Einflussfaktoren:	Temperatur, Aufstellungsort
Bemerkung:	Erprobtes und zuverlässiges Messsystem zur Bestimmung der Radon Aktivitätskonzentrationen in der Raumluft. Radon Messung kaum beeinflusst durch sich ändernde Umweltbedingungen aufgrund der Filtrierung. Thoron Konzentrationsbestimmung in Übereinstimmung mit ISO 16641. Keine Bedienungsmöglichkeit. Stromversorgung nicht nötig. Messzeiträume typischerweise zwischen 1 und 12 Monaten.

5.4.5. Saphymo AlphaGUARD PQ2000 PRO

Hersteller:	SAPHYMO GmbH Heerstrasse 149
-------------	---------------------------------

60488 Frankfurt am Main
Deutschland
<http://www.saphymo.com>

Messprinzip:	Es handelt sich um ein zeitaufgelöstes Messverfahren mit einer Ionisationskammer als Sonde. Radon diffundiert durch einen Filter in die Kammer in deren Mitte sich eine auf Hochspannung befindliche Elektrode befindet. Der Filter verhindert die Diffusion von Thoron sowie Folgeprodukten in die Messkammer. Die durch Alphateilchen entstehende Luftionisation im Messvolumen verursacht im elektrischen Feld der Kammer einen Strom elektrischer Ladungen. Die somit generierten Stromimpulse werden durch geeignete Elektronik als Spannungspuls registriert (Pulszählmodus). Thoron lässt sich durch Verwendung einer zusätzlichen externen Pumpe messen. Dazu wird für ca. 10 min Luft angesaugt (Fluss Modus) und die zusätzlichen registrierten Zerfälle, im Vergleich zur Zählrate im Diffusionsmodus, sind proportional zur Thoron Aktivitätskonzentration. Der zeitliche Verlauf lässt sich mit einer entsprechenden Software (DataEXPERT) auslesen.
Aufbau:	6,6 L Gehäuse (12,0 cm x 31,5 cm x 17,5 cm)
Gewicht:	4,5 kg
Kosten:	14.503 EUR Systempreis inklusive Versand 3.828,79 EUR monatliche Miete 0,5 ZE Auswertung 17 EUR Versandkosten National
Messgrößen:	Radon und Thoron Gas Aktivitätskonzentrationen
Messbereich:	2 – 2.000.000 Bq/m ³
Untergrund:	Abhängig von Exposition der Messkammer (Austauschbar)
Sensitivität:	3 cph/Bq×m ⁻³ für Radon, 0,42 cph/Bq×m ⁻³ bei 2 L/min bzw. 0,15 cph/Bq×m ⁻³ bei 1 L/min Volumenstrom für Thoron
Unsicherheit:	±3%/±20% absolute Genauigkeit für Radon/Thoron
Einflussfaktoren:	Luftfeuchte
Bemerkung:	Das Gerät hat sich quasi als Sekundarstandard für Radon Kalibrierungen durchgesetzt. Dabei zeichnet es sich vor allem durch seine Langzeitstabilität und hohe Sensitivität aus. Bei der Messung von Thoron ist mit einer höheren Unsicherheit zu rechnen. Betriebsdauer ca. 10 Tage mit Batterie. Einfache Bedienung mittels Ein/Aus Taste.

5.4.6. Sarad RTM1688-2

Hersteller: SARAD GmbH
Wiesbadener Strasse 20
01159 Dresden
Deutschland
<http://sarad.de>

Messprinzip: Es handelt sich um ein zeitaufgelöstes Messverfahren mit einem Halbleiterdetektor als Sonde. Während des variablen einstellbaren

Messintervalls wird Raumluf durch einen Filter in die innere Messkammer des Gerätes gesaugt. Auf dem Filter scheiden sich Aerosole und Folgeprodukte ab, somit kann das Gerät nur Gasaktivitätskonzentrationen nachweisen. In der Messkammer selbst werden die neu entstandenen Folgeprodukte mittels eines elektrischen Feldes auf den Halbleiter Detektor abgeschieden (elektrostatische Sammlung). Dieser registriert kontinuierlich Alphateilchen aus Zerfällen, welche mittels eines spektrometrischen Verfahrens den jeweiligen Folgeprodukten zugeteilt werden. Die entsprechende Aktivitätskonzentration wird in Echtzeit berechnet und auf einem Display, bzw. Ausdruck, dargestellt. Der zeitliche Verlauf lässt sich mit einer entsprechenden Software (Radon Vision) auslesen.

Aufbau: 5,7 L Gehäuse (23,2 cm x 18,2 cm x 13,5 cm)
Gewicht: 3,5 kg

Kosten: 5.807 EUR Kaufpreis, keine Mietmöglichkeit
25 EUR Versand
0,5 ZE Auswertung
7 EUR Versandkosten National

Messgrößen: Radon und Thoron Folgeprodukte Aktivitätskonzentrationen
Messbereich: 1 - 10.000.000 Bq/m³
Untergrund: Abhängig vom Alter des Detektors und der Messkammer
Sensitivität: 0,18 cph/Bq×m⁻³im Fast Modus [95]
Unsicherheit: ±10% absolute Genauigkeit

Einflussfaktoren: Folgeprodukt Untergrundzählrate auf Filter

Bemerkung: Stabiles und zuverlässiges Messgerät zur Bestimmung der Radon und Thoron Gaskonzentrationen in der Raumluf. Kaum beeinflusst durch sich ändernde Umweltbedingungen dank aktiver Probennahme und anschließender Filtrierung. Keine Trockenpatrone zum Entfeuchten benötigt. Einfache Bedien- und Einstellmöglichkeiten. Betriebsdauer ohne Stromversorgung bis zu 7/14 Tagen bei kontinuierlichen/Intervall Pumpbetrieb.

5.4.7. Sarad DOSEman PRO

Hersteller: SARAD GmbH
Wiesbadener Strasse 20
01159 Dresden
Deutschland
<http://sarad.de>

Messprinzip: Es handelt sich um ein zeitaufgelöstes Messverfahren mit einem Halbleiterdetektor als Sonde. Während des variablen einstellbaren Messintervalls wird ein definiertes Luftvolumen durch einen Filter gesaugt. Filter und Alphasdetektor bilden eine Einheit. Auf dem Filter scheiden sich Aerosole und Folgeprodukte ab. Beim Zerfall der Folgeprodukte freiwerdende Alphateilchen werden durch den Detektor kontinuierlich gezählt, und mittels eines spektrometrischen Verfahrens

den jeweiligen Folgeprodukten zugeteilt. Die entsprechende Aktivitätskonzentration wird in Echtzeit berechnet und auf einem Display dargestellt. Der zeitliche Verlauf lässt sich mit einer entsprechenden Software (Radon Vision) auslesen.

Aufbau: 0,25 L Gehäuse (13,8 cm x 5,7 cm x 3,2 cm)
Gewicht: 300 g

Kosten: 2.680 EUR Kaufpreis, keine Mietmöglichkeit
25 EUR Versand
0,5 ZE Auswertung
7 EUR Versandkosten National

Messgrößen: Radon und Thoron Folgeprodukte Aktivitätskonzentrationen
Messbereich: 0 - 1.000.000 Bq/m³
Untergrund: Abhängig vom Alter des Filters und Exposition
Sensitivität: 9 cph/Bq×m⁻³
Unsicherheit: ±10% absolute Genauigkeit

Einflussfaktoren: Folgeprodukt Untergrundzählrate auf Filter

Bemerkung: Es handelt sich um eine tragbare Version eines Folgeprodukt Monitors, welcher die Bestimmung der individuellen Dosis einer Person erlaubt. Die Bedienelemente beschränken sich aufs nötigste und erlauben eine einfache Bedienung. Die Betriebszeit beträgt ca. 48 Stunden. Das Gerät kann aber auch am Netz betrieben werden.

5.4.8. Sarad EQF 3200

Hersteller: SARAD GmbH
Wiesbadener Strasse 20
01159 Dresden
Deutschland
<http://sarad.de>

Messprinzip: Es handelt sich um ein zeitaufgelöstes Messverfahren mit einem Halbleiterdetektor als Sonde. Während des variablen einstellbaren Messintervalls wird ein definiertes Luftvolumen durch einen Filter gesaugt. Filter und Alphanetektor bilden eine Einheit. Auf dem Filter scheiden sich Aerosole und Folgeprodukte ab. Beim Zerfall der Folgeprodukte freiwerdende Alphateilchen werden durch den Detektor kontinuierlich gezählt, und mittels eines spektrometrischen Verfahrens den jeweiligen Folgeprodukten zugeteilt. Gleichzeitig kann Radon durch einen Filter in eine Kammer diffundiert, in der die Gas Aktivitätskonzentration bestimmt wird. Die entsprechenden Konzentrationen werden in Echtzeit berechnet und auf einem Display dargestellt. Der zeitliche Verlauf lässt sich mit einer entsprechenden Software (dVision) auslesen.

Aufbau: 8,4 L Gehäuse (23,5 cm x 14,0 cm x 25,5 cm)

Gewicht:	6 kg
Kosten:	17.629,50 EUR Systempreis, keine Mietmöglichkeit 25 EUR Versand 0,5 ZE Auswertung 17 EUR Versandkosten National
Messgrößen:	Radon und Thoron Folgeprodukte Aktivitätskonzentrationen
Messbereich:	0 -1.000.000 Bq/m ³
Untergrund:	Abhängig von Exposition und Alter des Filters und der Messkammer
Sensitivität:	36 cph/Bq×m ⁻³ EEC, 0,18-0,42 cph/Bq×m ⁻³ Radon Gas [96]
Unsicherheit:	±10% absolute Genauigkeit
Einflussfaktoren:	Folgeprodukte auf Filter und in Messkammer
Bemerkung:	Folgeproduktmonitor welcher den Anschluss einer zusätzlichen Gamma Sonde erlaubt, sowie sämtliche Umweltparameter (Luftfeuchte, Druck, Temperatur) und den Pumpen Durchfluss überwacht. Umfangreiche Bedien- und Einstellmöglichkeiten. Gerät kann auch über 12V Autobatterie oder Solarstrom versorgt werden. Der zeitliche Verlauf lässt sich mit einer entsprechenden Software (dVision), auch Remote über GPRS, auslesen.

5.4.9. TRACERLAB ERS-RDM-PLUS-2S

Hersteller:	Tracerlab GmbH Aachener Straße 1354 50859 Köln Deutschland http://www.tracerlab.de
Messprinzip:	Es handelt sich um ein zeitaufgelöstes Messverfahren mit Halbleiterdetektoren als Sonden. Während des variablen einstellbaren Messintervalls wird ein definiertes Luftvolumen durch zwei parallele, unabhängige Messsysteme gesaugt. Der Messkopf ist ausgestattet mit einem Filter, die Messkammer mit einem Hochspannungsabscheider für neu entstandene Folgeprodukte. Filter und Alphadetektor bilden eine Einheit. Das Gerät erlaubt die Ermittlung des Gleichgewichtsfaktors zwischen Gas- und Folgeproduktkonzentration. Auf dem Filter scheiden sich Aerosole und Folgeprodukte ab, auf dem zweiten Detektor Folgeprodukte welche im Messvolumen entstehen. Die Messkammer kann auch im Diffusionsmodus betrieben werden (keine aktive Probennahme). Die beim Zerfall der Folgeprodukte freiwerdenden Alphateilchen werden durch die Detektoren kontinuierlich gezählt, und mittels eines spektrometrischen Verfahrens den jeweiligen Folgeprodukten zugeteilt. Die entsprechenden Konzentrationen werden in Echtzeit berechnet und auf einem Display dargestellt. Der zeitliche Verlauf lässt sich mit einer entsprechenden Software auslesen.
Aufbau:	12,8- L Gehäuse (32,5 cm x 25,5 cm x 15,5 cm)
Gewicht:	7,5 kg

Kosten:	11.250 EUR Systempreis, keine Mietmöglichkeit 25 EUR Versand 0,5 ZE Auswertung 17 EUR Versandkosten National
Messgrößen:	Radon und Thoron Gas und Folgeprodukte Aktivitätskonzentrationen
Messbereich:	0,5 – 20.000 Bq/m ³
Untergrund:	Abhängig von Exposition und Alter des Filters und der Messkammer
Sensitivität:	k.A.
Unsicherheit:	±10% absolute Genauigkeit
Einflussfaktoren:	Folgeprodukte auf Filter
Bemerkung:	Folgeproduktmonitor welcher im Direktverfahren die Gas- sowie angelagerte Folgeprodukt Gleichgewichtskonzentration ermittelt und daraus den Gleichgewichtsfaktor bestimmen kann. Umfangreiche Bedien- und Einstellmöglichkeiten. Der zeitliche Verlauf sowie die Spektren lassen sich auf dem integrierten Personal Digital Assistant (PDA) darstellen, bzw. mit einer entsprechenden Software auslesen. Die Betriebszeit im Batteriemodus beträgt ca. 12 Stunden.

5.4.10. Unattended battery-operated progeny monitor (UBPM)

Entwickler:	Institut für Strahlenschutz (ISS) AG Experimentelle Radioökologie Ingolstädter Landstraße 1 85764 Neuherberg Deutschland http://www.helmholtz-muenchen.de/iss/
Messprinzip:	Es handelt sich um ein integrierendes Messverfahren mit Kernspurdetektoren als Sonden. Während eines längeren Messintervalls werden negativ geladene Aerosole und Folgeprodukte mittels elektrostatischer Abscheidung auf der Detektoroberfläche gesammelt. Die Diskriminierung zwischen Radon und Thoron Folgeprodukten erfolgt mittels Aluminiumfolien unterschiedlicher Dicke, welche die Detektoren abschirmen. Die Differenz der Spurenzahl auf beiden Detektoren ist proportional zur Thoron Exposition. Die Beschädigungen des Detektormaterials werden durch ein chemisch-optisches Verfahren erfasst. Es handelt sich demnach um eine verzögerte Auswertungsmethode. Die ermittelte Kernspurdichte ist dabei ein Maß für die Exposition.
Aufbau:	6,7 L Gehäuse (28 cm x 20 cm x 12 cm)
Gewicht:	6,9 kg
Kosten:	Kommerziell nicht verfügbar Mietmöglichkeit der Prototypen für wissenschaftliche Zwecke zum Selbstkostenpreis 60 EUR Auswertung 17 EUR Versandkosten National

Messgrößen:	Radon (Po-214)/Thoron (Po-212) Folgeprodukt Aktivitätskonzentrationen
Messbereich:	150 – 30.000 Bq×h/m ³ (2 monatige Messung)
Untergrund:	Abhängig von Exposition und Alter der Folie, Exposition Detektoren
Sensitivität:	0,19 tph/Bq×m ⁻³ ×cm ² für Radon, 0,11-0,30 tph/Bq×m ⁻³ ×cm ² für Thoron [3]
Unsicherheit:	±25% absolute Genauigkeit
Einflussfaktoren:	Luftfeuchte, Aerosol Größen- und Ladungsverteilung, Aerosolteilchendichte, Folgeproduktuntergrund auf Folien
Bemerkung:	Aktiver Folgeproduktmonitor welcher die Folgeprodukt Gleichgewichtskonzentration lautlos bestimmen kann. Keine Bedienungsmöglichkeit. Stromversorgung nicht nötig. Messzeiträume typischerweise zwischen 1 und 3 Monaten. Die Betriebszeit im Batteriemodus beträgt ca. 3 Monate.

5.4.11. FLONEX Thoron Folgeproduktmonitor

Hersteller:	FLONEX Corporation 1-1-25 Anane-cho, Hirosaki Aomori 036-8279 Japan Email: stokonami@h7.dion.ne.jp
Messprinzip:	Es handelt sich um ein integrierendes Messverfahren mit Kernspurdetektoren. Folgeprodukte scheiden sich auf die Oberfläche des Messsystems mittels Deposition ab. Die Oberfläche besteht aus einer Polypropylen- und Mylarfolie, unter denen sich vier Detektoren in einer Aluminiumhalterung befinden. Die Folien erlauben nur die Transmission von Alphateilchen welche von Po-212 emittiert werden. Die Strahlung welche die Folien durchqueren kann und die Detektoren treffen beschädigt die chemische Bindung des Detektormaterials. Die Defektstellendichte der Detektoren ist proportional zur Thoron Exposition. Die Beschädigungen des Detektormaterials werden durch ein chemisch-optisches Verfahren erfasst. Es handelt sich demnach um eine verzögerte Auswertungsmethode. Die ermittelte Kernspurdichte ist dabei ein Maß für die Exposition.
Aufbau:	7 mL Zylinder-Gehäuse (6,0 cm x 6,0 cm x 0,2 cm)
Gewicht:	<200 g
Kosten:	66 EUR (8500 JPY, Stand 23.04.2015) Systempreis pro Detektorpaar (bis 100 St.), inkl. Auswertung 116 EUR (15.000 JPY) Versand (100 Stück) 7 EUR Versandkosten National
Messgrößen:	Thoron Folgeprodukt (Po-212) Aktivitätskonzentration
Messbereich:	0,01 - 30 Bq/m ³ (3 monatige Messung)
Untergrund:	Abhängig von Detektorqualität sowie Detektorexposition
Sensitivität:	0,05 - 0,07 tph/Bq×m ⁻³ ×cm ² für Thoron EEC [97]
Unsicherheit:	±25% absolute Genauigkeit

Einflussfaktoren: Abscheidegeschwindigkeit, Raumgröße, Quellfläche, Aufstellungsort

Bemerkung: Messsystem zur Bestimmung der Thoron Folgeprodukt Aktivitätskonzentration in der Raumluft. Keine Bedienungsmöglichkeit. Stromversorgung nicht nötig. Messzeiträume typischerweise zwischen 1 und 12 Monaten.

5.4.12. BARC DTPS Thoron Folgeproduktmonitor

Hersteller: Radiological Physics and Advisory Division
Bhabha Atomic Research Centre
Mumbai 400094
India
Email: rosaline.mishra@gmail.com

Messprinzip: Es handelt sich um ein integrierendes Messverfahren mit Kernspurdetektoren. Folgeprodukte scheiden sich auf die Oberfläche des Messsystems mittels Diffusion ab. Die Oberfläche besteht aus einer aluminiumbeschichteten Mylarfolie, unter der sich ein Detektor in einer Plastikhalterung befindet. Die Folie erlaubt hauptsächlich die Transmission von Alphateilchen welche von Po-212 emittiert werden. Die Strahlung welche die Folien durchqueren kann und den Detektor trifft beschädigt die chemische Bindung des Detektormaterials. Die Defektstellendichte der Detektoren ist proportional zur Thoron Exposition. Die Beschädigungen des Detektormaterials werden durch ein elektrochemisches Verfahren erfasst. Zudem gibt es noch eine Version mit Drahtgitter welche die Messung von angelagerten Folgeprodukten erlaubt. Es handelt sich demnach um eine verzögerte Auswertungsmethode. Die ermittelte Kernspurdichte ist dabei ein Maß für die Exposition.

Aufbau: 9 mL Gehäuse (6,6 cm x 3,4 cm x 0,4 cm)

Gewicht: <20 g

Kosten: Kommerziell nicht verfügbar

Messgrößen: Thoron Folgeprodukt (Po-212) Aktivitätskonzentration

Messbereich: 0,1 - k.A. Bq/m³

Untergrund: Abhängig von Detektorqualität sowie Untergrundexposition

Sensitivität: 0,039 tph/Bq×m⁻³×cm² für Thoron EEC [98]

Unsicherheit: ±25% absolute Genauigkeit

Einflussfaktoren: Abscheidegeschwindigkeit, Raumgröße, Quellfläche, Aufstellungsort

Bemerkung: Messsystem zur Bestimmung der Thoron Folgeprodukt Aktivitätskonzentrationen in der Raumluft. Keine Bedienungsmöglichkeit. Stromversorgung nicht nötig. Messzeiträume typischerweise zwischen 1 und 12 Monaten.

5.5. Bewertung der Messgerätesysteme

Anhand der in Sektion 5.1 aufgeführten Kriterien werden die in Teil 5.4 beschriebenen Messgerätesysteme im Folgenden bewertet. Dabei sind alle Bewertungskriterien in Spalten eingetragen, während die einzelnen Messsysteme in den Reihen aufgeführt werden. Um Rückschlüsse auf bestimmte Geräte zu erschweren werden die Systeme mittels eines alphabetischen Codes abgekürzt und sind in absteigender Reihenfolge sortiert.

Die Benotung jedes Messsystems erfolgt, je nach Erfüllungsgrad, für jedes Bewertungskriterium in der entsprechenden Spalte mit folgenden Noten:

- 1 = Nichterfüllung/Ungenügend
- 2 = mangelhafte Erfüllung
- 3 = ausreichende Erfüllung
- 4 = befriedigende Erfüllung
- 5 = gute Erfüllung
- 6 = sehr gute Erfüllung

Die Berechnung der Gesamtnote erfolgt anschließend aus der Summe der Produkte der Note mit dem ermittelten Gewichtungsfaktor. Die entsprechenden Gewichtungsfaktoren wurden in **Tabelle 8** festgelegt. Die Summe aller Werte eines Messsystems gibt Aufschluss über die besten Alternativen. Je höher die Summe desto passender ist das Messsystem für den geplanten Einsatzzweck geeignet.

5.5.1. Notenbereiche der einzelnen Kriterien

Aufgrund des breiten Spektrums von Messgeräten und zur Transparenz der vergebenen Noten werden im Folgenden die Grenzen beziehungsweise Eigenschaften in einen Zusammenhang mit den dazu gehörigen Noten gebracht und sind für die messtechnischen Kriterien in **Tabelle 10** aufgeführt.

Tabelle 10: Notenbereiche für die messtechnischen Kriterien

Kriterium	Eigenschaft/Bereich	Note
Messgröße	Gas- und Folgeproduktkonzentration	6
	Folgeproduktkonzentration	5
	Gaskonzentration	2
	Sonstige/Unbekannt	1
	keinen Einfluss	6
Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Luftturbulenz und Aerosolkonzentration Einfluss, Querempfindlichkeit, Nulleffekt	Einfluss vernachlässigbar	5
	kaum Einfluss, Verlauf bekannt	4
	großer Einfluss, Verlauf bekannt	3
	großer Einfluss, Verlauf unbekannt	2
	unbekannter Einfluss	1
Empfindlichkeit in Kombination mit Messdauer für erwartete Konzentration (siehe 5.5.2)	≤ 1h	6
	≤ 1d	5
	≤ 30d	4
	≤ 90d	3
	≤ 180d	2
Messbereich	≥ 365d	1
	Innerhalb erwarteter Konzentration	6

	Außerhalb erwarteter Konzentration	1
Normenkonformität	vom Hersteller ausgewiesen	6
	Übereinstimmung mit je technischer und methodischer Norm	5
	Übereinstimmung mit einer technischen oder methodischen Norm	4
	keine Normenkonformität	1
Unsicherheit	≤ 5%	6
	≤ 10%	5
	≤ 25%	4
	≥ 30%	1
Integrationszeit	kontinuierlich, einstellbar	6
	integrierend, gesamte Messdauer	5

Bei der Bewertung des Einflusses auf die Empfindlichkeit ist zu beachten, dass es keine von Hersteller oder Entwicklern belastbaren Angaben gibt, und es sich daher um eine Einschätzung basierend auf Messprinzip und Erfahrung mit den Messgeräten handelt. Die Notenbereiche für die technischen und wirtschaftlichen Kriterien sind in **Tabelle 11** aufgeführt.

Tabelle 11: Notenbereiche für die technischen und wirtschaftlichen Kriterien

Kriterium	Eigenschaft/Bereich	Note
Bedienbarkeit	keinen Bedienung nötig	6
	nur Einschalten nötig	5
	mehrere Schritte zum Starten nötig	4
	zusätzlich komplizierter Aufbau	3
	Wartung nötig (Filterwechsel)	2
	Unbekannt	1
Betriebsdauer	≥ 180d	6
	≥ 90d	5
	≥ 30d	4
	≥ 7d	3
	≥ 1d	2
Lautstärke	Lautlos (passiv)	6
	≤ 30db	5
	≤ 40db	4
	sonstige, unbekannt	1
Manipulationsfestigkeit	Sicher	6
	Manipulation durch Abdeckung, Aufstellung	5
	Manipulation durch Abschaltung	4
	Unbekannt	1
Mechanische Stabilität	Ungehäuse, Erschütterungsfest	6
	Multigehäuse, Erschütterungsfest	5
	Multigehäuse, fragile Verbindungen	4
	Sonstige, Unbekannt	1
Abwicklungskosten	≤ 30 €	6
	≤ 50 €	5
	≤ 100 €	4
	Sonstige	1

Kauf- / Mietkosten	≤ 50€	6
	≤ 500€	5
	≤ 5.000€	4
	≤ 10.000€	3
	≤ 15.000€	2
	Sonstige	1
Verfügbarkeit und Reife	verfügbar und erprobt	6
	verfügbar, kaum erprobt	5
	verfügbar, unerprobt	4
	nicht verfügbar	1

Bei der Bewertung der Betriebsdauer ist zu berücksichtigen, dass es sich bei Erhebungsmessungen meist um längere Zeitintervalle zwischen 3 und 6 Monaten handelt, um eine mittlere Konzentration zu ermitteln. Dies liegt vor allem daran, dass die Thoron Konzentration in der Raumluft sehr variabel und Abhängig von vielen Umweltfaktoren (Temperatur- und Druckgradient zwischen Innen und Außen, Saison etc.) ist. Daher ist davon auszugehen dass eine kurzzeitige Messung meist keine Aussagekraft hat, da zum Beispiel, unter anderem, das Lüftungsverhalten eine entscheidende Rolle spielt. Des Weiteren ist Anzumerken, dass die Betriebsdauer für alle Geräte ausreichend ist um die zu erwartende Thoron Konzentration innerhalb der zur Verfügung stehenden Messzeit zu ermitteln (siehe **Tabelle 12**).

5.5.2. Anmerkung zu Empfindlichkeit, Messdauer und Unsicherheiten

Ziel des Vorhabens ist die Identifizierung von geeigneten Messgeräten zur Durchführung von Erhebungsmessungen. Daher sollten die Geräte für Ihre Empfindlichkeit und systematischen Unsicherheit solche Eigenschaften aufweisen, dass die zu erwartenden Konzentration innerhalb eines angemessenen Zeitrahmens und Unsicherheit ermittelt werden kann.

Die Unsicherheit eines Messwertes setzt sich aus dem systematischen und statistischen Fehler zusammen. Der statistische Fehler hängt dabei von der ermittelten Zählrate ab, welche wieder beeinflusst ist durch die Geräteempfindlichkeit, die Untergrundzählrate sowie die vorherrschende Konzentration. Der relative statistische Fehler bei Poisson Verteilten Zerfällen lässt sich aus der Anzahl der registrierten Ereignisse N bestimmen und ist in Gleichung (5-1) gegeben:

$$u_{stat}(N) = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (5-1)$$

Da es sich bei statistische und systematischen Fehlern für gewöhnlich um voneinander unabhängige Fehlerquellen handelt kann man den gesamten Fehler mittels quadratischer Fehleraddition berechnen. Somit ergeben sich je nach intrinsischem systematischem Fehler eines Messsystems unterschiedliche Anforderungen an die Zählstatistik im Vergleich zu einem anderen System bei gleichem Gesamtfehler. Der maximale erlaubte statistische Fehler lässt sich demnach mittels Gleichung (5-2) ermitteln.

$$u_{stat}(N) = \sqrt{u(N)_{ges}^2 - u(N)_{sys}^2} \quad (5-2)$$

Zur Abschätzung der benötigten Messdauer bei gegebener Thoron Konzentration C und definierten Fehler $u(N)_{ges}$, ist die Empfindlichkeit und der Untergrund eines Messsystems

ausschlaggebend. Im Allgemeinen errechnet sich die Konzentration aus der gemessenen Zählrate n und dem Kalibrierfaktor ω wie folgt

$$C = \omega (n - n_0) \quad (5-3)$$

Somit ergibt sich für die benötigte Messdauer t bei einer Konzentration C und bei der Annahme einer zur vernachlässigten Untergrundzählrate ($n_0=0$, z.B. bei Neugerät) aus Gleichung (5-3),

$$t = \frac{\omega N}{C} \quad (5-4)$$

wobei sich N in Abhängigkeit von der Anforderung an den statistischen Fehler nach (5-2) und (5-1) ergibt.

Die in **Tabelle 12** aufgeführten Werte, wurden unter der Annahme einer Thoron Konzentration von $0,4 \text{ Bq/m}^3$ EEC (20 Bq/m^3 Gaskonzentration bei Gleichgewichtsfaktor $F=0,02$ [99]), einer relativen Messunsicherheit von 30% sowie den in Sektion 5.4 ermittelten Angaben berechnet. Bei den Geräten mit Kernspurdetektoren ist auch ebenso die sensitive Fläche zur Berechnung der gesamten Empfindlichkeit (Reziprok des Kalibrierfaktors) angegeben. Die hier ermittelten Werte sind ausschlaggebend für die Bewertung der Empfindlichkeit und Messdauer eines Gerätes. Für den Radout Detektor war keine Empfindlichkeit verfügbar, diese sollte aber aufgrund des fast gleichen Radonkalibrierfaktors sehr ähnlich sein. Für die Pylon und Tracerlab Geräte waren ebenso keine Werte vorhanden, näherungsweise liegen diese aber in derselben Größenordnung wie beim Sarad EQF.

Tabelle 12: Messdauer der verschiedenen Messsysteme bei einer relativen Fehlerannahme von 30% und der erwarteten durchschnittlichen Thoron Konzentration in Deutschland

Gerät	Fläche [cm ²]	Empfindlichkeit [cph/Bq×m ³]	sys. Fehler [%]	stat. Fehler [%]	Ereignisse	Messdauer
Rad7		0,41	20	22	20	2h
Miam Radout	1	4,50E-04	25	17	36	168d
Radosys Raduet	1	4,50E-04	25	17	36	168d
Alphaguard		0,42	20	22	20	2h
Sarad RTM		0,18	10	28	13	3h
Sarad Doseman		9	10	28	13	3h
Sarad EQF		36	10	28	13	1h
Pylon		30	20	22	20	2h
Tracclerlab		30	10	28	13	1h
UBPM	2	0,42	25	17	36	9d
Flonex	4	0,28	25	17	36	14d
BARC DTPS	6.25	0,24	25	17	36	16d

5.5.3. Bewertungsmatrix

Die vollständige Bewertungsmatrix für messtechnische Kriterien mit Endnoten EN für jedes Messsystem ist in **Tabelle 14** aufgeführt. Dabei sind die Messgeräte für Thoron-Gas und Thoron-Folgeprodukte separat bewertet. Es zeigt sich, dass der Großteil der Geräte nur eine befriedigende ($EN \leq 5$) beziehungsweise maximal gute ($EN \leq 6$) Erfüllung der Anforderungen

erreicht. Vier Messsysteme kommen einer sehr guten ($EN \geq 5$) Erfüllungen nahe, wobei alle davon auf einem identischen Messprinzip beruhen.

Bei Betrachtung der Bewertungsmatrix (**Tabelle 13**) für Geräte, im Hinblick auf technische und wirtschaftlichen Kriterien, zeigt sich erwartungsgemäß dass passive Messsysteme aufgrund ihrer einfachen Handhabung und niedrigen Kosten mit am besten abschneiden.

Tabelle 13: Bewertungsmatrix für technische und wirtschaftliche Kriterien mit getrennter Bewertung von Gas- (A-E) und Folgeprodukt-Messgeräten (F-L).

Code	Bedienbarkeit	Betriebsdauer	Lautstärke	Manipulationsfestigkeit	Mechanische Stabilität	Abwicklungskosten	Kauf- / Mietkosten	Verfügbarkeit und Reife	EN
Gewicht	0,13	0,08	0,19	0,05	0,09	0,13	0,19	0,16	
D	6	6	6	5	6	6	6	6	5,95
E	6	6	6	5	6	5	6	6	5,83
A	4	3	4	4	6	6	3	6	4,48
C	5	3	4	4	6	6	2	6	4,42
B	2	2	4	4	6	6	3	6	4,16
J	6	6	6	5	6	5	5	5	5,48
H	2	2	4	4	6	6	4	6	4,34
F	2	1	4	4	6	6	1	6	3,70
G	2	1	4	4	4	6	2	6	3,70
I	2	2	4	4	4	6	1	5	3,44
K	6	6	5	5	6	1	1	1	3,42
L	6	5	6	5	1	1	1	1	3,06

Im nächsten Kapitel werden Hinweise für die Eignung der Messsysteme aus fachlicher, wirtschaftlicher und organisatorischer Sicht für Erhebungsmessungen an Arbeitsplätzen, in Wohnungen und anderen Gebäuden in Deutschland gegeben.

Tabelle 14: Bewertungsmatrix zur Ermittlung geeigneter Geräte für Erhebungsmessungen zur Thoronexposition mit getrennter Bewertung von Gas- (A-E) und Folgeprodukt-Messgeräten (F-L).

Code	Messgrößen	Temperatur Einfluss	Luftfeuchte Einfluss	Luftdruck Einfluss	Luftturbulenz Einfluss	Aerosolkonzentration	Querempfindlichkeit	Empfindlichkeit	Messbereich	Unsicherheit	Integrationsdauer	Messdauer	Nulleffekt	Normenkonformität	EN
Gewicht	0,14	0,07	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10	0,12	0,05	0,11	0,01	0,03	0,04	0,01	
A	2	5	5	6	6	6	5	5	6	5	6	5	5	5	4,95
B	2	5	3	6	6	6	5	5	6	4	6	5	5	5	4,71
C	2	5	5	6	6	6	3	5	6	4	6	5	4	5	4,61
D	2	5	5	5	6	6	3	2	6	4	5	2	3	5	4,05
E	2	5	5	5	6	6	3	2	1	4	5	2	3	5	3,79
F	6	6	6	6	6	5	5	6	6	5	6	6	5	5	5,71
G	5	6	6	6	6	5	5	6	6	5	6	6	5	5	5,57
H	5	6	6	6	6	5	5	5	6	5	6	5	5	5	5,42
I	5	6	6	6	6	5	5	5	6	4	6	5	5	5	5,31
J	5	6	5	6	2	2	5	4	6	4	5	4	3	1	4,30
K	5	6	5	6	2	2	5	4	6	4	5	4	3	1	4,30
L	5	6	3	6	2	2	3	4	6	4	5	4	3	1	3,98

5.5.4. Diskussion der Geräte sowie weitere Hinweise

Geräte A, B und C

Die Messsysteme werden aufgrund ihrer messtechnischen Eigenschaften vor allem im wissenschaftlichen Umfeld als Sekundärnormale eingesetzt. Unter ökonomischen Gesichtspunkten kann, aufgrund des hohen Anschaffungspreises, mit diesem Gerätetyp keine Erhebungsmessung wirtschaftlich durchgeführt werden. Bei Verwendung nur eines Gerätes wird in der Literatur dazu geraten bei einem der Messsysteme von Thoron Messungen abzusehen [100]. Des Weiteren erfordert der zum Teil komplexe Messaufbau Fachwissen zur Aufstellung, im Besonderen hinsichtlich des Ortes, sowie der Bedienung der Geräte. Dies gestaltet den Versand und die Handhabung der Messgeräte äußerst schwierig. Das Messprinzip selbst ist allerdings kaum anfällig für Manipulation, und nur durch die Abdeckung des Detektionssystems oder mechanische Sabotage beeinflussbar. Aufgrund der verminderten Abhängigkeit des Kalibrierfaktors von Umweltfaktoren ist bei durchgängiger und problemloser Messung die Genauigkeit der erhaltenen Messergebnisse allerdings sehr hoch. Da hier aber die Thoron Gaskonzentration Messgröße ist kann die Exposition durch Thoron aufgrund des schlecht definierten Gleichgewichtsfaktors nicht genau bestimmt werden. Eine Verbesserung spezifischer Kriterien, in denen dieser Gerätetyp Schwächen aufweist, ist aufgrund des Messprinzips kaum möglich.

Geräte D und E

Bei diesen Messsystemen mit identischem Detektionsprinzip handelt es sich um ein normiertes Verfahren zur Expositionsbestimmung. Daher kann bei der Auswertung auf etablierte Methoden zurückgegriffen werden. Die Dimension der Messgeräte erlaubt deren einfachen Transport und Handhabung. Das Messprinzip ist allerdings anfällig für Manipulation, zum Beispiel durch örtlich falsche Aufstellung, beziehungsweise Abdeckung des Detektors. In kontrollierten Kalibrierkammern lässt sich eine reproduzierbare Korrelation zwischen Kernspurdichten und Aktivitätskonzentration herstellen. Allerdings können unter realistischen Bedingungen, aufgrund der Unabhängigkeit eines des zur Expositionsbestimmung benötigten Parameters, die ermittelten Werte nicht als repräsentativ angesehen werden. Eine Verbesserung spezifischer Kriterien, in denen das Gerät Schwächen aufweist, ist aufgrund des Detektionsprinzips kaum möglich.

Geräte F,G,H und I

Die Messgeräte werden aufgrund ihrer messtechnischen Eigenschaften vor allem im wissenschaftlichen Umfeld für Fallstudien beziehungsweise als Sekundärnormale eingesetzt. Unter ökonomischen Gesichtspunkten kann, aufgrund des hohen Anschaffungspreises, mit diesem Gerätetyp keine Erhebungsmessung wirtschaftlich durchgeführt werden. Des Weiteren erfordert der komplexe Messaufbau Fachwissen zur Aufstellung und Bedienung der Geräte. Dies gestaltet den Versand und die Handhabung der Messgeräte äußerst schwierig. Des Weiteren ist mit den Geräten kein autonomer Langzeitbetrieb möglich, daher ist die Messung durch den Wegfall der Stromversorgung beeinflusst und unter solchen Umständen nicht aussagekräftig. Das Messprinzip selbst ist allerdings kaum anfällig für Manipulation, und nur durch die Abdeckung des Detektionssystems oder mechanische Sabotage beeinflussbar. Aufgrund der verminderten Abhängigkeit des Kalibrierfaktors von Umweltfaktoren ist bei durchgängiger und problemloser Messung die Genauigkeit der erhaltenen Messergebnisse allerdings sehr hoch. Eine

Verbesserung spezifischer Kriterien in denen dieser Gerätetyp Schwächen aufweist, ist aufgrund des Messprinzips möglich und ist für den Einsatz zu Erhebungsmessungen erforderlich.

Geräte J und K

Die Messgeräte erreicht trotz ihrer messtechnischen Eigenschaften und Probleme noch eine befriedigende Wertung. Aufgrund des Detektionsprinzip kann bei der Auswertung auf etablierte Methoden zurückgegriffen werden. Die Abmessung des Messgerätes erlaubt einen einfachen Transport und Handhabung. Das Messprinzip ist allerdings Anfällig für Manipulation, zum Beispiel durch falsche Anbringung beziehungsweise Abdeckung des Detektionssystems. Aufgrund der vielfältigen Abhängigkeiten des Kalibrierfaktors von Umweltfaktoren ist mit einer verminderten Aussagekraft der erhaltenen Messergebnisse, besonders ohne weitere Stützmessungen, zu rechnen. Bei Praxistests im Thoron-Haus des Helmholtz Zentrums konnte keine reproduzierbare Relation zwischen Kernspurdichte und der Thoron Folgeproduktkonzentration hergestellt werden. Eine Verbesserung spezifischer Kriterien, in denen das Gerät Schwächen aufweist, ist aufgrund des Detektionsprinzips kaum möglich.

Gerät L

Das Messgerät erreicht aufgrund dessen großer Abhängigkeit der Empfindlichkeit von Umweltfaktoren keine ausreichende Note, verfügt aber über Potential durch seine messtechnischen Eigenschaften. Aufgrund des Detektionsprinzip kann bei der Auswertung auf etablierte Methoden zurückgegriffen werden. Die Abmessung des Messgerätes bedingt mehr Arbeitsaufwand für Transport und Handhabung. Das Messprinzip ist weniger anfällig für Manipulation, zum Beispiel unabhängig von der örtlichen Aufstellung, kann aber dennoch durch die Abdeckung des Detektionssystems beeinflusst werden. Bei einer zu realisierenden verminderten Abhängigkeit des Kalibrierfaktors von Umweltfaktoren ist mit einer hinreichenden Aussagekraft der erhaltenen Messergebnisse in bekannten Umgebungen zu rechnen. Bei Kalibriermessungen in der BFS Radon Kammer sowie im Thoron-Haus des Helmholtz Zentrums konnte eine reproduzierbare Relation zwischen Kernspurdichte und der Radon sowie Thoron Folgeproduktkonzentration hergestellt werden. Eine Verbesserung spezifischer Kriterien, in denen das Gerät Schwächen aufweist, ist aufgrund des Messprinzips möglich und ist für den Einsatz zu Erhebungsmessungen erforderlich.

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Im Forschungsvorhaben *Untersuchung der Messmethoden und messtechnischen Eigenschaften von Messgeräten für Radon-220 (Thoron) und ihrer Eignung für den Einsatz in nationalen Erhebungsprogrammen* wurden verschiedene Messmethoden und Messsysteme für Thoron recherchiert und abgestuft nach Eignung für den Einsatz in Erhebungsmessungen beurteilt. Die verfügbaren Messgeräte wurden dabei nach insgesamt 22 Kriterien bewertet, welche auf die messtechnischen, wirtschaftlichen und praxistauglichen Eigenschaften der Detektionssysteme eingehen.

Im Folgenden ist der in den vorherigen Kapiteln erfasste aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik zum Themenbereich Thoron und dessen Messung kurz zusammengefasst.

Bei der Betrachtung der Thoron ($Rn-220$) Innenraumkonzentration und der resultierenden Exposition des Menschen sind einige Besonderheiten und Unterschiede im Vergleich zu dessen verwandtem Isotop Radon ($Rn-222$) zu beachten. Die Diffusionslängen beider Isotope unterscheiden sich in Baumaterialien und Luft erheblich, wodurch für die Exhalation von Thoron meist nur die oberste Schicht des Baumaterials von wenigen Zentimeter Tiefe als Quellvolumen in Frage kommt. Im Innenraum angelangt zerfällt das radioaktive Edelgas aufgrund seiner kurzen Lebensdauer in der Nähe des Eintrittsorts. Generell lässt sich ein exponentieller Abfall der Thoron Gaskonzentration mit zunehmender Entfernung von diesem feststellen. Aufgrund dieser Tatsachen ist die Aussagekraft von Thoron Gas Messungen sehr eingeschränkt, da die ermittelte Aktivität vor allem von der Platzierung des Messsystems abhängt. Daher ist eine ähnliche Vorgehensweise wie bei Radon (Messungen der Gaskonzentration bei Annahme eines Gleichgewichtsfaktors) für Thoron nicht anwendbar, da Quellort und Verteilung von Thoron im Allgemeinen unbekannt sind. Im Gegensatz dazu sind die Folgeprodukte wegen ihrer längeren Lebensdauer homogen in Innenräumen verteilt und tragen auch den Hauptanteil zu Exposition bei. Deshalb kann für die Thoron Expositionsbestimmung nur ein Messsystem empfohlen werden, welches in der Lage ist, die Folgeprodukt Aktivitätskonzentration zu bestimmen.

Für die zurzeit auf dem Markt und in Entwicklung befindlichen Messverfahren lässt sich feststellen, dass zahlreiche Messsysteme zur Ermittlung der Thoron Gas oder Folgeproduktkonzentration zur Verfügung stehen. Diese unterscheiden sich dabei zum Teil erheblich im Messaufwand, Kosten und Aussagekraft. Die Mehrzahl der Geräte ist dabei für die Untersuchung wissenschaftlicher Fragestellungen entwickelt worden und bedarf daher geschulten Personals für deren Einsatz. Die Standardisierung der unterschiedlichen Verfahren und Messvorschriften sind mit DIN 61577, ISO 16641 sowie ISO 11665 größtenteils erfolgt. Dennoch zeigten sich bei Vergleichsmessungen von passiven Thoron Detektoren zum Teil große Unterschiede zwischen Referenz- und der von den Geräten bestimmten Konzentration [101]. Dies deutet auf merklich vorhandene Qualitätsdefizite bei den in der zitierten Veröffentlichung überprüften Messsysteme hin. Auch ist die Anwendbarkeit und Einhaltung der Messvorschriften bei Erhebungsmessungen kaum sicherzustellen und hat, im Gegensatz zu Radon Innraummessungen, einen signifikanten Einfluss auf die Aussagekraft der ermittelten Werte.

Bei der durchgeführten abgestuften Bewertung der ermittelten Messsysteme kann von keinem Gerät eine sehr gute Endnote ($EN=6$) aber von 4 Messsystemen eine gute Erfüllung ($EN\geq 5$) bei den messtechnischen Anforderungen erreicht werden. Diese Geräteklasse mit guter Erfüllung der messtechnischen Anforderung erreicht allerdings bei der Bewertung der organisatorischen und wirtschaftlichen Kriterien nur ausreichende bis befriedigende Endnoten, wohingegen

kostengünstige Systeme bei den messtechnischen Anforderungen Defizite aufweisen. Dies liegt vor allem an der Ausrichtung der Geräte nach spezifischer Fragestellung, wodurch bei der Entwicklung entweder messtechnischen oder kostenbezogenen Kriterien Vorzug gegeben werden muss.

Im nächsten Schritt sind die ermittelten Geräte einem Typ- und Praxistest zu unterziehen, um die von Herstellern und aus Publikationen ermittelten Daten zu verifizieren. Dafür benötigt es der Einrichtung einer Thoron Kalibrierkammer welche den DIN 61577-4 Spezifikation genügt und von einem nach ISO/IEC 17025 akkreditierten Labor betrieben wird. Dies ist eine nötige Voraussetzung für die Überprüfung und Kalibrierung der ermittelten Messgeräte zur Bestimmung der Thoron Exposition.

Zusätzlich wird empfohlen, auf Basis der bereits vorhandenen Geräte, geeignete Kandidaten weiterzuentwickeln, um eine gute bis sehr gute Erfüllung aller für Erhebungsmessungen erforderlichen Kriterien zu gewährleisten. Dabei sollte der Fokus im Besonderen auf der Entwicklung eines kompakten, aktiven und autonomen Messsystems liegen. Dabei ist folgendes zu den Kriterien zu beachten:

- **Kompakt:** geringe Größe und Gewicht vereinfachen Versand, Handhabung und Anbringung des Messgerätes.
- **Aktiv:** eine aktive Probenahme ist meist Voraussetzung für die Unabhängigkeit des Messsystems von Einflussparametern, wie zum Beispiel der Aerosolteilchendichte und Verteilung, und erlaubt oftmals eine erhöhte Sensitivität. Dabei ist allerdings auf einen geringen Stromverbrauch sowie geringe Lautstärke zu achten, welches sich eventuell durch die Verwendung von Piezo-Mikropumpen oder mittels elektrostatischer Abscheidesysteme realisieren lässt.
- **Autonom:** die Messsysteme sollten, über einen längeren Zeitraum (1-6 Monate) ohne externe Stromversorgung betrieben werden können. Zudem bedarf es eines Systems welches keinerlei Bedienoptionen bietet und betriebsbereit in den Versand gegeben werden kann. Alternativ könnte ein netzabhängiges Gerät mit Plug&Measure Betrieb realisierbar sein.

Als weiterer wichtiger Punkt ist natürlich der Kostenfaktor für ein solches Detektionssystem zu berücksichtigen. Dieser lässt sich aber unter realistischen Gesichtspunkten, aufgrund der erhöhten Anforderungen an die Messmethoden für die Bestimmung der Thoron Exposition, nicht auf das Niveau von integrierenden Radon Monitoren senken.

Unter Berücksichtigung der aufgeführten Punkte wird ein zeitnaher Typ- und Praxistest empfohlen, um die etwaige Eignung bereits verfügbarer und gut bewerteter Messgeräte (**Tabelle 14**) besser bestimmen zu können. Dabei sollten auch die noch nicht kommerziell verfügbaren Prototypen mit einbezogen werden, um deren etwaiges Potential für Erhebungsmessungen abschätzen zu können. Sollten dabei sämtliche Geräte entsprechend der bisherigen Bewertung nur bedingt für Erhebungsmessungen geeignet sein, ist die oben erörterte Weiterentwicklung der Messgeräte anzuraten.

-
- [1] EU (2013) *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, 9* (Vol. L 13/1–L). Amtsblatt der Europäischen Union Retrieved from <http://www.bmub.bund.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/strahlenschutz/rechtsvorschriften-technische-regeln/regelungen-der-eu/>.
- [2] Strahlenschutzkommission (2006) Attributives Lungenkrebsrisiko durch Radon Expositionen in Wohnungen SSK.
- [3] Gierl, S., Meisenberg, O., Haninger, T., Wielunski, M., & Tschiersch, J. (2014) An unattended device for high-voltage sampling and passive measurement of thoron decay products *Review of Scientific Instruments*, 85(2), 022103 <http://doi.org/10.1063/1.4865163>.
- [4] Meisenberg, O., Gierl, S., & Tschiersch, J. (n.d.-d) MEASUREMENT OF THORON AND ITS PROGENY IN TRADITIONAL AND MODERN EARTHEN BUILDINGS IN GERMANY : METHODOLOGY AND RESULTS, (1), 45–53.
- [5] Irlinger, J., Wielunski, M., & Rühm, W. (2014) Thoron detection with an active Radon exposure meter—First results *Review of Scientific Instruments*, 85(2), 022106 <http://doi.org/10.1063/1.4865162>.
- [6] Wang, J., Meisenberg, O., Chen, Y., Karg, E., & Tschiersch, J. (2011) Mitigation of radon and thoron decay products by filtration *Science of the Total Environment*, 409, 3613–3619 <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.030>.
- [7] Winkler, R., Ruckerbauer, F., Trautmannsheimer, M., Tschiersch, J., & Karg, E. (2001) Diurnal and seasonal variation of the equilibrium state between short-lived radon decay products and radon gas in ground-level air *Radiation and Environmental Biophysics*, 40, 115–123 <http://doi.org/10.1007/s004110100096>.
- [8] Meisenberg, O., & Tschiersch, J. (2011) Thoron in indoor air: Modeling for a better exposure estimate *Indoor Air*, 21, 240–252 <http://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00697.x>.
- [9] Hofmann, W., Winkler-Heil, R., Truta, L. A., & Tschiersch, J. (2014) Application of a Monte Carlo lung dosimetry code to the inhalation of thoron progeny *Radiation Protection Dosimetry*, ncu061 Retrieved from <http://rpd.oxfordjournals.org/content/early/2014/04/10/rpd.ncu061.short>.
- [10] Brudecki, K., Li, W. B., Meisenberg, O., Tschiersch, J., Hoeschen, C., & Oeh, U. (2014) Age-dependent inhalation doses to members of the public from indoor short-lived radon progeny *Radiation and Environmental Biophysics*, 1–15 <http://doi.org/10.1007/s00411-014-0543-8>.
- [11] Wang, J., Meisenberg, O., Bi, L., & Tschiersch, J. (2012) MITIGATION OF THORON EXPOSURE BY APPLICATION OF, 152(1), 94–97.
- [12] Winkler, R., Dietl, F., Frank, G., & Tschiersch, J. (1998) Temporal variation of ^7Be and ^{210}Pb size distributions in ambient aerosol, 32(6).
- [13] Tschiersch, J., & Haninger, T. (2006) Comments on “adjusting lung cancer risks for temporal and spatial variations in radon concentrations in dwellings in Gansu Province,
-

China” by Lubin et al. (Radiat. Res. 163, 571-579, 2005). *Radiation Research*, 166, 120; author reply 121 <http://doi.org/RR3566> [pii]\n10.1667/RR3566.1 [doi].

- [14] Tschiersch, J., & Müsch, M. (2004) Radon exposure in homes: Is the contribution of ²²⁰Rn (Thoron) to dose always negligible?, (December), 1–7.
- [15] Bi, L., Li, W. B., Tschiersch, J., & Li, J. L. (2010) Age and sex dependent inhalation doses to members of the public from indoor thoron progeny. *Journal of Radiological Protection : Official Journal of the Society for Radiological Protection*, 30, 639–658 <http://doi.org/10.1088/0952-4746/30/4/001>.
- [16] Tschiersch, J., & Meisenberg, O. (2010) The HMGU thoron experimental house: A new tool for exposure assessment *Radiation Protection Dosimetry*, 141(4), 395–399 <http://doi.org/10.1093/rpd/ncq249>.
- [17] Taylor, B. N. (2009) *International System of Units (SI) (rev. , 2008 Ed.)*. DIANE Publishing Retrieved from <https://books.google.de/books?id=l-BIErBBel8C>.
- [18] ICRP (2007) The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection *ICRP Publication, 103* Retrieved from <http://nuclear.com/archive/2012/12/04/ML12338A682.pdf>.
- [19] Porstendörfer, J. (1994) Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air *Journal of Aerosol Science*, 25(2), 219–263 [http://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90077-9](http://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90077-9).
- [20] Cothorn, C. R., & Smith, J. E. (1987) *Environmental Radon*. Springer Retrieved from <http://books.google.de/books?id=K7WvwZlc72MC>.
- [21] ICRP (1993) Radon-222 at Home and at Work *ICRP Publication, 65*.
- [22] UNSCEAR (2000) *Sources and effects of ionizing radiation: sources* (Vol. 1). New York: United Nations Publications Retrieved from http://www.unscear.org/unscear/publications/2000_1.html.
- [23] UNSCEAR (2009) *Effects of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation-UNSCEAR 2006 Report, Volume II-Report to the General Assembly, with Scientific Annexes C, D, and E* (Vol. 2). United Nations Publications Retrieved from http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2006_2.html.
- [24] Tirmarche, M., Harrison, J. D., Laurier, D., Paquet, F., Blanchardon, E., & Marsh, J. W. (2010) Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon *Annals of the ICRP*, 40(1), 1–64 <http://doi.org/10.1016/j.icrp.2011.08.011>.
- [25] Porstendörfer, J. (1992) Indoor Behaviour and Characteristics of Radon Progeny *Radiation Protection Dosimetry*, 45(1-4), 303–311 Retrieved from <http://rpd.oxfordjournals.org/content/45/1-4/303>.
- [26] Katase, a, Matsumoto, Y., Sakae, T., & Ishibashi, K. (1988) Indoor concentrations of ²²⁰Rn and its decay products. *Health Physics*, 54(3), 283–286 <http://doi.org/10.1097/00004032-198803000-00004>.
- [27] Tuli, J. K. (2005) *Nuclear wallet cards*. BNL. N.-Y Retrieved from <http://www.pd.infn.it/~montag/didattica/FNucleare/wall47.pdf>.

-
- [28] Haynes, W. M. (2014) *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 95th Edition*. CRC Press Retrieved from <https://books.google.de/books?id=TdnhAwAAQBAJ>.
- [29] Gehrcke, K., Hoffmann, B., Schkade, U., Schmidt, V., & Wichterey, K. (2012, November) Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien und die daraus resultierende Strahlenexposition Retrieved from <https://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-201210099810>.
- [30] Eckerman, K., & Endo, A. (2007) ICRP Publication 107. Nuclear decay data for dosimetric calculations. *Annals of the ICRP*, 38(3), 7–96 Retrieved from <http://europepmc.org/abstract/MED/19285593>.
- [31] Chauhan, R. P., Nain, M., & Kant, K. (2008) Radon diffusion studies through some building materials: Effect of grain size *Radiation Measurements*, 43, Supple, S445–S448 <http://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.03.013>.
- [32] Tommasino, L., Tokonami, S., & Tommasino, P. M. (2010) The measurements of thoron, radon and their decay products thanks to Pinocchio, Tengu and Trolls *Radiation Protection Dosimetry*, 141(4), 340–345 <http://doi.org/10.1093/rpd/ncq248>.
- [33] M, D., K, F., S, K., & H, Y. (1994) Spatial distribution of thoron and radon concentrations in the indoor air of a traditional Japanese wooden house. *Health Physics*, 66(1), 43–49 Retrieved from <http://europepmc.org/abstract/MED/8253577/reload=0;jsessionid=mlQgmEh6QiAXhqGxo8gf.24>.
- [34] Porstendörfer, J. (1984) Behaviour of Radon Daughter Products in Indoor Air *Radiation Protection Dosimetry*, 7(1-4), 107–113 Retrieved from <http://rpd.oxfordjournals.org/content/7/1-4/107>.
- [35] Renken, K. J., & Rosenberg, T. (1995) Laboratory measurements of the transport of radon gas through concrete samples. *Health Physics*, 68(6), 800–808 Retrieved from <http://europepmc.org/abstract/MED/7759258>.
- [36] Cussler, E. L. (2009) *Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems*. Cambridge University Press Retrieved from <http://books.google.de/books?id=dq6LdJyN8ScC>.
- [37] Wilkening, M. (1990) Radon - Soil to Air (p. 46). Elsevier Retrieved from <http://books.google.de/books?id=j4hyitQQRBkC>.
- [38] Sorimachi, A., Takahashi, H., & Tokonami, S. (2009) Influence of the presence of humidity, ambient aerosols and thoron on the detection responses of electret radon monitors *Radiation Measurements*, 44(1), 111–115 <http://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.10.009>.
- [39] Hänel, G. (1977) Humidity effects on gravitational settling and Brownian diffusion of atmospheric aerosol particles *Pure and Applied Geophysics*, 115(4), 775–797 <http://doi.org/10.1007/BF00881210>.
- [40] Yamasaki, T., Guo, Q., & Iida, T. (1995) Distributions of Thoron Progeny Concentrations in Dwellings *Radiation Protection Dosimetry*, 59(2), 135–140 Retrieved from <http://rpd.oxfordjournals.org/content/59/2/135>.

-
- [41] Ramamurthi, M., & Hopke, P. K. (1989) On improving the validity of wire screen “unattached” fraction Rn daughter measurements. *Health Physics*, 56, 189–194 <http://doi.org/10.1097/00004032-198902000-00006>.
- [42] Porstendorfer, J., & Mercer, T. T. (1979) Influence of electric charge and humidity upon the diffusion coefficient of radon decay products *Health Physics*, 37(2), 191–199 Retrieved from http://journals.lww.com/health-physics/Abstract/1979/08000/Influence_of_Electric_Charge_and_Humidity_Upon_the.1.a.spx.
- [43] Underhill, D. W. (1993) Basic theory for the diffusive sampling of radon. *Health Physics*, 65, 17–24 <http://doi.org/10.1097/00004032-199307000-00003>.
- [44] Guo, Q., Iida, T., Okamoto, K., & Yamasaki, T. (1995) Measurements of Thoron Concentration by Passive Cup Method and Its Application to Dose Assessment *Journal of Nuclear Science and Technology* <http://doi.org/10.1080/18811248.1995.9731775>.
- [45] Zhou, W., Iida, T., Moriizumi, J., Aoyagi, T., & (invited), I. T. (2001) Simulation of the Concentrations and Distributions of Indoor Radon and Thoron *Radiation Protection Dosimetry*, 93(4), 357–367 Retrieved from <http://rpd.oxfordjournals.org/content/93/4/357>.
- [46] Urosevic, V., Nikezic, D., & Vulovic, S. (2008) A theoretical approach to indoor radon and thoron distribution *Journal of Environmental Radioactivity*, 99(12), 1829–1833 <http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.07.010>.
- [47] Narula, A. K., Goyal, S. K., Saini, S., Chauhan, R. P., & Chakarvarti, S. K. (2009) Calculation of radon diffusion coefficient and diffusion length for different building construction materials *Indian Journal of Physics*, 83(8), 1171–1175 <http://doi.org/10.1007/s12648-009-0097-9>.
- [48] Keller, G., Hoffmann, B., & Feigenspan, T. (2001) Radon permeability and radon exhalation of building materials *Science of The Total Environment*, 272(1–3), 85–89 [http://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00669-6](http://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00669-6).
- [49] Jacobi, W. (1972) Activity and Potential Alpha-energy of 222Radon and 220Radon daughters in Different Air Atmospheres *Health Physics*, 22(5), 441–450 Retrieved from http://journals.lww.com/health-physics/Abstract/1972/05000/Activity_and_Potential_Alpha_energy_of_222Radon.2.aspx.
- [50] Porstendörfer, J., Wicke, A., & Schraub, A. (1978) The influence of exhalation, ventilation and deposition processes upon the concentration of radon (222Rn), thoron (220Rn) and their decay products in room air *Health Physics*, 34(5), 465–473 Retrieved from http://journals.lww.com/health-physics/Abstract/1978/05000/The_Influence_of_Exhalation,_Ventilation_and.7.aspx.
- [51] Thomas, J., & Jílek, K. (2010) Inversion of the Jacobi-Porstendörfer room model for the radon progeny, 55(4), 0–4.
- [52] Knutson, E. O., Nazaroff, W., & Nero, A. (1988) Modeling indoor concentrations of radon’s decay products. *Radon and its Decay Products in Indoor Air*. J J. Wiley and Sons, New York.
- [53] Meisenberg, O. (2010) Specific properties of a model of thoron and its decay products in indoor atmospheres *Nukleonika*, 55(June 2009), 463–469.
-

-
- [54] De With, G., & de Jong, P. (2011) Simulation of thoron and thoron progeny concentrations in the indoor environment *Journal of Building Physics*, 35, 101–127 <http://doi.org/10.1177/1744259111398634>.
- [55] Mishra, R., Prajith, R., Sapra, B. K., & Mayya, Y. S. (2010) Response of direct thoron progeny sensors (DTPS) to various aerosol concentrations and ventilation rates *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268(6), 671–675 <http://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.12.012>.
- [56] Janik, M., Tokonami, S., Kranrod, C., Sorimachi, A., Ishikawa, T., Hosoda, M., ... Kim, Y. J. (2013) Comparative analysis of radon, thoron and thoron progeny concentration measurements. *Journal of Radiation Research*, 54(January), 597–610 <http://doi.org/10.1093/jrr/rrs129>.
- [57] Sarenio, O. (2002) *Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten, Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission*. Bonn.
- [58] Keller, G., Folkerts, K. H., & Muth, H. (1982) Activity concentrations of ²²²Rn, ²²⁰Rn, and their decay products in german dwellings, dose calculations and estimate of risk *Radiation and Environmental Biophysics*, 20(4), 263–274 <http://doi.org/10.1007/BF01323752>.
- [59] Reineking, A., Butterweck, G., Kesten, J., & Porstendörfer, J. (1992) Thoron gas concentration and aerosol characteristics of thoron decay products *Radiation Protection Dosimetry*, 45(1-4), 353–356 Retrieved from <http://rpd.oxfordjournals.org/content/45/1-4/353.short>.
- [60] Peter, J. (1996) Measurements of Rn-220 Decay Product Concentrations in German Dwellings (p. 131). Wien: IRPA Retrieved from <https://books.google.de/books?id=B-mwtwAACAAJ>.
- [61] Gierl, S., Meisenberg, O., Feistenauer, P., Tschiersch, J., & Mu, H. Z. (2014) THORON AND THORON PROGENY MEASUREMENTS IN GERMAN CLAY HOUSES, 1–4.
- [62] Nuccetelli, C., & Bochicchio, F. (1998) The Thoron Issue: Monitoring Activities, Measuring Techniques and Dose Conversion Factors *Radiation Protection Dosimetry*, 78(1), 59–64 Retrieved from <http://rpd.oxfordjournals.org/content/78/1/59>.
- [63] Wiegand, J., Feige, S., Quingling, X., Schreiber, U., Wieditz, K., Wittmann, C., & Xiarong, L. (2000) Radon and thoron in cave dwellings (Yan'an, China) *Health Physics*, 78(4), 438–444 Retrieved from http://journals.lww.com/health-physics/Abstract/2000/04000/Radon_and_Thoron_in_Cave_Dwellings__Yan_an,_China_.8.aspx.
- [64] Sreenath Reddy, M., Yadagiri Reddy, P., Rama Reddy, K., Eappen, K. P., Ramachandran, T. V., & Mayya, Y. S. (2004) Thoron levels in the dwellings of Hyderabad city, Andhra Pradesh, India *Journal of Environmental Radioactivity*, 73, 21–28 <http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2003.07.002>.
- [65] Shang, B., Tschiersch, J., Cui, H., & Xia, Y. (2008) Radon survey in dwellings of Gansu, China: The influence of thoron and an attempt for correction *Radiation and Environmental Biophysics*, 47, 367–373 <http://doi.org/10.1007/s00411-008-0163-2>.

-
- [66] ICRP (1994) *Human respiratory tract model for radiological protection: A report of a task group of the International Commission on Radiological Protection*. Elsevier Health Sciences.
- [67] ICRP (1987) Exposure and dose to lung tissues *Annals of the ICRP*, 17(1), 11–17 [http://doi.org/10.1016/0146-6453\(87\)90041-8](http://doi.org/10.1016/0146-6453(87)90041-8).
- [68] Lehmbau Verbrauchsinformation (n.d.-bp) Retrieved from http://www.dachverband-lehm.de/pdf/DVL_consumerinfo_gb.pdf.
- [69] Statistisches Bundesamt (2014, October) Bestand an Wohnungen - Fachserie 5 Reihe 3 - 2013 Retrieved from <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bauen/Wohnsituation/BestandWohnungen2050300137004.pdf>.
- [70] Shang, B., Chen, B., Gao, Y., Wang, Y., Cui, H., & Li, Z. (2005) Thoron levels in traditional Chinese residential dwellings *Radiation and Environmental Biophysics*, 44, 193–199 <http://doi.org/10.1007/s00411-005-0020-5>.
- [71] Yamada, Y., Tokonami, S., Zhuo, W., Yonehara, H., Ishikawa, T., Furukawa, M., ... Akiba, S. (2005) Rn-Tn discriminative measurements and their dose estimates in Chinese loess plateau *International Congress Series*, 1276, 76–80 <http://doi.org/10.1016/j.ics.2004.09.054>.
- [72] Kim, C. K., Kim, Y. J., Lee, H. Y., Chang, B. U., & Tokonami, S. (2007) 220Rn and its progeny in dwellings of Korea *Radiation Measurements*, 42, 1409–1414 <http://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.06.012>.
- [73] Chen, J., Moir, D., Sorimachi, A., & Tokonami, S. (2011) Characteristics of thoron and thoron progeny in Canadian homes *Radiation and Environmental Biophysics*, 50, 85–89 <http://doi.org/10.1007/s00411-010-0338-5>.
- [74] McLaughlin, J., Murray, M., Currivan, L., Pollard, D., Smith, V., Tokonami, S., ... Janik, M. (2011) Long-term measurements of thoron, its airborne progeny and radon in 205 dwellings in Ireland *Radiation Protection Dosimetry*, 145(2-3), 189–193 <http://doi.org/10.1093/rpd/ncr067>.
- [75] Stojanovska, Z., Bossew, P., Tokonami, S., Zunic, Z. S., Bochicchio, F., Boev, B., ... Januseski, J. (2013) National survey of indoor thoron concentration in FYR of Macedonia (continental Europe – Balkan region) *Radiation Measurements*, 49, 57–66 <http://doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.11.023>.
- [76] Dekkers, F., Blaauboer, R., & Slaper, H. (2014) Thoron in the Netherlands – an unexpected exposure (p. 194) Retrieved from <http://www.irpa2014europe.com/downloads/>.
- [77] Radosys (2015, February) RADUET type detector with combined radon-thoron detection Retrieved from <http://www.radosys.com/thoron.htm>.
- [78] ZHUO, W., & IIDA, T. (2000) Estimation of Thoron Progeny Concentrations in Dwellings with Their Deposition Rate Measurements. *Japanese Journal of Health Physics* <http://doi.org/10.5453/jhps.35.365>.

-
- [79] Janik, M., Ishikawa, T., Omori, Y., & Kavasi, N. (2014) Invited Article: Radon and thoron intercomparison experiments for integrated monitors at NIRS, Japan *Review of Scientific Instruments*, 85(2), 022001 <http://doi.org/10.1063/1.4865159>.
- [80] ISO (2012) ISO 11665-1:2012 -Measurement of radioactivity in the environment — Air — Part 1 : Origins of radon and its short-lived decay products and associated measurement methods, 2012(11665-1).
- [81] Plastino, W., De Felice, P., & de Notaristefani, F. (2002) Radon gamma-ray spectrometry with YAP:Ce scintillator *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 486(1–2), 146–149 [http://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)00692-7](http://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)00692-7).
- [82] ISO (2014) *ISO 16641:2014 - Measurement of radioactivity in the environment -- Air -- Radon 220: Integrated measurement methods for the determination of the average activity concentration using passive solid-state nuclear track detectors* Retrieved from http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=57347.
- [83] ISO (2012) *ISO 11665-2:2012 - Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 2: Integrated measurement method for determining average potential alpha energy concentration of its short-lived decay products* Retrieved from http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=52188.
- [84] ISO (2012) *ISO 11665-3:2012 - Measurement of radioactivity in the environment -- Air: radon-222 -- Part 3: Spot measurement method of the potential alpha energy concentration of its short-lived decay products* Retrieved from http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=52189.
- [85] DIN (2009) *DIN IEC 61577-4 (VDE 0493-1-1 0-4:2009) - Strahlenschutz-Messgeräte - Geräte für die Messung von Radon und Radon-Folgeprodukten- Teil 4: Einrichtungen für die Herstellung von Referenzatmosphären mit Radonisotopen und ihren Folgeprodukten (STAR)*. Beuth Retrieved from <https://www.vde-verlag.de/normen/0400125/din-en-61577-4-vde-0493-1-10-4-2015-03.html>.
- [86] DIN (2012) *DIN IEC 61577-3 (VDE 0493-1-10-3):2012-06 Strahlenschutz-Messgeräte - Messgeräte für Radon und Radonfolgeprodukte - Teil 3: Besondere Anforderungen an Messgeräte für Radonfolgeprodukte*. Beuth Retrieved from <http://www.beuth.de/de/norm/din-iec-61577-3-vde-0493-1-10-3-2012-06/151132443>.
- [87] Beck, T. (2009) *Spezielle Anforderungen an Geräte zur Bestimmung der Strahlenexposition durch Radon- und Radonzerfallsprodukte*. Bundesamt für Strahlenschutz Retrieved from https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2009042344/1/BfS_2009_BfS-SW-04-09.pdf.
- [88] Bernhard-Ströl, C., Gödde, R., Hachenberger, C., Löbke-Reinl, A., & Schmitt-Hannig, A. (2009, January) *Strahlenschutzforschung : Programmreport 2007 ; Bericht über das vom Bundesamt für Strahlenschutz fachlich begleitete und administrativ umgesetzte Forschungsprogramm Strahlenschutz des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit* Retrieved from <https://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2009011200>.
- [89] Vorschriften, A. (2002) *Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen*, 1–123 Retrieved from http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/strlrschv_2001/gesamt.pdf.

-
- [90] Ausschuss für Gefahrstoffe (2006) Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900)(aktualisiert 2010) *GMBI*, 43, 912–913 Retrieved from http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/TRGS-900.pdf;jsessionid=7FFDC5FC70936345A3F366F805CD4B85.1_cid333?__blob=publicationFile&v=19.
- [91] Eversheim, W., & Schuh, G. (2013) *Produktion und Management 3: Gestaltung von Produktionssystemen*. Springer-Verlag Retrieved from <https://books.google.de/books?id=DZ7NBgAAQBAJ>.
- [92] Durrige (2014) RAD7 RADON DETECTOR User Manual Retrieved from <http://www.durrige.com/documentation/RAD7Manual.pdf>.
- [93] Sumesh, C. G., Kumar, A. V., Tripathi, R. M., & Puranik, V. D. (2013) Comparison study and thoron interference test of different radon monitors *Radiation Protection Dosimetry*, 153(3), 309–315 <http://doi.org/10.1093/rpd/ncs118>.
- [94] Sorimachi, A., Tokonami, S., Omori, Y., & Ishikawa, T. (2012) Performance test of passive radon–thoron discriminative detectors on environmental parameters *Radiation Measurements*, 47(6), 438–442 <http://doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.04.003>.
- [95] Sarad-GmbH (2013, December) Sarad RTM1688-2 Retrieved from http://sarad.de/cms/media/docs/handbuch/Handbuch_RT1688-2_DE_17-12-13.pdf.
- [96] Sarad-GmbH (2015, February) EQF 3200 - Radon/Thoron Gas- und Folgeprodukt Mess-System Retrieved from http://sarad.de/product-detail.php?p_ID=39.
- [97] Tokonami, S., Yonehara, H., Akiba, S., Thampi, M. V., Zhuo, W., Narazaki, Y., & Yamada, Y. (2005) Natural radiation levels in Tamil Nadu and Kerala, India *Radioactivity in the Environment*, 7, 554–559 Retrieved from http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569486004070664/pdf?md5=74c9d1c0d185bbefa176e07bfff6391e&pid=1-s2.0-S1569486004070664-main.pdf&_valck=1.
- [98] Mishra, R., & Mayya, Y. S. (2008) Study of a deposition-based direct thoron progeny sensor (DTPS) technique for estimating equilibrium equivalent thoron concentration (EETC) in indoor environment *Radiation Measurements*, 43, 1408–1416 <http://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.03.002>.
- [99] UNSCEAR (2010) *UNSCEAR 2008 Report, Vol. I: Sources of ionizing radiation. Annex A: Medical Radiation Exposures*. New York, NY: United Nations.
- [100] Kochowska, E., Kozak, K., Kozłowska, B., Mazur, J., & Dorda, J. (2009) Test measurements of thoron concentration using two ionization chambers AlphaGUARD vs. radon monitor RAD7 *Nukleonika*, 54(3), 189–192 Retrieved from http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:40103343.
- [101] Röttger, A., Honig, A., & Linzmaier, D. (2014) Calibration of commercial radon and thoron monitors at stable activity concentrations *Applied Radiation and Isotopes*, 87, 44–47 <http://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.11.111>.
- [102] MI.AM (n.d.-cx) MI.AM - Strumentazione e Dosimetria Radon Retrieved from <http://www.miam.it/prodotto.aspx?id=40&idcat=16&azione=o>.
- [103] Pylon (2015, February) WLx Working Level Monitor Retrieved from <http://www.pyronelectronics.com/pylonpdfs/DS102R2.pdf>.

-
- [104] Saphymo (2015, February) AlphaGUARD Radon monitor Retrieved from http://www.genitron.de/products/alpha_slides.html.
- [105] Sarad-GmbH (2015, February) DOSEman PRO - Radonfolgeprodukt Exposimeter/Dosimeter Retrieved from http://sarad.de/product-detail.php?p_ID=30.
- [106] TRACERLAB (2015, February) BWLM-PLUS-2S Retrieved from <http://www.tracerlab.com/cataloge/index.htm>.
- [107] Mishra, R., Sapra, B. K., & Mayya, Y. S. (2009) Development of an integrated sampler based on direct $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ progeny sensors in flow-mode for estimating unattached/attached progeny concentration *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 267(21-22), 3574–3579 <http://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.08.021>.
- [108] Mishra, R., Sapra, B. K., & Mayya, Y. S. (2014) Multi-parametric approach towards the assessment of radon and thoron progeny exposures *Review of Scientific Instruments*, 85(2), 022105 <http://doi.org/10.1063/1.4865165>.
- [109] Bi, L., Tschiersch, J., Meisenberg, O., Wielunski, M., Li, J. L., & Shang, B. (2011) Development of a new thoron progeny detector based on ssntd and the collection by an electric field *Radiation Protection Dosimetry*, 145(2), 288–294 <http://doi.org/10.1093/rpd/ncr078>.