



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**

Methodenentwicklung und Optimierung der METAS-Radonkammer zur Herstellung von feldtypischen Messparametern

## **Teil 4**

**Raphael Grapentin**

6. August 2024

# Zusammenfassung

Gemäss Schweizer Recht müssen Radonmessgeräte und Radondosimeter zugelassen werden. Dazu wird die Radonkammer des Eidgenössischen Instituts für Metrologie (METAS) genutzt. Die Radonkammer ermöglicht das Erzeugen einer Referenzkonzentration, die auf Primärstandards rückverfolgbar ist. Dabei konnten die Parameter der Luft, also Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck nicht gesteuert werden und lagen nur bedingt bei Werten, wie sie bei einer Radonmessung zu erwarten sind. Besonders radonexponierte Arbeitsplätze können eine grosse Bandbreite an Temperaturen und Luftfechtigkeiten aufweisen, ebenso können Messungen in grosser Höhe bei deutlich geringerem Druck stattfinden als solche im Schweizer Mittelland. Damit stellt sich die Frage, ob und wie stark die Messgenauigkeit von Radonmessgeräten und Radondosimetern von den Parametern der Luft abhängt.

Aus diesem Grund war es notwendig die Radonkammer des METAS anzupassen, sodass die Temperatur, Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck gesteuert werden können.

Die Steuerung der Temperatur wurde über einen Wärmetauscher umgesetzt, der eine Flüssigkeit heizt oder kühlt. Diese Flüssigkeit umströmt die Hülle der Kammer in Schläuchen und überträgt so die Wärme. Mit einem Regelalgorithmus wird so die gewünschte Temperatur in der Kammer gehalten.

Die Steuerung der Luftfeuchtigkeit funktioniert mit einem Ultraschallvernebler. Dieser wird elektrisch angesteuert und so die relative Luftfeuchtigkeit auf dem Zielwert stabilisiert.

Eine Steuerung für den Luftdruck in der Kammer wurde zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht umgesetzt.

In einer Testmessung wurden die Funktion der Steuerungen verifiziert. Bei Temperaturen von 5 °C, 20 °C und 40 °C und relativen Luftfechtigkeiten von 30 %, 50 % und 85 % wurde eine Radonkonzentration von 400 Bq/m<sup>3</sup> mit einem Luftvolumenstrom von 5.5 L/min erzeugt. Die Messungen zeigten, dass der Mittelwert der Temperatur nur in einer Messreihe um 0.01 °C von der Zieltemperatur abwich. Die Standardabweichungen der Temperatur betragen maximal 0.05 °C. Bei der Luftfeuchtigkeit wurde mit 29.6 % die grösste Abweichung des Mittelwertes vom Zielwert von 30 % gemessen. Die Standardabweichungen der Messreihen betragen maximal 1.1 % relative Luftfeuchtigkeit.

Damit wurde gezeigt, dass die Zielwerte für Temperatur und Luftfeuchtigkeit genau erreicht und über Messreihen von sechs Stunden stabil gehalten werden können.

Abschliessend ist es weiterhin interessant eine Steuerung des Luftdrucks in der Messkammer zu realisieren, damit auch dieser Parameter kontrolliert werden kann. Anhand dieser Optimierungen können nun Messgeräte geprüft und Datengrundlagen geschaffen werden.

## 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 vierten Ziels des Forschungsprojektes Radon VBS ab, daher handelt es sich bei diesem Bericht um Teil 4. 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 vierten Ziels ist „Methodenentwicklung/Optimierung der METAS-Radonkammer zur Herstellung von felddtypischen Messparametern“. Dieser Bericht richtet sich an Leserinnen und Leser mit fundierten Kenntnissen im Radonbereich, weshalb auf eine allgemeine Einführung in das Thema verzichtet wird.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>5</b>
1.1	Zulassung und Eichung von Radonmessgeräten . . . . .	5
1.2	METAS-Radonkammer . . . . .	5
1.2.1	Radonkammer allgemein . . . . .	5
1.2.2	Beschreibung . . . . .	6
1.2.3	Funktion . . . . .	7
1.2.4	Anwendung . . . . .	7
1.3	Ziel und Umbau . . . . .	8
1.3.1	Ausgangslage . . . . .	8
1.3.2	Problematik . . . . .	8
1.3.3	Optimierung . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Erweiterung der METAS-Radonkammer</b>	<b>9</b>
2.1	Temperatur . . . . .	9
2.2	Luftfeuchtigkeit . . . . .	10
2.3	Luftdruck . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Testmessungen und Verifikation</b>	<b>11</b>
3.1	Messungen . . . . .	11
3.2	Ergebnisse . . . . .	12
3.3	Auswertung . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Schlussfolgerung</b>	<b>15</b>

# Kapitel 1

## Einführung

### 1.1 Zulassung und Eichung von Radonmessgeräten

Die Verordnung des EJPD<sup>1</sup> über Messmittel für ionisierende Strahlung (StMmV) vom 7. Dezember 2012 regelt die Anforderungen an Messmittel, die Verfahren für das Inverkehrbringen und zur Erhaltung der Messbeständigkeit dieser Messmittel für ionisierende Strahlung [1]. Darunter fallen auch Radonmessgeräte und Radondosimeter. Sowohl Radonmessgeräte wie auch -dosimeter bedürfen einer ordentlichen Zulassung und müssen bestimmte Bedingungen erfüllen. Die konkreten Vorgaben an die Messgenauigkeit sind in der StMmV ersichtlich und wurden bereits in einem früheren Bericht diskutiert [2].

Neben den Anforderungen an die Messgenauigkeit, ist in Art. 23 und 24 StMmV geregelt, dass Radonmessgeräte eine Zulassung sowie eine Ersteichung benötigen. Weiter muss alle vier Jahre eine Nacheichung durchgeführt werden. Radondosimeter müssen, gemäss Art. 26 und 27 StMmV, zugelassen werden und alle zwei Jahre an einer Vergleichsmessung teilnehmen.

Diese Zulassungen, Eichungen und Vergleichsmessungen werden vom Eidgenössischen Institut für Metrologie (METAS) durchgeführt. Dieses verfügt dazu über einen Radonmessplatz und betreibt eine Radonkammer.

### 1.2 METAS-Radonkammer

#### 1.2.1 Radonkammer allgemein

Eine Radonkammer besteht aus einem geschlossenen Volumen, in dem die Radonkonzentration gesteuert werden kann. Einfache Radonkammern können aus einem Behälter mit einem Volumen von wenigen Litern bestehen, in dem ein Stück Pechblende platziert wird. Das Radon emaniert aus der Pechblende und sammelt sich im Behälter, ist dieser ausreichend luftdicht, kann eine erhöhte Radonkonzentration im Behälter erzeugt werden.

Komplexe Radonkammern bestehen aus einem grossen Volumen und Radon-Emanationsquellen die auf Primärstandards rückführbar sind. Mit einem solchen Aufbau lassen sich gezielte Radonkonzentrationen einstellen und konstant halten.

<sup>1</sup>Eidgenössische Justiz- und Polizeidepartement

Radonkammern dienen hauptsächlich dazu, Radonmessgeräte zu testen und zu vergleichen. In einfachen Radonkammern, in denen die Radonkonzentration nur bedingt gesteuert werden kann, lassen sich solche Vergleichsmessungen durchführen. Um Messgeräte zu Kalibrieren oder zu Eichen sind Vergleiche mit Primärstandards und eine entsprechende Radonkammer notwendig. Der folgende Bericht handelt von der Radonkammer am Radonmessplatz des METAS.

### 1.2.2 Beschreibung

Die Radonkammer des METAS basiert auf einer kontinuierlichen Luftzufuhr. Die Luft durchströmt Radon-Emanationsquellen, um die gewünschte Radonkonzentration zu erreichen und in die Kammer zu leiten, über eine Abluft wird ein Druckgleichgewicht erreicht.

Als **Luftzufuhr** kann wahlweise Luft aus Gasflaschen oder Aussenluft durch einen Kompressor genutzt werden. Dabei bietet die Luft aus Gasflaschen den Vorteil, dass diese gelagert werden kann, bis mehrere Halbwertszeiten des Radons vergangen sind und die verbleibende Radonkonzentration beliebig tief ist. Alternativ kann synthetische Luft genutzt werden, die aus 80 % Stickstoff und 20 % Sauerstoff besteht und ebenfalls kein Radon enthält. Die Aussenluft aus dem Kompressor enthält eine messbare Radonkonzentration, typischerweise um  $15 \text{ Bq/m}^3$  [3].

Die Luftzufuhr wird durch Mass-Flow-Controller geregelt und mit verschiedenen Ventilen durch eine der drei **Radon-Emanationsquellen** geleitet um die gewünschte Radonkonzentration zu erreichen. Die drei Radon-Emanationsquellen beinhalten 2 kBq, 21 kBq und 200 kBq  $^{226}\text{Ra}$ , welches zu  $^{222}\text{Rn}$  zerfällt und wovon nahezu 100 % in den Luftstrom abgegeben wird. Der Volumenstrom kann zwischen 0 und 10 L/min eingestellt werden. Der Aufbau der Luftzufuhr und der Radon-Emanationsquellen ist in Abbildung 1.1 gezeigt.

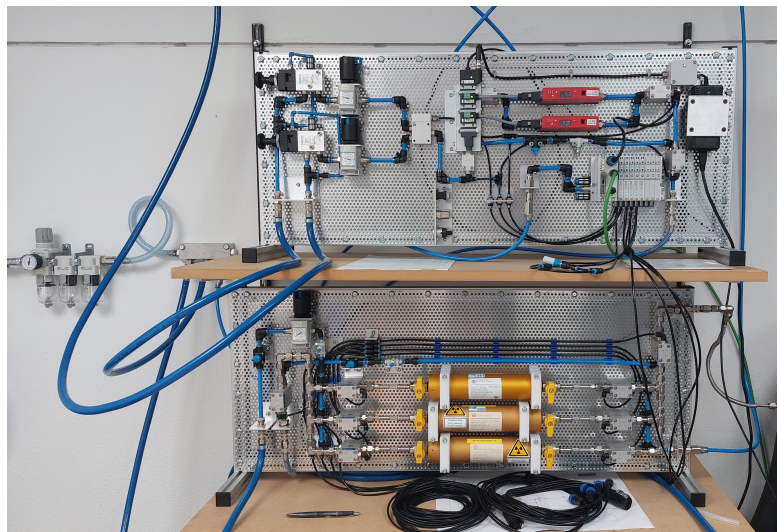


Abbildung 1.1: Bild der Luftzufuhr der Radonkammer. Unten in der Mitte sieht man die drei Radon-Emanationsquellen in Gelb. Oben rechts sind die Mass-Flow-Controller in Rot zu sehen. Weiter benötigt der Aufbau diverse Schläuche und Ventile, welche die Automatisierung durch die Software sicherstellen.

Die **Radonkammer** besteht aus einem zylindrischen Stahlbehälter mit einem Volumen von 130 L. Der Stahlbehälter liegt horizontal und kann auf einer Seite geöffnet werden. Es gibt weitere Öffnungen zur Durchführung von Strom- und Datenkabeln, für den Eintritt der radonhaltigen Luft und den Austritt der überschüssigen Luft. Die Durchführungen sind dicht ausgeführt und während dem Betrieb werden alle weiteren Öffnungen geschlossen. In Abbildung 2.1b ist die Radonkammer gezeigt, nachdem die im Folgenden beschriebenen Änderungen durchgeführt wurden.

### 1.2.3 Funktion

Die Radonkammer wird über eine Software automatisiert gesteuert. Der Nutzer kann die durchzuführenden Messreihen eintragen, kompatible Messgeräte verbinden und direkt eine Auswertung erhalten. Dabei wählt die Software den nötigen Luftvolumenstrom und die passende Radon-Emanationsquelle automatisch und berechnet anhand gemessener Temperatur und Luftfeuchtigkeit, sowie den Eigenschaften der Emanationsquellen, die Referenzkonzentration in der Radonkammer inklusive einer Unsicherheit. Vor und zwischen jeder Radonkonzentration wird eine Zeit zur Stabilisierung benötigt, diese wird ebenfalls von der Software berechnet und berücksichtigt.

Weiter werden die Messdaten der verbundenen Geräte ausgelesen und mit der berechneten Referenzkonzentration in der Kammer verglichen. Damit wird die Messgenauigkeit des Geräts ermittelt und entschieden, ob beispielsweise eine Eichung bestanden wurde. Geräte die nicht mit der Software kompatibel sind, können nach der Messung ausgelesen und deren Messwerte in die Software übertragen werden, um den Erfolg einer Eichung festzustellen. Ausserhalb von gesetzlich verlangten Eichungen können auch weitere Messungen durchgeführt werden, zum Beispiel zur Kalibrierung oder der Bestimmung der Messgenauigkeit von Messgeräten.

### 1.2.4 Anwendung

Um Messungen durchzuführen, muss folgendermassen schrittweise vorgegangen werden:

- **Einstellen der Messreihe in der Software**  
Die gewünschten Radonkonzentrationen sowie die Messdauer müssen in der Software eingestellt werden. Diese berechnet die benötigten Stabilisierungszeiten und gibt eine Gesamtdauer der Messreihe an.
- **Einrichten der Messgeräte**  
Die zu untersuchenden Messgeräte müssen eingeschaltet und in der Kammer platziert werden. Je nach Gerät, kann diese direkt mit dem PC und der Software verbunden und während der Messung direkt ausgelesen werden.
- **Durchführen der Messreihen**  
Sobald alles eingerichtet und die Kammer geschlossen ist, kann die Messreihe über die Software gestartet werden. Diese läuft dann automatisch gemäss den eingestellten Konzentrationen.
- **Auswertung der Messdaten**  
Nach dem Abschluss der Messreihe müssen die Messdaten ausgewertet werden. Die Messdaten der verbundenen Geräte werden direkt von der Software ausgewertet und analysiert. Für alle weiteren Geräte müssen die Messdaten manuell ausgelesen und in die Software eingegeben werden. Diese führt anschliessend die Analyse durch. Alternativ können die Messdaten und die Referenzkonzentrationen auch unabhängig von der Software analysiert werden.

## **1.3 Ziel und Umbau**

### **1.3.1 Ausgangslage**

Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, wird die Temperatur, Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck in der Kammer und im Laborraum gemessen. Diese Messdaten sind wichtig, um die Referenzkonzentrationen zu berechnen. Bei Verwendung von Luft aus Gasflaschen, aber auch bei Aussenluft aus dem Kompressor, liegt die relative Luftfeuchtigkeit typischerweise bei 15 % bis 30 % bei Raumtemperatur. Aufgrund der Abwärme von Geräten kann diese im Raum 25 °C und in der Kammer 30 °C betragen. Der Luftdruck im Raum und in der Kammer sind abhängig vom Wetter und dem verwendeten Luftvolumenstrom.

### **1.3.2 Problematik**

Die oben beschriebenen Parameter, insbesondere die Temperatur und Luftfeuchtigkeit, sind nur in seltenen Fällen repräsentativ für die Gebiete, in denen Radonmessgeräte zum Einsatz kommen. In der Regel werden Radonmessungen in Wohnräumen durchgeführt, bei beispielsweise einer Temperatur von 21 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 %. Weiter werden Radonmessgeräte in Kellerräumen angewendet, zum Beispiel bei 18 °C und 80 % Luftfeuchtigkeit. Ausserdem sind Radonmessungen an radonexponierten Arbeitsplätzen notwendig. Diese können insbesondere tiefe Temperaturen, 0 °C bis 10 °C, und sehr hohe relative Luftfeuchtigkeiten, bis zu 100 %, aufweisen. In hohen Lagen in den Alpen herrscht ein deutlich tieferer Luftdruck, als zum Beispiel im Schweizer Mittelland.

### **1.3.3 Optimierung**

Um die verschiedenen Gegebenheiten an den Orten zu berücksichtigen, an denen Radonmessgeräte zum Einsatz kommen, ist es notwendig, die Messgenauigkeit von Radonmessgeräten bei solchen Parametern zu bestimmen. Das Ziel war es, die Radonkammer des METAS aufzurüsten, damit die Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der Kammer gesteuert werden können.

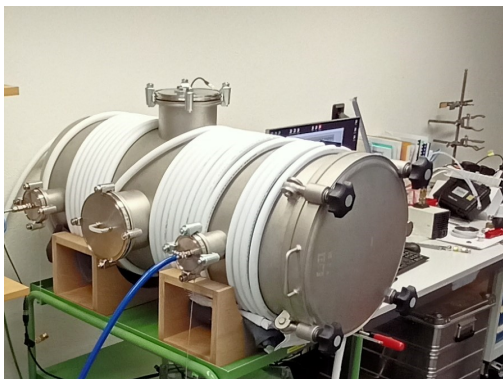
## Kapitel 2

# Erweiterung der METAS-Radonkammer

### 2.1 Temperatur

Die Steuerung der Temperatur wurde extern über die Hülle der Kammer realisiert. Dazu wird ein Wärmetauscher verwendet, der eine Flüssigkeit heizt oder kühlt. Die Flüssigkeit wird durch Schläuche gepumpt, welche um die Kammer gewickelt sind. So überträgt sich die Temperatur der Flüssigkeit auf die Stahlhülle der Kammer und von dort auf die Luft im Inneren. Dieser Aufbau ist in Abbildung 2.1a gezeigt. Abschliessend wurde die Kammer mit den Schläuchen sowie die Verbindungsstücke gedämmt um eine gute Wärmeübertragung zu erzielen. Die Kammer mit Isolierung ist in Abbildung 2.1b gezeigt.

Zu Steuerung der Temperatur wird der Messwert in der Kammer mit dem eingestellten Zielwert verglichen. Die Temperatur der Flüssigkeit wird anschliessend so reguliert, dass die Zieltemperatur möglichst schnell erreicht wird und stabil gehalten werden kann. Als Flüssigkeit wird eine Mischung aus Wasser, Glykol und einem Korrosionsschutzmittel verwendet. Dadurch können auch Temperaturen unter  $0^{\circ}\text{C}$  in der Kammer erreicht werden, ohne dass die Flüssigkeit gefriert.



(a) Bild der geschlossenen Radonkammer mit den Schläuchen zur Heizung und Kühlung.



(b) Bild der geöffneten isolierten Radonkammer.

Abbildung 2.1: Bilder der METAS-Radonkammer während und nach dem Umbau.

## 2.2 Luftfeuchtigkeit

Die Regulierung der Luftfeuchtigkeit geschieht über einen Ultraschallvernebler, der während einer Messung direkt in der Kammer platziert wird. Der Ultraschallvernebler wird elektrisch angesteuert und von der Software reguliert. Da dieser nur An oder Aus sein kann, wird eine Puls-Weiten-Modulation verwendet. Anhand der Messwerte in der Kammer berechnet die Software den benötigten Duty-Cycle um die gewünscht Luftfeuchtigkeit in der Kammer zu erreichen und konstant zu halten.

Da der Ultraschallvernebler inklusive Wassertank in der Kammer platziert wird, muss die Kammer geöffnet werden, um Wasser nachzufüllen. Deshalb können nicht beliebig lange oder viele Messreihen am Stück durchgeführt werden.

## 2.3 Luftdruck

Die Steuerung des Luftdrucks wurde noch nicht realisiert, jedoch können einige Überlegungen dazu angestellt werden.

Das Ziel ist es, dass ein wählbarer konstanter Druck in der Kammer herrscht. Dazu muss berücksichtigt werden, wie der Luftdruck im Laborraum oder Draussen ist. Um einen Druck über dem aktuellen Aussenluftdruck zu erzeugen, müsste die Abluft mit einem Ventil gehemmt werden. Durch die konstante Zuluft wird dann ein Überdruck erzielt.

Um einen Druck unter dem Aussendruck zu erzeugen, müsste die Luft in der Radonkammer aktiv abgepumpt werden. Anhand der Zuluft und dem Aussendruck kann das Abpumpen geregelt und der Druck konstant gehalten werden. Die Umsetzung dieser Möglichkeiten muss noch weiter geprüft werden.

## Kapitel 3

# Testmessungen und Verifikation

### 3.1 Messungen

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit wurden Testmessungen durchgeführt. Dabei wurde ein Radonkonzentration von  $400 \text{ Bq/m}^3$  mit einem Luftvolumenstrom von  $5.5 \text{ L/min}$  verwendet. Es wurden neun Messreihen durchgeführt, wobei die Zielwerte der Temperatur  $5^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$  und  $40^\circ\text{C}$  und der relativen Luftfeuchtigkeit  $30\%$ ,  $50\%$  und  $85\%$  waren. Die Radonkonzentration wurde erzeugt, um simultan Messgeräte zu testen. Die Ergebnisse dieser Messgeräte werden in einem separaten Bericht präsentiert. Zur Messung von Lufttemperatur, -feuchtigkeit und -druck in der Kammer und im Laborraum wurde ein Almemo 2470 verwendet. Zudem wurde der Laborraum während den Messungen klimatisiert.

Startzeit (Dauer: 6 h)	Referenzkonzentration [ $\text{Bq/m}^3$ ]	Temperatur [ $^\circ\text{C}$ ]	rel. Luftfeuchtigkeit [%]
2024-06-09 08:36	$424 \pm 9$	$5.00 \pm 0.03$	$29.6 \pm 0.1$
2024-06-09 23:59	$424 \pm 9$	$5.00 \pm 0.03$	$50.0 \pm 0.1$
2024-06-10 09:59	$425 \pm 9$	$5.00 \pm 0.05$	$85.0 \pm 1.1$
2024-06-11 14:35	$406 \pm 9$	$20.00 \pm 0.02$	$30.0 \pm 0.2$
2024-06-11 22:35	$407 \pm 9$	$20.00 \pm 0.02$	$50.0 \pm 0.2$
2024-06-12 06:35	$406 \pm 9$	$20.01 \pm 0.03$	$84.9 \pm 0.4$
2024-06-13 15:58	$380 \pm 8$	$40.00 \pm 0.04$	$30.1 \pm 0.1$
2024-06-13 23:58	$380 \pm 8$	$40.00 \pm 0.03$	$50.0 \pm 0.1$
2024-06-14 07:58	$381 \pm 8$	$40.00 \pm 0.05$	$85.0 \pm 0.3$

Tabelle 3.1: Übersicht über die Messwerte der Messreihen, die in Abbildungen 3.1 bis 3.4 dargestellt sind. Für jede Messreihe ist die Startzeit angegeben, ab dieser Startzeit dauerte eine Messreihe sechs Stunden. Weiter sind für jede Messreihe die Referenzkonzentrationen aufgeführt mit einer Unsicherheit. Für die Messwerte der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit sind die Mittelwerte pro Messreihe und die Standardabweichung der Messwerte in der Messreihe aufgeführt.

## 3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 3.1 dargestellt, wobei die Stabilisierung vor und zwischen den Messreihen nicht berücksichtigt wurde. In Abbildungen 3.1 bis 3.4 sind die zeitlichen Verläufe der Messwerte gezeigt, dabei sind ebenfalls die Stabilisierungszeiten beinhaltet. Aus organisatorischen Gründen wurden die Messreihen bei 5 °C in zwei separaten Durchgängen ausgeführt.

## 3.3 Auswertung

Die Ergebnisse in Tabelle 3.1 zeigen, dass die Zielwerte in allen Messreihen erreicht wurden.

Bei der Temperatur überschritt der Mittelwert einer Messreihe den Zielwert von 20 °C um 0.01 °C, bei allen anderen Messreihen wurde der Zielwert im Mittel genau getroffen. Die Standardabweichungen der Messwerte während den Messreihen lag zwischen 0.02 °C und 0.05 °C. Ebenfalls ist in den zeitlichen Darstellungen der Messwerte die Stabilität zu sehen.

Aufgrund der Klimatisierung des Laborraumes sind die Messwerte der Temperatur und Luftfeuchtigkeit dort konstant, zeigen aber Ausschlägen.

Bei der relativen Luftfeuchtigkeit, zeigte eine Messreihe einen Mittelwert von  $29.6 \pm 0.1$  % bei einem Zielwert von 30 %, dabei lag hier der Zielwert ausserhalb einer Standardabweichung. Bei den weiteren Messreihen lag der Zielwert innerhalb einer Standardabweichung vom Mittelwert. Bei den Messreihen mit einem Zielwert von 85 % waren die Standardabweichungen grösser als bei den anderen Messreihen. Insbesondere bei 5 °C betrug die Standardabweichung 1.1 Prozentpunkte. Das liegt daran, dass bei dieser Temperatur die Luft nur wenig Wasserdampf aufnehmen kann, verglichen mit höheren Temperaturen. Eine kurze Befeuchtung durch den Ultraschallvernebler hebt die relative Luftfeuchtigkeit um einige Prozentpunkte. Bei höheren Temperaturen ist dieser Effekt ebenfalls zu sehen, aber deutlich geringer. Dies zeigt sich in den Standardabweichungen von 0.4 Prozentpunkten bei 20 °C beziehungsweise 0.3 Prozentpunkte bei 40 °C. In den zeitlichen Darstellungen der Messwerte sind diese Schwankungen ebenfalls deutlich zu sehen.

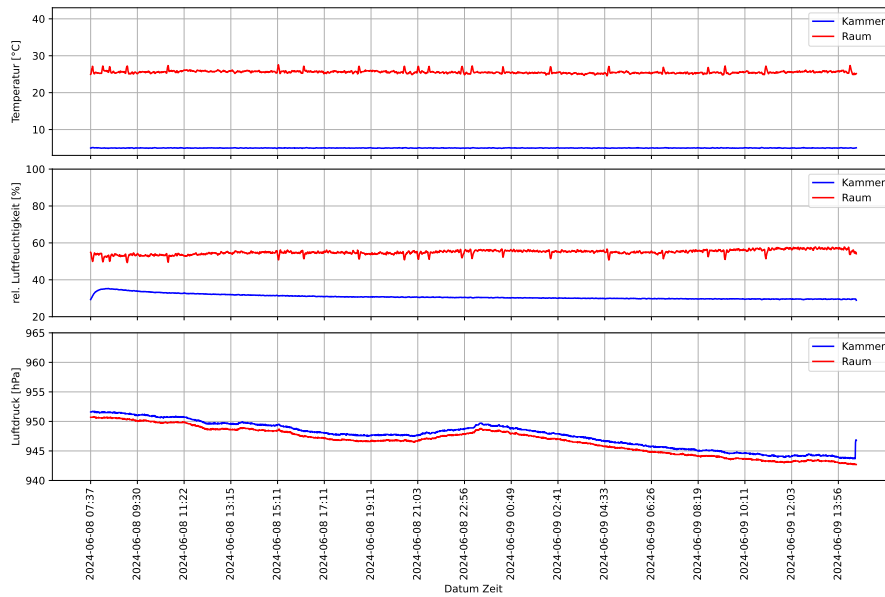


Abbildung 3.1: Messdaten der Temperatur, relativen Luftfeuchtigkeit und Luftdrucks während einer Messreihe. Für jeden Parameter ist der Messwert in der Radonkammer und im Raum dargestellt.

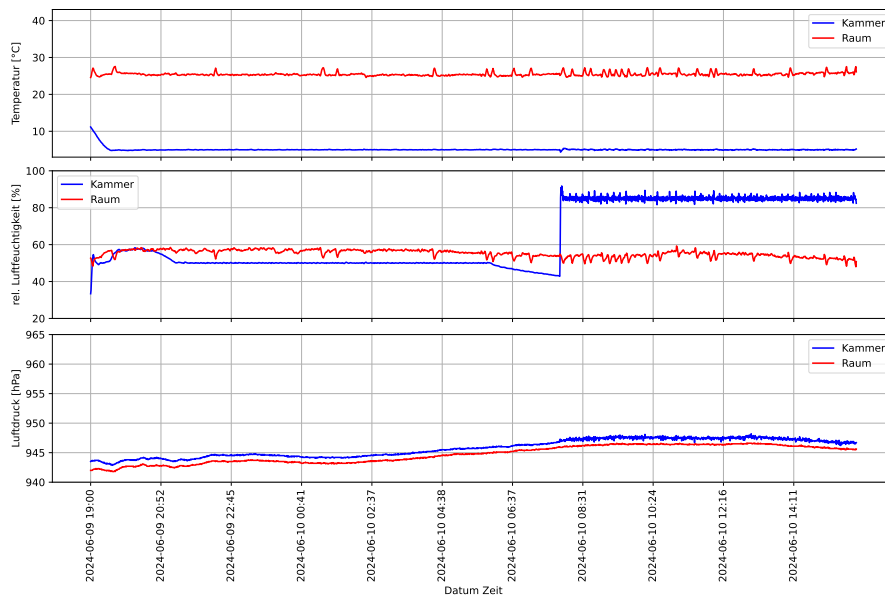


Abbildung 3.2: Messdaten der Temperatur, relativen Luftfeuchtigkeit und Luftdrucks während einer Messreihe. Für jeden Parameter ist der Messwert in der Radonkammer und im Raum dargestellt.

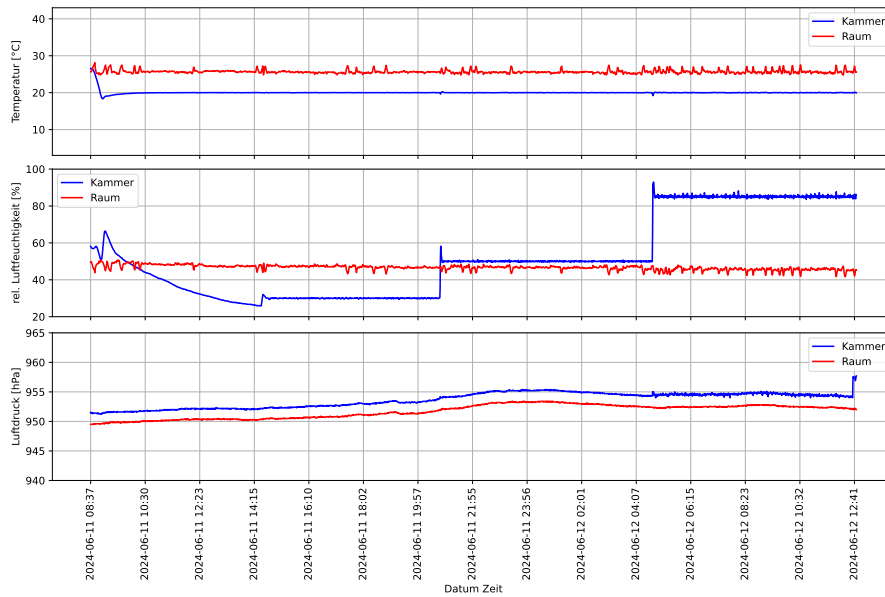


Abbildung 3.3: Messdaten der Temperatur, relativen Luftfeuchtigkeit und Luftdrucks während einer Messreihe. Für jeden Parameter ist der Messwert in der Radonkammer und im Raum dargestellt.

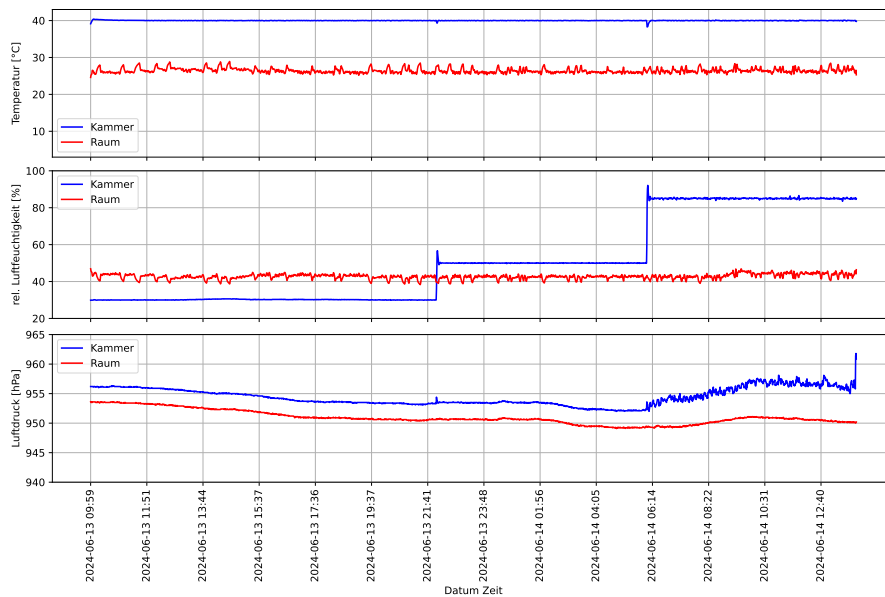


Abbildung 3.4: Messdaten der Temperatur, relativen Luftfeuchtigkeit und Luftdrucks während einer Messreihe. Für jeden Parameter ist der Messwert in der Radonkammer und im Raum dargestellt.

## Kapitel 4

# Schlussfolgerung

In diesem Bericht wurde die Radonkammer des Eidgenössischen Instituts für Metrologie beschrieben, sowie die Erweiterung zur Steuerung der Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der Kammer präsentiert. Ausserdem wurden Messergebnisse bei verschiedenen Zielwerten für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit gezeigt.

Mit diesen Erweiterungen können die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit in der Kammer während Messungen gesteuert werden. Dabei wurde die Steuerung der Temperatur mit einem Wärmetauscher realisiert. Dieser erwärmt oder kühlt eine Flüssigkeit, die durch Schläuche um die Kammer strömt, sodass die gewünschte Zieltemperatur in der Kammer erreicht wird. Die Regelung der Luftfeuchtigkeit geschieht über eine Ultraschallvernebler, der während einer Messung in der Kammer platziert wird. Mithilfe einer Puls-Weite-Modulation kann die eingestellte relative Luftfeuchtigkeit konstant gehalten werden.

Es wurden neun Messreihen von je sechs Stunden durchgeführt. Dabei waren die Zielwerte der Temperatur 5 °C, 20 °C und 40 °C und der relativen Luftfeuchtigkeit 30 %, 50 % und 85 %. Die neun Messreihen bestanden aus allen Kombinationen dieser Zielwerte. Es wurde gezeigt, dass die Mittelwerte der Temperatur und Luftfeuchtigkeit sehr nahe bei den Zielwerte lagen. So lagen die Mittelwerte der Temperatur innerhalb einer Standardabweichung vom Zielwert. Bei der relativen Luftfeuchtigkeit lag der Mittelwert einer Messreihe ausserhalb einer Standardabweichung vom Zielwert. Die weiteren Messreihen lagen ebenfalls innerhalb einer Standardabweichung vom Zielwert. Bei 5 °C und 85 % relative Luftfeuchtigkeit wurden mit  $85.0 \pm 1.1\%$  die grösste Standardabweichung gemessen.

Damit wurde die korrekte Funktion der Steuerung gezeigt. In Zukunft können Radonmessgeräte entsprechend ihrem Einsatzgebiet bei spezifischen Parametern der Luft, also Temperatur und Luftfeuchtigkeit, untersucht werden.

Eine weitere Optimierung könnte die Steuerung des Luftdrucks in der Kammer sein, damit ein Messeinsatz in grossen Höhen simuliert werden kann. Die Umsetzung einer solchen Steuerung wird jedoch deutlich aufwändiger als bei Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

# Literatur

- [1] *Verordnung des EJPD über Messmittel für ionisierende Strahlung vom 7. Dezember 2012 (StMmV; SR 941.210.5).*
- [2] Raphael Grapentin. *Prüfung von Einstufungsparameter für die mögliche Zulassung von Radon-Personendosimeter.* Techn. Ber. Muttenz: Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik FHNW. Institut Nachhaltigkeit und Energie am Bau, 2023. DOI: <https://doi.org/10.26041/fhnw-8300>. URL: <https://irf.fhnw.ch/handle/11654/44604>.
- [3] T F Gesell. “Background atmospheric  $^{222}\text{Rn}$  concentrations outdoors and indoors: a review”. In: *Health physics (1958)* 45.2 (1983). ISSN: 0017-9078.