Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS
LABOR SPIEZ

Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik

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

Entwicklung von messtechnischen Verfahren für Zulassungen und Typenprüfungen von Radonmessgeräten hinsichtlich der Neuregelung in der neuen Strahlen-Messmittel-Verordnung (StMmV)

Teil 5

Raphael Grapentin

8. August 2024

Zusammenfassung

Es gibt diverse Geräte zur Messung von Radon in Luft. Dabei gibt es in der Schweiz die gesetzliche Grundlage, um ein Gerät als Radonmessgerät oder als Radondosimeter zuzulassen. Diese Zulassung ermöglicht anerkannten Radonmessstellen mit diesen Geräten eine anerkannte Radonmessung durchzuführen. Für die Zulassung der Radonmessgeräte oder -dosimeter müssen bestimmte Bedingungen erfüllt werden, welche die Messgenauigkeit und den Messbereich betreffen. In diesem Bericht wurde untersucht, ob die Parameter der Luft, also Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck, einen Einfluss auf die Messgeräte haben und dazu führen könnten, dass ein Gerät die Bedingungen für die Zulassung nicht erfüllt.

Die relevanten Parameter der Luft können sich bei Radonmessungen stark voneinander unterscheiden. So wird Radon häufig in Wohnräumen und Kellerräumen gemessen, ebenso wichtig sind Messungen an radonexponierten Arbeitsplätzen. Diese können grosse Unterschiede in der Temperatur und Luftfeuchtigkeit aufweisen. Unterschiedliche Luftdrücke sind zum Beispiel bei Messungen in grossen Höhen vorhanden.

Die Messung von Radonkonzentrationen erfolgt oft über die Detektion der Alpha-Strahlung beim Zerfall von ^{222}Rn oder dessen Folgeprodukte. Ebenso sind Messgeräte, welche die Gamma-Strahlung gewisser Folgeprodukte messen, verbreitet. Bei der Messung der Alpha-Strahlung ist dessen Reichweite und die Messgeometrie massgebend für die Kalibrierung eines Gerätes. Mit zunehmender Dichte des Mediums, also der Luft, nimmt die Alpha-Reichweite ab und umgekehrt. Es ist gegeben, dass die Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck die Dichte der Luft beeinflussen und somit die Messgenauigkeit eines Messgeräts beeinflussen können. Solche Effekte können bei den meisten Messgeräten auftreten.

Eine Versuchsreihe wurde durchgeführt um die theoretischen Grundlagen anzuwenden. Dabei wurden ein AlphaGUARD und ein RadonMAPPER in 27 Messreihen unterschiedlichen Parametern, Radonkonzentration, Temperatur und Luftfeuchtigkeit, ausgesetzt und deren Messwerte mit der Referenzkonzentration verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Radonmapper bei 10 °C und 1000 Bq/m^3 einen Mittelwert von 93 % der Referenzkonzentration gemessen hat, bei einer Standardabweichung von 3 %, bei 20 °C wurden 94±4 % und bei 30 °C wurden 96±4 % gemessen. Beim AlphaGUARD wurden umgekehrt 104 ± 10 %, 100 ± 10 % und 95 ± 10 % bei 10 °C, 20 °C respektive 30 °C gemessen. Eine Abhängigkeit der Messwerte von der Luftfeuchtigkeit wurde nicht festgestellt.

Damit wurde gezeigt, dass RadonMAPPER und AlphaGUARD eine Abhängigkeit der Messwerte sowie der Standardabweichung von der Temperatur aufweisen. Mithilfe einer linearen Extrapolation konnte jedoch gezeigt werden, dass die Anforderungen für die Eichung der Radonmessgeräte über den gesamten Betriebsbereich der Temperatur erfüllt sind.

Ein Vergleich der Messdaten mit Studien zeigt, dass weitere Untersuchungen nötig sind, um abschliessend zu klären, wie die Geräte von den Parametern beeinflusst werden.

Zu Radondosimetern wurde keine Messreihe durchgeführt. Auch gibt es keine umfassenden Studien oder Untersuchungen, die zeigen, ob solche Dosimeter von den Parametern der Luft beeinflusst werden.

Daraus ergibt sich, dass für Radonmessgeräte und Radondosimeter weitere Untersuchungen nötig sind, um den Einfluss von Umweltparametern auf Radonmessungen zu belegen. Eine Anpassung der Anforderungen an Radonmessgeräte und -dosimetern wäre zum jetzigen Zeitpunkt verfrüht und nicht ausreichend belegt.

Danksagung

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

Vorwort

Dieser Bericht schliesst die Bearbeitung des fünften Ziels des Forschungsprojektes Radon VBS ab, daher handelt es sich bei diesem Bericht um Teil 5. Das Forschungsprojekt ist eine Zusammenarbeit des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz BABS des Eidgenössischen Departements für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS und der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW. Es besteht aus sieben Zielen, die im Zeitraum von September 2022 bis August 2025 bearbeitet werden. Zu jedem der sieben Ziele wird ein Bericht im selben Format erscheinen. Der Titel des hier bearbeiteten fünften Ziels ist die „Entwicklung von messtechnischen Verfahren für Zulassungen und Typenprüfungen von Radonmessgeräten hinsichtlich der Neuregelung in der neuen Strahlen-Messmittel-Verordnung (StMmV)“. Dabei sollen insbesondere die Einflüsse von Umweltparametern auf Messsysteme untersucht werden. Dieser Bericht richtet sich an Leserinnen und Leser mit fundierten Kenntnissen im Radonbereich, weshalb auf eine allgemeine Einführung in das Thema verzichtet wird.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung **7**
1.1 Radon und Radonmessungen . . . 7
1.2 Gesetzeslage bei Radonmessgeräten . . . 7
1.2.1 Radonmessgeräte . . . 8
1.2.2 Radondosimeter . . . 8
1.3 Was zeigt dieser Bericht . . . 8

2 Einfluss von Umweltparametern auf Radonmessungen **10**
2.1 Umweltparameter . . . 10
2.2 Alpha-Reichweite . . . 11
2.3 Einfluss auf Detektoren . . . 11
2.3.1 Passive Detektoren . . . 12
2.3.2 Ionisationskammer-Detektoren . . . 13
2.3.3 Lucas-Zellen und Szintillationsdetektoren . . . 14
2.3.4 Weitere Detektoren . . . 14
2.4 Nachweis von Radon-Folgeprodukten . . . 15
2.4.1 Messmethoden . . . 15
2.4.2 Einflüsse von Umweltparametern . . . 15

3 Messergebnisse als Praxisbeispiele **16**
3.1 Einleitung . . . 16
3.2 Methoden . . . 16
3.2.1 Radonkammer . . . 16
3.2.2 Messgeräte . . . 17
3.2.3 Messreihen . . . 17
3.3 Ergebnisse . . . 17
3.3.1 Ziel- und Messwerte der Parameter . . . 17
3.3.2 Messergebnisse RadonMAPPER . . . 18
3.3.3 Messergebnisse AlphaGUARD PQ2000 Pro . . . 20
3.4 Diskussion und Interpretation . . . 20
3.4.1 Untergrund . . . 20
3.4.2 Temperaturabhängigkeit . . . 22
3.4.3 Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit . . . 22

4 Diskussion **23**
4.1 Radonmessgeräte . . . 23
4.1.1 Messergebnisse . . . 23
4.1.2 Ionisationskammer und AlphaGUARD . . . 24

4.1.3 Lucas-Zelle und RadonMAPPER 25
4.1.4 Weitere Untersuchungen 25
4.2 Radondosimeter 26

5 Schlussfolgerung **27**

A **28**

B **29**

Kapitel 1

Einführung

1.1 Radon und Radonmessungen

Der gut erforschte Ursprung und die bekannten gesundheitlichen Gefahren durch Radon erfordern Möglichkeiten, gezielte Massnahmen zum Schutz vor Radon ergreifen zu können. Dazu sind Messgeräte nötig, die zuverlässig Radon messen. Dabei kann unterschieden werden zwischen zeitaufgelösten elektronischen oder passiven integrierenden Messgeräten. Es gibt zugelassene Radonmessgeräte und Radondosimeter, die, bei korrekter Anwendung durch eine anerkannte Radonmessstelle, zu einer anerkannten Radonmessung führen. Der Ablauf einer solchen Messung ist in Messprotokollen vorgeschrieben [1]. Dadurch kann die Qualität und Vergleichbarkeit von Radonmessungen in der Schweiz sichergestellt werden.

Anhand der Messergebnisse kann anschliessend eine ausgebildete Radonfachperson über die Notwendigkeit und Art der Schutzmassnahmen entscheiden und solche umsetzen [2]. Während der Umsetzung kommen oft nicht zugelassene Messmittel zum Einsatz, da diese meist kostengünstiger sind. Sobald die Massnahmen abgeschlossen sind, ist es wichtig erneut eine anerkannte Radonmessung mit zugelassenen Messgeräten durchzuführen, um den Erfolg zu dokumentieren.

Im folgenden Abschnitt werden die gesetzlichen Vorgaben zu anerkannten Radonmessgeräten und Radondosimetern beschrieben. Die weiteren Abschnitte in Kapitel 2 beschreiben allgemeine Phänomene und Zusammenhänge, die bei allen Messgeräten auftreten können und nicht nur bei zugelassenen.

1.2 Gesetzeslage bei Radonmessgeräten

Basierend auf der Messmittelverordnung vom 15. Februar 2006 (MessMV) bildet die Verordnung des Eidgenössisches Justiz- und Polizeidepartement (EJPD) über Messmittel für ionisierende Strahlung (StMmV) die Grundlage bei Messgeräten für Radon [3, 4]. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen Radonmessgeräten und Radondosimetern. Dabei sind Radonmessgeräte aktive elektronische Messgeräte, welche die Radonkonzentration zeitaufgelöst messen. Radondosimeter sind passive Messgeräte, welche die Radonexposition über einen längeren Zeitraum integrieren.

Längst nicht alle Geräte, die als Radonmessgeräte verkauft werden, sind auch als solche zugelassen. Im Gegensatz zu zugelassenen Radonmessgeräten mangelt es solchen Geräten an Messgenauigkeit oder am Messbereich, der abgedeckt werden kann oder es wurde noch keine Zulassung beantragt [5].

Nachfolgend werden die Vorgaben für Radonmessgerät und Radondosimeter präsentiert, die erfüllt werden müssen um eine Zulassung zu erreichen und aufrecht zu erhalten.

1.2.1 Radonmessgeräte

Gemäss Art. 23 StMmV bedürfen Radonmessgeräte „[...] einer ordentlichen Zulassung und einer Ersteichung [...]“ bevor diese als solche in Verkehr gebracht werden dürfen. Um diese Zulassung zu erhalten, sind messtechnische Anforderungen zu erfüllen, wie sie in in Tabelle 1.1 aufgeführt sind.

Weiter müssen zugelassene Radonmessgeräte alle vier Jahre nachgeeicht werden (Art. 24 StMmV). Diese Eichung kann am Eidgenössischen Instituts für Metrologie (METAS) oder einem ermächtigten Eichinstitut durchgeführt werden. Bei der Eichung ist eine maximale Abweichung von 20 % von der Referenzkonzentration zulässig.

1.2.2 Radondosimeter

Auch Radondosimeter „[...] bedürfen einer ordentlichen Zulassung [...]“ (Art. 26 StMmV), wofür die Anforderungen aus Tabelle 1.1 erfüllt sein müssen. Im Gegensatz zu den Radonmessgeräten, müssen Radondosimeter alle zwei Jahre an einer Vergleichsmessung teilnehmen [4].

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

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

(2) Abweichung unter 10 % zwischen 10 Bq/m^3 und 10 000 Bq/m^3

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

Tabelle 1.1: Übersicht über die Anforderungen an Radonmessgeräte und Radondosimeter gemäss StMmV [4]. Es ist zu beachten, dass die Angaben über die Linearität nur in einem bestimmten Bereich gelten, dieser ist kleiner als der Messbereich, der abgedeckt werden muss.

1.3 Was zeigt dieser Bericht

Wie in den vorherigen Abschnitten dargelegt, ist unter anderem die Messgenauigkeit der Geräte entscheidend für eine Zulassung als Radonmessgerät oder Radondosimeter. Dabei gibt es mögliche äussere Einflüsse, welche die Messgenauigkeit beeinflussen können, so zum Beispiel die Lufttemperatur und -feuchtigkeit und Druck. Vor allem bei Radonmessgeräten und -dosimetern müssen die Einflüsse solcher Parameter untersucht werden. So werden viele Messungen in Wohnräumen aber auch an radonexponierten Arbeitsplätzen in unterirdischen Bauwerken gemacht. An diesen Messorten sind die Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck sehr unterschiedlich.

In einem vorherigen Bericht wurde der Umbau und die Funktion der Radonkammer des METAS beschrieben, wobei auch die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit in der Kammer während einer Messreihe gesteuert werden können [6].

In diesem Bericht werden die möglichen Einflüsse von verschiedenen Parametern der Luft auf die Messung von Radon zuerst theoretisch beschrieben und anschliessend Messergebnisse präsentiert. Weiter wird darüber diskutiert, ob die Anforderungen an Radonmessgeräte und -dosimeter angepasst werden sollen, um die Einflüsse dieser Parameter zu berücksichtigen.

Kapitel 2

Einfluss von Umweltparametern auf Radonmessungen

In diesem Kapitel werden die Einflüsse von Umweltparametern auf Radonmessungen aus einer technischen Sicht untersucht. Dabei werden ausschliesslich physikalische Effekte auf die Messsysteme beschrieben und nicht die Auswirkungen dieser Parameter auf die Nutzung von Objekten oder das Verhalten von Personen.

Dieses Kapitel betrachtet zuerst die relevanten Parameter, anschliessend werden die physikalischen Effekte der Strahlung, danach die Messgenauigkeiten von Detektionssystemen diskutiert.

2.1 Umweltparameter

Radon ist gasförmig und kommt in der Luft vor, wo es auch gemessen wird. Die meisten Messsysteme bestehen aus Messkammern, welche mit der zu messenden Luft gefüllt sind. Aus diesem Grund sind die Eigenschaften der Luft massgebend und wirken sich auf die Messsysteme aus. In diesem Bericht werden

- die Lufttemperatur,
- die Luftfeuchtigkeit und
- der Luftdruck

berücksichtigt und als Umweltparameter bezeichnet.

Des weiteren wird die Zusammensetzung der Luft nach Standardbedingungen angenommen, wie in [7], und das Vorhandensein anderer Gase, ausgenommen Wasserdampf, vernachlässigt. Bei Radonmessungen in Wohnräumen oder an Arbeitsplätzen kann angenommen werden, dass die Luft ausreichend frei von Schadstoffen ist. Eine Besonderheit bilden dabei radonexponierte Arbeitsplätze möglicherweise im Bergbau oder in anderen Anlagen, wo die Zusammensetzung der Luft stark von den Standardbedingungen abweichen kann. Eine weitere Prüfung solcher Situationen ist erforderlich.

Bei den untersuchten Parametern werden ebenfalls Wertebereiche angenommen, wie sie zum Beispiel in Wohnräumen oder Arbeitsplätzen herrschen. So kann die Temperatur zwischen 0 °C und 40 °C liegen, wobei ebenfalls spezielle Arbeitsplätze ausserhalb dieses Bereiches liegen können.

Die relative Luftfeuchtigkeit kann zwischen nahe 0 % und 100 % liegen. Wobei die relative Luftfeuchtigkeit in Wohnräumen zwischen 40 % und 60 % und nur an speziellen Arbeitsplätzen den gesamten Bereich abdecken, so zum Beispiel in unterirdischen Gebäuden oder Bauwerken zur Wasserversorgung.

Der Luftdruck wird ebenfalls in einem Bereich betrachtet, der den anzutreffenden Bedingungen entspricht. Dabei kann in einer grossen Höhe ein sehr tiefer Lufdruck um beispielsweise 600 hPa erreicht werden. Auf genaue Werte soll nicht weiter eingegangen werden.

2.2 Alpha-Reichweite

Der Nachweis und die Messung von Radon und der Radonkonzentration in der Luft geschieht bei vielen Messsystemen über die Detektion von Alpha-Strahlung. Beispiele für solche Detektoren sind passive Kernspur- und Elektretdetektoren oder elektrische Ionsiaitonskammer- und Szintillationsdetektoren. Dabei ist die Kalibrierung der Geräte von der Geometrie, der Alpha-Reichweite im Messmedium und weiteren Faktoren abhängig. Die Einflüsse der Umweltparameter auf die Reichweite der Alpha-Strahlung werden im Folgenden diskutiert.

Radon-222 und einige der Folgeprodukte zerfallen über einen Alpha-Zerfall. Dabei wird ein Alpha-Teilchen, also ein Helium-Kern, ausgesendet. Dieses Teilchen interagiert mit den umgebenden Atomen der Luft und verliert Energie, mit zunehmender Strecke, bis es zum Stillstand kommt. Die zurückgelegte Strecke nennt man die Reichweite. Betrachtet man einen kontinuierlichen Fluss von Teilchenstrahlung, wie es bei einer radioaktiven Quelle meistens der Fall ist, dann ist die Reichweite, die mittlere Strecke, welche die Alpha-Teilchen zurücklegen.

Da das Alpha-Teilchen bei der Interaktion mit Atomen der Luft Energie verliert, ist seine Reichweite massgeblich von der Dichte des Mediums, also der Luft, abhängig. Mit zunehmender Dichte steigt die Anzahl an Interaktionen pro Strecke und die Alpha-Reichweite nimmt ab [8].

Aus den Zustandsgleichungen idealer Gase folgt, dass bei gleicher Temperatur, ein höherer Druck zu einer grösseren Dichte führt. Und eine grössere Dichte bedeutet eine geringere Reichweite der Alpha-Teilchen. Umgekehrt führt eine höhere Temperatur bei gleichem Druck zu einer geringeren Dichte und damit zu einer grösseren Alpha-Reichweite [9].

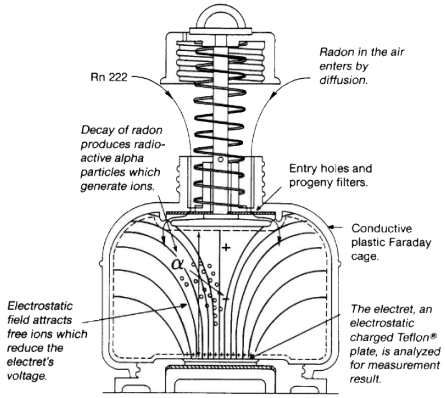
Die (relative) Luftfeuchtigkeit gibt an, wie viel Wasserdampf in der Luft vorhanden ist. Das Vorhandensein von Wasserdampf reduziert die Dichte der Luft, weshalb die Alpha-Reichweite mit zunehmender Luftfeuchtigkeit ebenfalls zunimmt [10].

Zusammenfassend wurde gesehen, dass eine hohe Temperatur, ein geringer Druck und eine hohe Luftfeuchtigkeit zu einer grösseren Alpha-Reichweite führen als unter Standardbedingungen. Umgekehrt führt eine grössere Dichte des Mediums zu einer geringeren Reichweite der Alpha-Strahlung. Somit kann eine Veränderung der Alpha-Reichweite dazu führen, dass die Kalibrierung der Messgeometrie nicht mehr korrekt ist.

2.3 Einfluss auf Detektoren

Nicht nur die Alpha-Reichweite ist abhängig von den Umweltparametern, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck, auch die Messsysteme und Detektoren selber können auf verschiedene Weise von diesen Parametern beeinflusst sein. In diesem Abschnitt wird für die gängigen passiven und aktiven Messsysteme untersucht, ob und wie die Umweltparameter die Messung und Messgenauigkeit beeinflussen.

(a) Bild von zwei Kernspurdetektoren vom Modell Radonova Radtrak^3.
Bild: Radonova [12]



(b) Schematische Darstellung des Aufbaus und der Funktionsweise eines Elektretdetektors.
Bild: Rad Elec Inc. [13]

Abbildung 2.1: Darstellungen von zwei verschiedenen passiven Radondetektoren.

2.3.1 Passive Detektoren

Kernspurdetektoren

Betrachtet man das Beispiel eines Kernspur-Detektors. Ein Detektorfilm befindet sich in einem Volumen, in welches die radonhaltige Luft eindringt. Zerfällt nun ein Radonatom im Volumen, besteht eine Wahrscheinlichkeit, dass die Alpha-Strahlung den Detektorfilm trifft und eine Spur hinterlässt. Dabei ist diese Wahrscheinlichkeit abhängig von der Geometrie des Volumens und des Detektorfilms, der Position des zerfallenen Radonatoms im Volumen und der Reichweite sowie Richtung der Alpha-Strahlung. Diese Wahrscheinlichkeit wird ausgedrückt als Empfindlichkeit, in Einheiten von Spuren auf dem Detektorfilm pro Radonexposition. Beispielsweise wird die Empfindlichkeit bei Radondosimetern vom Typ Radonova Radtrak^3 angegeben mit 2.1 ((Kernspuren/cm^2)/(kBqh/m^3)) [11]. In Abbildung 2.1a ist ein Bild dieses Detektors gezeigt.

Eine Veränderung der Parameter des Mediums, also der Luft, führt zu einer Änderung der Alpha-Reichweite, gegenüber den Parametern, bei den die Kalibrierung erstellt wurde. Das kann dazu führen, dass die angegebene Empfindlichkeit nicht erreicht oder übertroffen wird und führt zu einem systematischen Messfehler. Betrachtet man erneut das Beispiel des Kernspurdetektors Radtrak^3 von Radonova. Die Grösse des Gehäuses ist mit 52 mm × 46 mm × 17 mm angegeben. Die typische Reichweite von Alpha-Strahlung ausgehend von Radon-222 (5.6 MeV) liegt bei Normalbedingungen bei circa 40 mm und damit in der gleichen Grössenordnung wie die Grösse des Gehäuses. Verändern sich nun die Parameter der Luft und damit die Reichweite der Alpha-Strahlung, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, kann die angegebene Empfindlichkeit nicht mehr korrekt sein und die Messergebnisse sind verfälscht.

Solche möglichen Effekte betreffen nicht nur das hier genannte Beispiel, auch viele weitere passiven Kernspurdetektoren bestehen aus einem Gehäuse in dieser Grössenordnung. Ausführliche Analysen und breite Untersuchungen sind zum jetzigen Zeitpunkt noch ausstehend. Jedoch gibt es Ansätze, dass eine Zunahme der Luftfeuchtigkeit tatsächlich eine Auswirkung auf die Empfindlichkeit von Radon-Kernspurdetektoren hat [14].

Elektretdetektoren

Bei Elektretdetektoren ist die Messgeometrie und die Reichweite der Alpha-Strahlung deutlich weniger wichtig als bei Kernspurdetektoren. Die Detektoren bestehen meist auch aus einem Kunststoffgehäuse mit Seitenlängen von einigen Zentimetern, jedoch basiert die Messung nicht auf der Detektion der Alpha-Strahlung, sondern der Ionisierung der Luft.

Im Gehäuse des Detektors befindet sich ein geladenes Teil, zum Beispiel ein Plättchen, das eine elektrische Potenzialdifferenz gegenüber dem Gehäuse erzeugt. Damit wird im Gehäuse ein elektrisches Feld erzeugt. Die ionisierende Strahlung des Radonzerfalls und der Folgeprodukte ionisiert die Luft im Inneren, die Ladungen der Ionisation trennen sich im elektrischen Feld und reduzieren die Potenzialdifferenz zwischen Gehäuse und Plättchen. Anhand der Potenzialdifferenz zu Beginn und am Ende einer Messung, kann die Radonexposition ermittelt werden. Dazu wird eine vorgänige Kalibrierung benötigt. In Abbildung 2.1b ist ein Elektretdetektor schematische dargestellt.

Da bei diesem Messverfahren die Ionisation der Luft massgebend für die Messung ist, könnten die Parameter der Luft einen Einfluss auf die Messgenauigkeit haben. Die Eigenschaften und das Ionisationsverhalten der Luft werden massgeben von der Temperatur, Luftfeuchtigkeit und dem Luftdruck beeinflusst. Dementsprechend ist es möglich, dass eine Messunsicherheit zustande kommt.

Wie bei den Kernspurdetektoren gibt es auch für Elektretdetektoren keine ausführlichen Untersuchungen, wie die Umweltparametern eine Messung beeinflussen. Solche Messungen werden benötigt, um weitere Aussagen machen zu können und die Anforderungen anpassen zu können.

2.3.2 Ionisationskammer-Detektoren

Eine Ionisationskammer besteht aus einem Volumen, das mit einem Medium gefüllt ist. In diesem Volumen wird ein elektrisches Feld, mithilfe einer Anode und Kathode erzeugt. Die ionisierende Strahlung erzeugt freie Ladungsträger im Medium, die sich im elektrischen Feld trennen und an Anode und Kathode gemessen werden. In Abbildung 2.2 ist schematisch der Aufbau und Funktion einer Ionisationskammer gezeigt. Bei allen Ionisationskammern ist die Beschaffenheit und Dichte des Mediums sowie die Spannung des elektrischen Feldes massgeben für die Funktionalität und die Messgenauigkeit. Die Ionisationskonstante gibt an, wie viel Energie nötig ist, um ein Ionenpaar im Medium zu erzeugen [15].

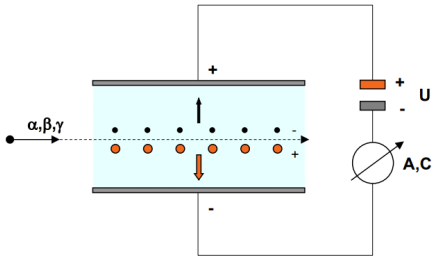


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung einer Ionisationskammer.
Bild: [15]

Zur Messung von Radon ist das Medium in der Messkammer Luft und ein diffusionsoffener Filter trennt das Innere der Messkammer von der zu messenden Luft. Damit haben die Eigenschaften der Luft direkte Auswirkungen auf die Messgenauigkeit und Sensitivität der Messgeräte. Dabei sind die Temperatur und der Luftdruck entscheidende Parameter [16]. Bei der Luftfeuchtigkeit gibt es unterschiedliche Aussagen verschiedener Studien, teilweise wurden die Abhängigkeiten von der Luftfeuchtigkeit als vernachlässigbar und in anderen Fällen als relevant bezeichnet [17, 18]. Jedoch können Unterschiede zwischen verschiedenen Modellen auftreten.

2.3.3 Lucas-Zellen und Szintillationsdetektoren

Anstatt die elektrischen Ladungen nach dem Zerfall oder der Ionisation des Mediums auszunutzen, wird bei Szintillationsdetektoren die Wirkung der Strahlung auf Materie ausgenutzt. Trifft ionisierende Strahlung auf ein Szintillatormaterial, wird sichtbares Licht ausgesendet, proportional zur Strahlungsenergie. Als Szintillatormaterial kann zum Beispiel NaI(Tl), CsI(Tl) oder ZnS(Ag) verwendet werden. Das entstandene Licht wird anschliessend von Photomultipliern aufgefangen und ein elektrisches Signal erzeugt [15].

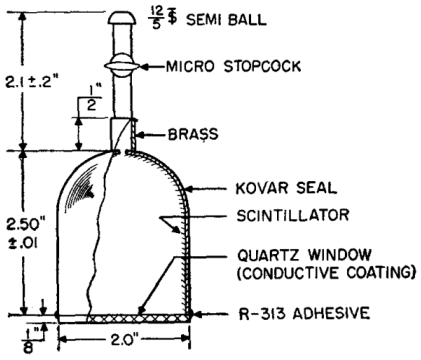


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung einer Lucas-Zelle von Henry Lucas.
Bild: [19]

Zur Messung von Radon gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine häufig angewendete Messgeometrie ist die Verwendung einer Halbkugel, dessen offene Seite an einen Photomultiplier grenzt. Die Innenseite der Halbkugel ist mit Szintillatormaterial beschichtet und die zu Messende Luft tritt über kleine Öffnungen in das innere Volumen ein [19]. In Abbildung 2.3 ist eine Lucas-Zelle nach Henry Lucas gezeigt. Die radonhaltige Luft wird durch das Rohr oben eingefüllt, an die Unterseite, beschriftet mit „Quartz Window“ wird der Photomultiplier angesetzt.

Verändern sich nun die Parameter der Luft, dann ändert sich ebenfalls die Reichweite der Strahlung. Erreicht nun mehr oder weniger Strahlung das Szintillatormaterial auf der Innenseite der Halbkugel, verändert sich damit die Sensitivität des Detektors. Solche Effekte sind stark abhängig von der Geometrie und der Kalibrierung der Messkammer. Studien zu solchen Effekten sind bisher noch ausstehend.

2.3.4 Weitere Detektoren

Neben den oben genannten Messsystemen gibt es noch die Möglichkeit, Radon über passive und aktive Luftsammler nachzuweisen. Ein konstantes Volumen der zu messenden Luft wird aktiv durch einen Luftfilter gepumpt. Dabei lagern sich die festen Folgeprodukte des Radons im Filter ab. Durch anschliessende Gammaspektrometrie kann rechnerisch die Radonaktivitätskonzentration der gemessenen Luft bestimmt werden. Passive Luftsammler werden der zu messenden Luft ausgesetzt, bis ein chemisches Gleichgewicht zwischen Filtermaterial und Raumluft entstanden ist. Anschliessend kann ebenfalls die Radonaktivitätskonzentration über Gammaspektrometrie ermittelt werden.

Bei einem solchen System sind die Eigenschaften des Luftfiltern entscheidend für die Messgenauigkeit. Je nach verwendetem Filter, können sich diese Eigenschaften mit den Parametern des Mediums ändern. Bei Aktivkohle- und Papierfiltern kann die Adsorptionsrate der Folgeprodukte mit der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit schwanken, jedoch gibt es Möglichkeiten solche Effekte bei Aktivkohlefiltern zu kompensieren [20].

2.4 Nachweis von Radon-Folgeprodukten

Die Messung von Radon-Folgeprodukten ist gesetzlich nicht geregelt. Es gibt keine Zulassungen von solchen Messgeräten. Jedoch sollen diese hier diskutiert werden.

2.4.1 Messmethoden

Es gibt verschiedene Methoden um Radon-Folgeprodukte zu messen, unter anderem gibt es elektronische zeitaufgelöste Messgeräte sowie passive Luftsammler.

In Abschnitt 2.3.4 wurden bereits passive Luftsammler beschrieben, mit denen nach der Auswertung ebenfalls die Konzentrationen der Radon-Folgeprodukte bestimmt werden können.

Elektronische zeitaufgelöste Messgeräte bestehen beispielsweise ebenfalls aus einer Luftpumpe, einem Luftfilter und einem Detektorkopf. Die zu messende Luft wird von der Luftpumpe durch den Luftfilter gezogen. Die gebundenen Folgeprodukte adsorbieren auf dem Filter und zerfallen dort. Die entstehende Strahlung wird vom Detektorkopf gemessen. Anhand vorgängiger Kalibrierung kann aus dem Volumenstrom der Luft und der Zählrate des Detektors die Konzentration der Folgeprodukte bestimmt werden.

2.4.2 Einflüsse von Umweltparametern

Bei elektronischen Messgeräten ist davon auszugehen, dass die Einflüsse der Alpha-Reichweite gering sind. Betrachtet man beispielsweise das AlphaPM von Bertin, bei diesem Geräte beträgt der Abstand zwischen Luftfilter und Detektorkopf nur wenige Millimeter und ist somit deutlich kleiner als die Alpha-Reichweite in Luft. Auch eine Abweichung der Umweltparametern von Normalbedingungen wird die Sensitivität der Messgeometrie kaum beeinflussen.

Nicht zu vernachlässigen sind jedoch Effekte auf den Detektorkopf und die elektronische Verarbeitung der Signale. Der Detektorkopf besteht oft aus einem Halbleiterdetektor, wobei insbesondere die Temperatur einen Einfluss auf die Sensitivität haben kann. Bei den elektronischen Komponenten können höhere Temperaturen stärkeres Rauschen verursachen und die Messgenauigkeit beeinflussen.

Empirische Nachweise solcher Effekte sind noch ausstehend aber notwendig um abschliessende Aussagen treffen zu können.

Kapitel 3

Messergebnisse als Praxisbeispiele

3.1 Einleitung

In den vorherigen Abschnitten wurden theoretische Grundlagen behandelt, wie ein Radonmessgerät oder Radondosimeter von den Umweltparametern beeinflusst werden könnte. Insbesondere die Temperatur und Luftfeuchtigkeit standen im Fokus dieser Diskussionen. In nachfolgenden Praxisbeispielen sollten nun konkrete Messungen eine erste Beurteilung dazu liefern, ob und wie in der Schweiz zugelassene Radonmessgeräte von der Temperatur und Luftfeuchtigkeit beeinflusst werden. Dazu wurden 27 Messreihen mit unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt und ausgewertet.

3.2 Methoden

Alle Messreihen wurden in der Radonkammer des METAS durchgeführt. Diese erlaubt es, die Radonkonzentration, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit präzise zu steuern. Bei den Versuchen wurden zwei zugelassenen Radonmessgeräte verwendet und ausgewertet.

3.2.1 Radonkammer

Die Radonkammer besteht aus einem zylinderförmigen Stahlbehälter mit einem Volumen von ca. 130 L. Die Kammer ist isoliert und ein externer Kühl- oder Heizkreislauf kann die Temperatur im Inneren regeln. Die Luftfeuchtigkeit wird durch einen Ultraschallvernebler in der Kammer reguliert.

Druckluft aus der Flasche wird für die Luft- und Radonzufuhr verwendet. Diese Luft kann gelagert werden und weist dadurch eine sehr tiefe Radonkonzentration auf, verglichen mit der Aussenluft, die typischerweise 3 Bq/m^3 bis 15 Bq/m^3 enthält [21]. Die Luft wird, je nach gewünschter Radonkonzentration, durch verschiedene Radon-Emanationsquellen geleitet und weiter in die Radonkammer geführt. Die Radon-Emanationsquellen sind rückverfolgbar auf Primärstandards und alle eingesetzten Mass-Flow-Controller werden regelmässig geeicht, sodass die Radonkonzentration in der Kammer mit einer hohen Genauigkeit berechnet wird. Die berechnete Radonkonzentration in der Kammer wird Referenzkonzentration genannt und für die Bestimmung der Messgenauigkeit der Geräte verwendet. Über einen Luftauslass wird überschüssige Luft abgeführt, sodass in der Kammer nur ein geringer Überdruck gegenüber dem Laborraum entsteht.

Spezifikationen	AlphaGUARD PQ2000 Pro	RadonMAPPER
Detektortyp	Ionisationskammer	Lucas-Zelle
Messbereich [Bq/m^3]	2 ... 2 000 000	10 ... 3 000 000
Sensitivität [cpm/(Bq/m^3)]	0.05	0.035
Betriebsbereich		
Temperatur [°C]	-10 ... +50	-10 ... +50
Luftdruck [mbar]	700 ... 1100	700 ... 1100
relative Luftfeuchtigkeit [%]	0 ... 95	0 ... 95

Tabelle 3.1: Technische Spezifikationen der untersuchten Geräte gemäss Herstellerangaben [23, 24].

Parameter	Werte		
Radonaktivitätskonzentration [Bq/m^3]	0	300	1000
Temperatur [°C]	10	20	30
relative Luftfeuchtigkeit [%]	40	50	60

Tabelle 3.2: Zielwerte der berücksichtigten Parameter, wobei in 27 Messreihen alle Kombinationen der Parameter untersucht wurden.

3.2.2 Messgeräte

In dieser Versuchsreihe wurden ein Saphymo AlphaGUARD PQ2000 Pro und ein Tecnavia RadonMAPPER untersucht. Beide Geräte sind nach der StMmV als Radonmessgeräte in der Schweiz zugelassen [4, 22]. Tabelle 3.1 vergleicht die technischen Spezifikationen beider Messgeräte. Für alle Messreihen wurden beide Geräte auf eine Integrationszeit von einer Stunde gestellt, sodass für jede Stunde ein Messwert ausgegeben wird.

3.2.3 Messreihen

Um die Auswirkungen verschiedener Parameter der Luft auf die Messgeräte und Messgenauigkeit zu untersuchen, wurden 27 Messreihen durchgeführt. In Tabelle 3.2 sind die Zielwerte der Parameter aufgelistet, die untersucht wurden. Dabei bildet jede Kombination der drei Parameter eine Messreihe. Jede Messreihe dauerte sechs Stunden, die Zeit zur Stabilisierung der Parameter zwischen den Messreihen wurde nicht für die Auswertung berücksichtigt.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Ziel- und Messwerte der Parameter

Die Zielwerte der Radonkonzentrationen lagen bei 0 Bq/m^3, 300 Bq/m^3 und 1000 Bq/m^3. Bei der Zielkonzentration von 0 Bq/m^3 wird die reine Druckluft aus der Flasche in die Kammer geführt. Aufgrund der langen Lagerung, ist in dieser Luft kein Radon mehr enthalten und die berechnete Referenzkonzentration des Systems ist ebenfalls 0 Bq/m^3.

Bei der Zielkonzentration von 300 Bq/m^3 sind leichte Schwankungen zu sehen. Eine Messreihe zeigte eine mittlere Referenzkonzentration von 340±22 Bq/m^3 während eine andere 294±6 Bq/m^3

aufwies. Die Mittelwerte der weiteren Messreihen lagen dazwischen und deren Standardabweichungen lagen über die sechs Stunden bei 6 Bq/m^3 oder 7 Bq/m^3, was 2 % entspricht.

Eine Messreihe mit dem Zielwert von 1000 Bq/m^3 zeigte eine Referenzkonzentration von 1050 ± 22 Bq/m^3 und eine andere 969 ± 21 Bq/m^3, die weiteren Messreihen lagen dazwischen. Die Standardabweichung betrug bei einer Messreihe 31 Bq/m^3, was 3 % entspricht. Bei den anderen Messreihen betrug die Standardabweichung 21 Bq/m^3 oder 22 Bq/m^3, was 2 % entspricht.

Bei der Temperatur lagen die Abweichungen der Mittelwerte vom Zielwert bei allen Messreihen bei höchstens 0.01 °C, die Standardabweichungen der einzelnen Messreihen betrugen maximal 0.03 °C.

Die grösste Abweichung bei der relativen Luftfeuchtigkeit erzielte eine Messreihe mit 41.4 ± 1.0 %, wobei 40 % der Zielwert war. Alle weiteren Abweichungen waren geringer. Die grösste Standardabweichung während einer Messreihe wurde bei 49.7 ± 1.4 % erzielt, wobei 50 % der Zielwert war.

Somit wurde gezeigt, dass die Zielwerte der Parameter erreicht werden konnten. In Anhang A werden alle detaillierten Werte aufgeführt.

3.3.2 Messergebnisse RadonMAPPER

Bei den Untergrundmessungen bei einer Zielkonzentration von 0 Bq/m^3 zeigte der RadonMAPPER Messwerte zwischen 13 ± 3 Bq/m^3 und 22 ± 6 Bq/m^3, wobei die Standardabweichungen bei allen Messereihen zwischen 3 Bq/m^3 und 6 Bq/m^3 lagen. Es zeigt sich keine Abhängigkeit des Untergrundes von den Parametern der Luft. Ausserdem zeigt sich keine systematische Abhängigkeit der Standardabweichung von den Parametern der Luft bei dieser Radonkonzentration.

Die Messungen bei 300 Bq/m^3 zeigen Abhängigkeiten der Messwerte und Messgenauigkeit von den Parametern der Luft. In Abbildung 3.1 sind die relativen Abweichungen vom Referenzwert in der Messkammer sowie die relativen Standardabweichungen jeder Messreihe gezeigt. Dabei entspricht die relative Abweichung dem gemessenen Mittelwert dividiert durch die berechnete Referenzkonzentration einer Messreihe. Es ist zu sehen, dass alle Messwerte, bis auf einen, unter den Referenzkonzentrationen der Radonkammer liegen, die relative Abweichung ist kleiner als 1. Zudem ist eine leichte Tendenz zu erkennen, dass die Messwerte bei der tieferen Temperatur von 10 °C tiefer sind, als bei der mittleren und hohen Temperatur von 20 °C respektive 30 °C. Die grösste Abweichung von der Referenzkonzentration wurde bei einer Temperatur von 10 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 40 % erreicht und betrug 10 %.

Weiter ist in der Darstellung der relativen Standardabweichung dieses Muster erneut zu sehen. Bei einer Temperatur von 10 °C liegen die relativen Standardabweichungen bei ca. 5 % bei jeder Messreihe über sechs Stunden. Bei den Messreihen bei einer Temperatur von 30 °C betragen die relativen Standardabweichungen bis zu 14 %.

Bei den Messreihen bei 1000 Bq/m^3 zeigt sich eine ähnliche leichte Abhängigkeit der relativen Abweichung von der Temperatur. So liegt die Abweichung der Messwerte von der Referenzkonzentration bei 10 °C bei 8 %, bei 20 °C bei 6 % und bei 30 °C bei 4 %. Dabei gibt es einen Ausreisser bei 10 °C und 60 % relative Luftfeuchtigkeit, bei dieser Messreihe wurde eine Abweichung von 5 % gemessen.

Die relativen Standardabweichungen zeigen bei 1000 Bq/m^3 tiefe Werte zwischen 2 % und 6 %. Es kann keine Abhängigkeit von den Parametern der Luft festgestellt werden. Die Detaillierten Messergebnisse des RadonMAPPER sind in Tabelle B.1 aufgeführt.

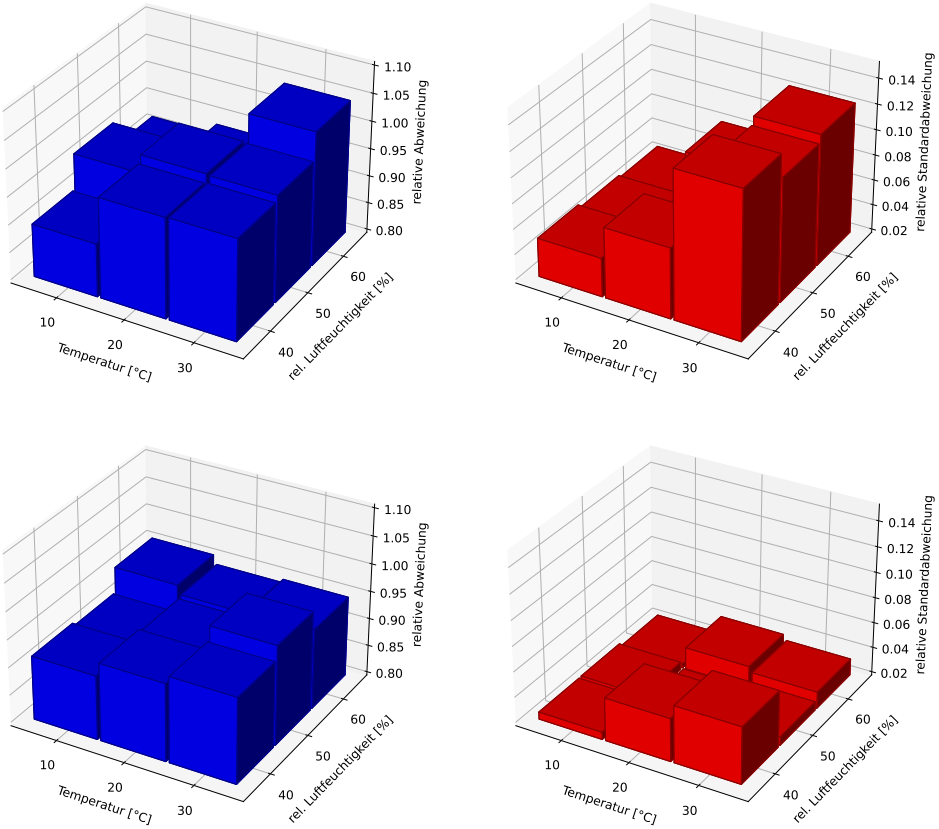


Abbildung 3.1: Ergebnisse des RadonMAPPERs. In den oberen Grafiken sind die Messreihen bei 300 $\mathrm{Bq/m^3}$ gezeigt, unten diejenigen bei 1000 $\mathrm{Bq/m^3}$. Auf der linken Seite sind jeweils die relativen Abweichungen des Messwertes vom Referenzwert gezeigt. Auf der rechten Seite sind die relativen Standardabweichungen jeder Messreihe gezeigt.

3.3.3 Messergebnisse AlphaGUARD PQ2000 Pro

Bei den Untergrundmessungen bei einer Zielkonzentration von 0 Bq/m^3 sind die Messdaten der drei Messreihen bei 10 °C aufgrund eines technischen Problems verloren gegangen. Die Messreihen bei 20 °C zeigen Messwerte von 5 ± 18 Bq/m^3, 4 ± 18 Bq/m^3 und 5 ± 19 Bq/m^3. Bei 30 °C waren die Messwerte sowie die Standardabweichungen geringer und betrugen 3 ± 15 Bq/m^3, 1 ± 14 Bq/m^3 und 3 ± 13 Bq/m^3.

Bei den Messreihen mit einer Zielkonzentration von 300 Bq/m^3 zeigt sich beim AlphaGUARD ein umgekehrtes Muster im Vergleich zum RadonMAPPER. So sind die Messwerte bei der tiefen Temperatur von 10 °C deutlich grösser als die Referenzkonzentration, mit einer Ausnahme. Bei der hohen Temperatur von 30 °C, sind die Messwerte geringer als die Referenzkonzentration. Bei der mittleren Temperatur liegen die Messwerte nahe bei der Referenzkonzentration.

Dahingegen sind bei den relativen Standardabweichungen kaum Schwankungen zu sehen. Über alle neun Messreihen bei 300 Bq/m^3 liegt die mittlere Standardabweichung um 18 %, ohne eine Abhängigkeit von den Parametern der Luft zu zeigen. Die Ergebnisse des AlphaGUARDs sind in 3.2 dargestellt.

Die Messreihen bei einer Zielkonzentration von 1000 Bq/m^3 bestätigen dieses Muster. Liegen die Messwerte bei 10 °C noch 3 % bis 5 % über der Referenzkonzentration, beträgt die Abweichung bei 20 °C weniger als ein Prozent. Bei 30 °C liegen die Messwerte 3 % bis 6 % unter den Referenzkonzentrationen.

Ebenfalls zeigen die Standardabweichungen keine Abhängigkeit von den Parametern der Luft und liegen mit zufälligen Schwankungen zwischen 8 % und 12 %.

Die Detaillierten Messergebnisse des AlphaGUARD sind ebenfalls in Tabelle B.1 aufgeführt.

3.4 Diskussion und Interpretation

3.4.1 Untergrund

Bei einer Referenzkonzentration von 0 Bq/m^3 sollten die Messgeräte ebenfalls diesen Wert messen. Die effektive gemessene Radonkonzentration der Geräte wird als Hintergrund- oder Untergrundsignal bezeichnet. Diese entsteht hauptsächlich durch Ablagerung der Radon-Folgeprodukte in den Messkammern der Messgeräte. Vor allem ^{210}Pb und ^{210}Po, mit Halbwertszeiten von 22 a respektive 138 d, bleiben nach einer Radonexposition lange in den Messkammern und erzeugen so ein Signal [25].

Es wurde gesehen, dass das AlphaGUARD einen tieferen Untergrund aufweist als der RadonMAPPER. Der Unterschied zwischen den Messgeräten ist die automatische Kompensation der Folgeprodukte in der Messkammer des AlphaGUARDs. Im eingeschalteten Zustand zeichnet das AlphaGUARD die gesamte Exposition auf und kann so die Menge der Folgeprodukte in der Messkammer abschätzen. Mit dieser Abschätzung wird anschliessend das Untergrundsignal kompensiert [26]. Die Exposition im ausgeschalteten Zustand kann nicht aufgezeichnet werden, weshalb bei einer Untergrundmessung trotzdem ein Untergrundsignal gemessen wird. Die Standardabweichungen des AlphaGUARDs bei den Untergrundmessungen ist deutlich grösser als diejenige des RadonMAPPERs.

Im Gegensatz dazu, kann beim RadonMAPPER das Untergrundsignal nur manuell kompensiert werden und die hier gefundenen Messwerte sind deutliche höher als beim AlphaGUARD.

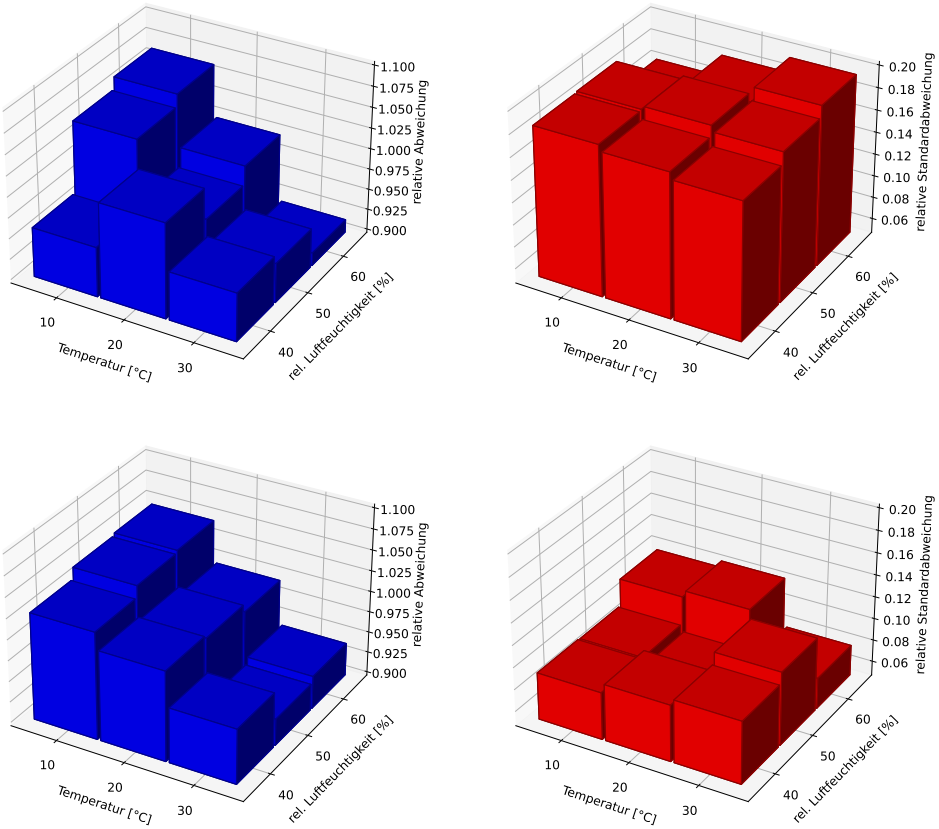


Abbildung 3.2: Ergebnisse des AlphaGUARDs. In den oberen Grafiken sind die Messreihen bei 300 Bq/m^3 gezeigt, unten diejenigen bei 1000 Bq/m^3. Auf der linken Seite sind jeweils die relativen Abweichungen des Messwertes vom Referenzwert gezeigt. Auf der rechten Seite sind die relativen Standardabweichungen jeder Messreihe gezeigt.

3.4.2 Temperaturabhängigkeit

Bei beiden Messgeräten konnte eine Abhängigkeit der Messwerte von der Temperatur festgestellt werden. Beim AlphaGUARD werden die Messwerte mit steigender Temperatur tiefer verglichen mit der Referenz, die Standardabweichung über eine Messreihe bleibt aber stabil. Beim RadonMAPPER wurde umgekehrt festgestellt, dass die Messwerte und die Standardabweichungen mit steigender Temperatur ebenfalls steigen.

Um die Abhängigkeiten von der Temperatur einfacher darzustellen, werden die Messreihen bei gleicher Temperatur mit verschiedenen Luftfeuchtigkeiten in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Gerät	Radonkonzentration	10 °C	20 °C	30 °C
RadonMAPPER				
	300 Bq/m^3	92 ± 5 %	97 ± 7 %	101 ± 13 %
	1000 Bq/m^3	93 ± 3 %	94 ± 4 %	96 ± 4 %
AlphaGUARD				
	300 Bq/m^3	102 ± 18 %	100 ± 18 %	94 ± 18 %
	1000 Bq/m^3	104 ± 10 %	100 ± 10 %	95 ± 10 %

Tabelle 3.3: Übersicht über die Abhängigkeit der Messgenauigkeit der Messgeräte von der Temperatur. Für beide Geräte und beide Radonkonzentrationen ist für jede Temperatur das Verhältnis zwischen Mittelwert und Referenzkonzentration sowie die Standardabweichung in Prozent angegeben. Dabei werden die Messreihen bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten zusammengefasst.

3.4.3 Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit

Es konnte bei keinem Messgeräte und keiner Radonkonzentration eine Abhängigkeit der Messwerte oder Messgenauigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit festgestellt werden. Weder in den grafischen Darstellungen in Abbildungen 3.1 und 3.2 noch in den Messdaten in Anhang B.1 kann eine systematische Abhängigkeit der Messwerte oder Standardabweichung von der relativen Luftfeuchtigkeit festgestellt werden.

Kapitel 4

Diskussion

In den vorherigen Kapiteln wurde gezeigt, dass Abhängigkeiten der Messwerte und Messgenauigkeit von den Parametern der Luft, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck theoretisch nachvollziehbar und in praktischen Messreihen belegt werden können. In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse diskutiert und quantifiziert werden.

4.1 Radonmessgeräte

In Kapitel 3 wurde eine Versuchsreihe präsentiert, die zeigt, dass bei zwei in der Schweiz zugelassenen Radonmessgeräten Abhängigkeiten der Messwerte und Messgenauigkeit von der Temperatur bestehen. Ein Einfluss der Luftfeuchtigkeit konnte nicht festgestellt werden.

4.1.1 Messergebnisse

Betrachete man die Messdaten des AlphaGUARD aus obigem Experiment in Tabelle 3.3. Dabei wurden Temperaturen zwischen 10 °C und 30 °C untersucht. Führt man eine lineare Regression mit einer Least-Squares-Methode durch, erhält man bei einer Radonkonzentration von 1000 Bq/m^3 für die relative Abweichung $\bar{x}$ in Prozent

$$\bar{x}_{1000}(\theta) = -0.45\,\%/(^\circ\mathrm{C})\,\theta + 108.67\,\%, \tag{4.1}$$

wobei θ die Temperatur in °C ist. Für den Betrieb des Geräts ist ein Temperaturbereich zwischen −10 °C und 50 °C angegeben. Wird nun die lineare Regression auf diesen Bereich extrapoliert, erhält man für die minimale Temperatur von −10 °C eine relativen Abweichung von 113 %, bei der maximalen Temperatur von 50 °C sind es 86 %. Wobei wieder 100 % genau der Referenzkonzentration entsprechen.

Führt man nun die selben Berechnungen für die Messdaten bei 300 Bq/m^3 durch, erhält man

$$\bar{x}_{300}(\theta) = -0.40\,\%/(^\circ\mathrm{C})\,\theta + 106.67\,\%, \tag{4.2}$$

wobei wieder θ die Temperatur in °C und $\bar{x}$ die relative Abweichung in % sind. Damit ergibt eine Temperatur von −10 °C eine relative Abweichung von 111 %, 50 °C führt zu 87 %.

Damit ist zu sehen, dass unter Extrapolation der vorhandenen Messdaten die maximal zulässige Abweichung von 20 % bei Eichungen eingehalten wird. Jedoch wurden die Messungen nur bei zwei Radonkonzentrationen und drei Temperaturen durchgeführt. Insbesondere müssen die Anforderungen an Radonmessgeräte bis 10 000 Bq/m^3 eingehalten werden. Dementsprechend sind

Radonkonzentration [Bq/m^3]	$-10\,°C$	$50\,°C$
300	83 %	110 %
1000	90 %	99 %

Tabelle 4.1: Aus den Messdaten extrapolierte relative Abweichung des RadonMAPPERs bei der minimalen und maximalen Betriebstemperatur.

weitere Messungen bei höheren Radonkonzentrationen und weiteren Temperaturen notwendig und eine genauere Aussage machen zu können.

Für die Messdaten des RadonMAPPER kann man die selben Berechnungen durchführen und erhält folgende lineare Regression.

$$\bar{x}_{300}(\theta) = 0.45\,\%/(^\circ\mathrm{C})\,\theta + 87.67\,\% \tag{4.3}$$

$$\bar{x}_{1000}(\theta) = 0.15\,\%/(^\circ\mathrm{C})\,\theta + 91.33\,\% \tag{4.4}$$

Dabei ergeben die minimale und maximale Betriebstemperatur des RadonMAPPERs die Werte wie in Tabelle 4.1 gezeigt. Es zeigt sich auch hier, dass die Abweichungen innerhalb der 20 % liegen, die bei Eichungen zulässig sind. Weiter ist zu sehen, dass die Abweichungen und die Abhängigkeit von der Temperatur bei einer Radonkonzentration von 1000 Bq/m^3 deutlich kleiner sind, als bei 300 Bq/m^3. Auch hier sind weiter Messdaten erforderlich um diese Sachverhalte zu prüfen.

4.1.2 Ionisationskammer und AlphaGUARD

In Abschnitt 2.3.2 ist beschrieben, dass die Temperatur und Luftfeuchtigkeit Ionisationskammer-Detektoren direkt beeinflussen können. Anhand von Simulationen bestätigt [16] eine Abhängigkeit der Zählraten von der Temperatur. In Abbildung 4.1 ist ein Auszug aus den Ergebnissen der Autoren gezeigt. Dabei zeigt die Grafik für zylindrische Ionisationskammern, dass zwischen $-20\,°C$ und $20\,°C$ die Zählrate steigt, zwischen $20\,°C$ und $30\,°C$ sinkt die Zählrate wieder, ab $30\,°C$ bleibt sie konstant. Diese Ergebnisse passen nicht zu den Messergebnissen, die in Abschnitt 3 präsentiert wurden, hier wurde gesehen, dass die Messwerte für den AlphaGUARD mit zunehmender Temperatur sinken. Daher ist davon auszugehen, dass im AlphaGUARD eine Kompensation der Zählrate anhand der Temperatur stattfindet, wobei in diesem Fall eine Überkompensation vorliegt.

[27] vergleicht vier Messgeräte vom Typ AlphaGUARD bei $13\,°C$, $20\,°C$ und $30\,°C$ und relativen Luftfeuchtigkeiten von 30 %, 45 % und 80 %, die Radonkonzentrationen lagen bei 450 Bq/m^3, 2000 Bq/m^3 und 9000 Bq/m^3. Dabei wurden jedoch nicht alle Kombinationen dieser Parameter gemessen und untersucht. Es wurde gezeigt, dass bei den Messgeräten eine Abhängigkeit von der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit besteht. Jedoch stimmen die Ergebnisse nur bedingt mit den Messergebnissen überein, die in Abschnitt 3 gefunden wurden. Messgeräte vom Typ RadonMAPPER wurden in [27] nicht untersucht.

Aus dem Vergleich der Messdaten mit diesen beiden Studien, stellt sich die Frage, ob alle Messgeräte vom Typ AlphaGUARD gleich von den Parametern der Luft abhängen oder ob es Unterschiede zwischen den Geräten gibt. Weiter muss untersucht werden, ob die gesamte akkumulierte Exposition eines Gerätes ebenfalls einen Einfluss haben kann. Ausserdem ist davon auszugehen, dass die Messung der Temperatur durch das Messgerät dazu genutzt wird um eine Kompensati-

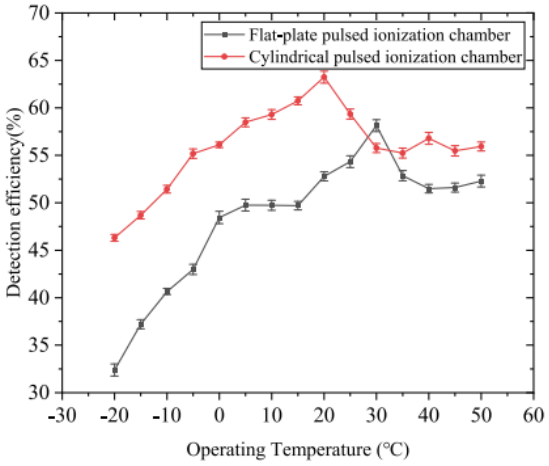


Abbildung 4.1: Bild und Daten aus [16]. Dabei zeigt die Grafik die Sensitivität für eine zylindrische und eine flache Ionisationskammer bei unterschiedlichen Temperaturen.

on durchzuführen. Dazu könnten Herstellerangaben nachgefragt werden. Möglicherweise könnte ebenfalls die automatische Kompensation der Temperatur kalibriert werden.

4.1.3 Lucas-Zelle und RadonMAPPER

In Abschnitt 2.3.3 wurde beschrieben, wie Detektoren mit Lucas-Zellen von den Parametern der Luft beeinfluss werden können. Dabei wurde argumentiert, dass eine grössere Alpha-Reichweite die Sensitivität des Detektors erhöht. Diese grössere Alpha-Reichweite wird beispielsweise über eine höhere Temperatur erzielt. Betrachtet man erneut die Messergebnisse des RadonMAPPERs aus vorherigem Kapitel, wurde dieser Sachverhalt bestätigt.

Die Messreihen bei 300 $\mathrm{Bq/m^3}$ und 1000 $\mathrm{Bq/m^3}$ zeigen beide, dass die Messwerte höher sind, bei einer höheren Temperatur. Die Messreihen bei 0 $\mathrm{Bq/m^3}$ zeigen keine Abhängigkeit von der Temperatur, da die gemessenen Werte durch die Kontamination der Messkammer zustande kommen. Die Folgeprodukte des Radonzerfalls bleiben in der Messkammer und befinden sich auf dem Szintillatormaterial, weshalb die Alpha-Reichweite irrelevant für deren Detektion ist.

4.1.4 Weitere Untersuchungen

Es wurde gezeigt, dass eine gewisse Abhängigkeit der Messwerte von den Parametern der Luft vorhanden ist. Es konnten bei RadonMAPPER und AlphaGUARD unterschiedliche Phänomene festgestellt werden. Dabei sind die Messdaten des gezeigten Experimentes nicht genug ausführlich um eine quantitative Aussage treffen zu können. Weitere Messreihen müssen durchgeführt werden, dabei sollte der gesamte Betriebsbereich der Temperatur der Messgeräte abgedeckt werden. Ausserdem muss genauer untersucht werden, ob die relative Luftfeuchtigkeit einen Einfluss auf die Messdaten hat, dazu muss ebenfalls ein breites Spektrum abgedeckt werden.

Des Weiteren können zusätzliche Geräte untersucht werden. Dabei könnten nicht nur Messreihen sondern auch technische Angaben der Hersteller berücksichtigt werden.

4.2 Radondosimeter

Zu Radondosimetern gibt es aktuell nur wenige Studien, welche die Parameter während der Messung zwar angeben, aber nicht weiter auf diese eingehen. Zum Beispiel finde [28], anhand einer Messreihe, dass eine Luftfeuchtigkeit von 90 % keine Einfluss auf passive Radondosimeter hat. Ausführliche Untersuchungen, die den Einfluss der Umweltparameter auf passive Radondosimeter untersuchen, wurden bisher nicht publiziert. Die in Abschnitten 2.2 und 2.3.1 beschriebenen Zusammenhänge legen nahe, das die Temperatur, Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck einen Einfluss auf die Messgenauigkeit von Radondosimetern haben kann.

Mögliche Versuchsreihen sollten die Sensitivität von Radondosimetern bei verschiedenen Temperaturen, Luftfeuchtigkeiten und Luftdrücken untersuchen. Dabei sollten die Werte dieser Parametern die realen Bedingungen bei Radonmessungen abdecken, wie sie in Wohnräumen und radonexponierten Arbeitsplätzen herrschen. Ausserdem sollten verschiedene Radonexpositionen untersucht werden, wie sie ebenfalls häufig anzutreffen sind. Ausserdem können die Hersteller der Radondosimetern angefragt werden, ob entsprechende Daten oder Messreihen vorliegen.

Kapitel 5

Schlussfolgerung

In diesem Bericht wurde untersucht, ob die Parameter der Luft einen Einfluss auf Radonmessungen und Radonmessgeräte sowie -dosimeter haben können. Dabei wurden die Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck berücksichtigt. In einer theoretischen Beschreibung von physikalischen Zusammenhängen und Effekten wurde qualitativ dargelegt, dass solche Einflüsse durchaus naheliegend sind. Eine quantitative Abschätzung der Auswirkungen von veränderten Messparametern wurde teilweise in verschiedenen Studien untersucht und publiziert.

Anschliessend wurden praktische Messdaten aus einer Versuchsreihe präsentiert. Dabei wurden RadonMAPPER und AlphaGUARD verschiedenen Radonkonzentrationen, Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten ausgesetzt und deren Messgenauigkeit ermittelt. Es wurde gezeigt, dass der RadonMAPPER bei höheren Temperaturen auch grössere Messwerte ausgibt als bei tieferen. Der AlphaGUARD zeigte ein umgekehrtes Verhalten, wobei bei 10 °C die grössten und bei 30 °C die kleinsten Messwerte gefunden wurden. Eine Abhängigkeit der Messwerte von der relativen Luftfeuchtigkeit wurde nicht festgestellt. Ebenfalls wurde gezeigt, dass mögliche Schwankungen über die zulässige Betriebstemperatur bei keinem Gerät zu einer Verletzung der zulässigen Eichfehlergrenzen führt.

Zu passiven Radondosimetern gibt es aktuell keine ausführliche Untersuchung. Hierzu sind weitere Studien nötig, um die Effekte der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit und des Luftdruck beurteilen zu können.

Damit steht fest, dass zum jetzigen Zeitpunkt eine Anpassung der Anforderungen an Messgeräte nicht notwendig ist. Die Messdaten und Studien zeigen eine erste Tendenz, jedoch fehlen breite Grundlagen um signifikante Aussagen treffen zu können, ob Vorgaben zu den Umweltparametern gemacht werden müssen.

Weitere Studien werden benötigt um vertiefte Erkenntnisse zu gewinnen. Dabei sollten einerseits aktive Radonmessgeräte sowie passive Radondosimeter untersucht werden. Die Messgeräte müssen bei verschiedenen Radonkonzentrationen, Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten getestet werden. Dabei sollten die Parameter den typischerweise anzutreffenden Parametern bei Radonmessungen entsprechen. Zusätzlich wäre eine Versuchsreihe bei unterschiedlichen Druckverhältnissen wünschenswert.

Anhang A

Index	Radonkonzentration [Bq/m^3]			Temperatur [°C]			rel. Luftfeuchtigkeit [%]		
	x	$\bar{x}$	σ	x	$\bar{x}$	σ	x	$\bar{x}$	σ
1	0	0	0	10.00	10.00	0.01	40.0	39.9	0.3
2	0	0	0	10.00	10.00	0.01	50.0	50.0	0.3
3	0	0	0	10.00	10.00	0.01	60.0	59.9	0.3
4	0	0	0	20.00	20.00	0.02	40.0	40.0	0.4
5	0	0	0	20.00	20.00	0.02	50.0	50.3	0.4
6	0	0	0	20.00	20.00	0.02	60.0	60.0	0.3
7	0	0	0	30.00	30.00	0.02	40.0	40.0	0.2
8	0	0	0	30.00	30.00	0.01	50.0	50.0	0.2
9	0	0	0	30.00	30.00	0.01	60.0	60.0	0.2
10	300	340	22	10.00	10.00	0.01	40.0	39.8	0.4
11	300	320	7	10.00	10.00	0.01	50.0	49.9	0.4
12	300	314	7	10.00	9.99	0.01	60.0	60.0	0.2
13	300	304	6	20.00	20.00	0.02	40.0	40.3	0.4
14	300	304	6	20.00	20.00	0.03	50.0	50.5	0.5
15	300	307	7	20.00	19.99	0.02	60.0	60.1	0.3
16	300	294	6	30.00	30.00	0.01	40.0	39.9	1.0
17	300	295	6	30.00	30.01	0.03	50.0	49.7	1.4
18	300	295	6	30.00	30.01	0.02	60.0	60.0	0.3
19	1000	1039	22	10.00	10.00	0.01	40.0	41.4	1.0
20	1000	1050	22	10.00	10.00	0.01	50.0	50.4	0.5
21	1000	1025	31	10.00	10.00	0.01	60.0	60.1	0.4
22	1000	1013	21	20.00	20.00	0.01	40.0	40.4	0.6
23	1000	1014	22	20.00	20.00	0.01	50.0	50.0	0.2
24	1000	1013	21	20.00	20.00	0.02	60.0	60.0	0.2
25	1000	973	21	30.00	30.00	0.01	40.0	40.0	0.3
26	1000	970	21	30.00	30.00	0.01	50.0	49.9	0.3
27	1000	969	21	30.00	30.00	0.01	60.0	60.0	0.2

Tabelle A.1: Ziel- und Messwerte sowie Standardabweichung der Parameter für jede Messreihe. Dabei ist für jeden Parameter x der Zielwert, $\bar{x}$ der Mittelwert und σ die Standardabweichung über die Messreihe. Bei der Radonkonzentration entspricht $\bar{x}$ der berechneten Referenzkonzentration, die in der Kammer herrschte.

Anhang B

Index	AlphaGUARD				RadonMAPPER			
	[Bq/m^3]		[1]		[Bq/m^3]		[1]	
	$\bar{x}$	σ	Δ	σ_{rel}	$\bar{x}$	σ	Δ	σ_{rel}
1					22	6		0.28
2					17	4		0.23
3					20	4		0.20
4	5	18		3.43	14	3		0.25
5	4	18		4.14	17	4		0.25
6	5	19		3.94	16	5		0.29
7	3	15		5.65	13	3		0.24
8	1	14		12.42	17	5		0.28
9	3	13		4.21	14	4		0.28
10	326	60	0.96	0.19	304	15	0.90	0.05
11	335	62	1.05	0.19	308	15	0.96	0.05
12	333	54	1.06	0.16	287	13	0.91	0.04
13	308	55	1.01	0.18	298	22	0.98	0.08
14	297	56	0.98	0.19	302	12	0.99	0.04
15	306	55	1.00	0.18	287	23	0.93	0.08
16	282	49	0.96	0.17	289	39	0.98	0.14
17	279	51	0.95	0.18	292	34	0.99	0.12
18	270	52	0.92	0.19	308	38	1.04	0.12
								...

Index	AlphaGUARD				RadonMAPPER			
	[Bq/m^3]		[1]		[Bq/m^3]		[1]	
	$\bar{x}$	σ	Δ	σ_{rel}	$\bar{x}$	σ	Δ	σ_{rel}
...								
19	1068	99	1.03	0.09	951	24	0.92	0.03
20	1095	100	1.04	0.09	954	25	0.91	0.03
21	1072	125	1.05	0.12	979	23	0.95	0.02
22	1021	103	1.01	0.10	952	51	0.94	0.05
23	1018	88	1.00	0.09	947	20	0.93	0.02
24	1006	123	0.99	0.12	950	35	0.94	0.04
25	940	100	0.97	0.11	929	60	0.95	0.06
26	904	105	0.93	0.12	950	25	0.98	0.03
27	910	71	0.94	0.08	916	30	0.94	0.03

Tabelle B.1: Die Messwerte der beiden Messgeräte die in den Messreihen getestet wurden. Für jede Messreihe ist der Index aus A.1 angegeben und für beide Messgeräte ist $\bar{x}$ der Mittelwert der Messreihe, σ die Standardabweichung, Δ die relative Abweichung von der Referenzkonzentration und σ_{rel} die relative Standardabweichung. Bei den Messreihen 1 bis 3 sind die Messdaten des AlphaGUARD verloren gegangen. Bei einer Referenzkonzentration von 0 Bq/m^3 kann keine relative Abweichung berechnet werden.

Literatur

[1] *Strahlenschutzverordnung vom 26. April 2017 (StSV; SR 814.501).*

[2] *Verordnung des EDI vom 26. April 2017 über die Aus- und Fortbildungen und die erlaubten Tätigkeiten im Strahlenschutz (Strahlenschutz-Ausbildungsverordnung; SR 814.501.261).*

[3] *Messmittelverordnung vom 15. Februar 2006 (MessMV; SR 941.210).*

[4] *Verordnung des EJPD über Messmittel für ionisierende Strahlung vom 7. Dezember 2012 (StMmV; SR 941.210.5).*

[5] Joan F. Rey et al. "Performance evaluation of radon active sensors and passive dosimeters at low and high radon concentrations". In: *Building and environment* 250 (2024). ISSN: 0360-1323.

[6] Raphael Grapentin. *Methodenentwicklung und Optimierung der METAS-Radonkammer zur Herstellung von feldtypischen Messparametern.* Techn. Ber. Muttenz. Muttenz: Institut Nachhaltigkeit und Energie am Bau, Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik FHNW, 2024. DOI: `https://doi.org/10.26041/fhnw-9972`. URL: `https://irf.fhnw.ch/handle/11654/46948`.

[7] *U.S. standard atmosphere, 1976.* Washington D.C: National Oceanic, Atmospheric Administration National Aeronautics und Space Administration United States Air Force, 1976.

[8] James F. Ziegler, M.D. Ziegler und J.P. Biersack. "SRIM – The stopping and range of ions in matter (2010)". In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 268.11 (2010). 19th International Conference on Ion Beam Analysis. ISSN: 0168-583X. DOI: `https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091`. URL: `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X10001862`.

[9] Jakob. Lauth und Jürgen. Kowalczyk. *Thermodynamik : Eine Einführung.* 2nd ed. 2022. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022. ISBN: 3-662-64707-9. DOI: `https://doi.org/10.1007/978-3-662-64707-3`.

[10] A Picard et al. "Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)". In: *Metrologia* 45.2 (2008). DOI: `10.1088/0026-1394/45/2/004`. URL: `https://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/45/2/004`.

[11] Radonova Laboratories AB. *Product Sheet Radtrak^3*. 2022.

[12] Radonova Laboratories AB. `https://radonova.de`. Zugriff: September 2023. 2023.

[13] Rad Elec Inc. `https://www.radelec.com`. Zugriff: September 2023. 2023.

[14] Zhongkai Fan et al. "Developing a radon monitor for simultaneous measurement of Rn-222 and Rn-220 with less influence of humidity based on electrostatic collection and CR-39 detector". In: *Nuclear instruments and methods in physics research. Section A, Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment* 1052 (2023). ISSN: 0168-9002.

[15] Hanno Krieger. *Strahlungsmessung und Dosimetrie*. 3, erweiterte und aktualisierte Auflage 2021st Edition. Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. ISBN: 365833388X.

[16] Rui Gou et al. "Simulation of radon detection efficiency with small pulse ionization chamber based on Geant4". In: *Applied radiation and isotopes* 205 (2024). ISSN: 0969-8043.

[17] Malcolm R. McEwen und Jaswinder Taank. "Examining the influence of humidity on reference ionization chamber performance". In: *Medical Physics* 44.2 (2017). DOI: https://doi.org/10.1002/mp.12057. eprint: https://aapm.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/mp.12057. URL: https://aapm.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mp.12057.

[18] Aurélie Poirier und Guilhem Douysset. "Influence of ambient humidity on the current delivered by air-vented ionization chambers revisited". In: *Physics in medicine and biology* 51.19 (2006). ISSN: 0031-9155.

[19] Henry F. Lucas. "Improved Low-Level Alpha-Scintillation Counter for Radon". In: *Review of Scientific Instruments* 28.9 (Sep. 1957). ISSN: 0034-6748. DOI: 10.1063/1.1715975. eprint: https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-pdf/28/9/680/19305286/680_1_online.pdf. URL: https://doi.org/10.1063/1.1715975.

[20] Milos Zivanovic et al. "Radon measurements with charcoal canisters temperature and humidity considerations". In: *Nuclear Technology and Radiation Protection* 31.1 (2016). ISSN: 1451-3994.

[21] T F Gesell. "Background atmospheric 222Rn concentrations outdoors and indoors: a review". In: *Health physics (1958)* 45.2 (1983). ISSN: 0017-9078.

[22] Bundesamt für Gesundheit BAG. *Anforderungen für die Anerkennung als Radonmessstelle*. https://www.bag.admin.ch/bag/de/home/gesund-leben/umwelt-und-gesundheit/strahlung-radioaktivitaet-schall/radon.html. 2023.

[23] Saphymo GmbH. *AlphaGUARD Mobiler Radon-Monitor, Technische Beschreibung*. 2012.

[24] TECNAVIA SA. *RADONMAPPER*. 2017.

[25] Hermann Sicius. *Handbuch der Chemischen Elemente*. 2nd Auflage 2023rd Edition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2023. ISBN: 3662656639.

[26] Bertin Instruments. *AlphaGUARD P series, Contamination with Pb-210*. 2020.

[27] A. Vargas und X. Ortega. "Influence of environmental changes on continuous radon monitors. results of a Spanish intercomparison exercise". In: *Radiation Protection Dosimetry* 121.3 (Mai 2006). ISSN: 0144-8420. DOI: 10.1093/rpd/ncl036. eprint: https://academic.oup.com/rpd/article-pdf/121/3/303/4547931/ncl036.pdf. URL: https://doi.org/10.1093/rpd/ncl036.

[28] Dariush Azimi-Garakani. "An intercomparison of different passive radon detectors". In: *Nuclear tracks and radiation measurements (Oxford, England : 1993)* 22.1-4 (1993). ISSN: 0969-8078.