

## **Abschlussbericht**

# **Radiologisches Forschungsvorhaben „Radonquellstärke von Gebäuden“**

Auftragnehmer:

Technische Hochschule Mittelhessen (THM)  
Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz (IMPS)

Projektleitung:

Prof. Dr. Joachim Breckow

Projektbearbeiter:

Joy-Vinothan Devendranath  
Volker Grimm  
Till Kuske  
Dr. Kaija Spruck

Projektzeitraum: 01.07.2017 bis 30.06.2018

Förderkennzeichen: HMU32206035

Auftraggeber: Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV)

Gießen, Juli 2018

## Zusammenfassung

Der mit dem neuen Strahlenschutzgesetz eingeführte Referenzwert von  $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  für die Radon-Aktivitätskonzentration in Gebäuden erfordert ein durchdachtes Verfahren zur Messung und Beurteilung der Radonsituation in Innenräumen. Die Radonquellstärke bietet sich hierfür als aussagekräftiger Parameter an, da sie unabhängig von Lüftungsgewohnheiten der Benutzer eine Möglichkeit bietet, ein Gebäude in Bezug auf dessen Radonsituation zu charakterisieren.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden vier verschiedenen Verfahren zur Messung und Berechnung der Radonquellstärke an drei Messobjekten getestet und verglichen. Alle Verfahren eignen sich zur Beurteilung der Radonsituation in Gebäuden, allerdings unterscheiden sie sich in Durchführung und Aufwand.

Die kontinuierliche Ermittlung der Radonquellstärke anhand einer Tracergasmessung nach ISO 12569:2012 und Berechnung nach Differenzgleichung ließ sich nach praktischen Aspekten vereinfachen, die Berechnung mit der Statistiksoftware R Project bleibt allerdings weiterhin aufwendig und fehleranfällig. Verglichen wurde das Verfahren mit einem auf den gleichen Messdaten beruhenden Berechnungsverfahren, bei dem die Luftwechselrate nach VDI-Richtlinie 4300-7 ermittelt wurde. Im Vergleich erwies sich Letzteres auch in Bezug auf die kontinuierliche Ermittlung der Quellstärke als ebenbürtig und durch seine einfachere Berechnung als praktikabler. Beiden Verfahren gemeinsam ist eine Messzeit von einigen Tagen bis zu einer Woche und der zusätzliche Aufwand durch die Tracergasmessung. Aus den zeitlichen Verläufen lässt sich anhand des statistischen Medians die mittlere Radonquellstärke ermitteln.

Das Differenzdruckverfahren (BlowerDoor<sup>®</sup>) zur Bestimmung der Quellstärke kann innerhalb eines Tages durchgeführt werden und liefert letztendlich einen zeitlichen Einzelwert für die Radonquellstärke. Es eignet sich allerdings nicht zur Beurteilung von Einzelräumen im Haus, da zum einen die Quelle der einströmenden Luft und deren Konzentration bekannt sein muss, und zum anderen das Verfahren nur zur Herstellung einer Druckdifferenz zwischen Gebäude und Umgebung, nicht aber innerhalb eines Hauses geeignet ist. Ist allerdings eine Dichtigkeitsuntersuchung im Zuge einer Bauabnahme geplant, ist dieses Verfahren jedoch durchaus geeignet ein Gebäude hinsichtlich seiner Radoneigenschaften zu charakterisieren.

Die Berechnung der Radonquellstärke nach Belüftungsänderung anhand von Aktivitäts-Aufbaukurven benötigt hohe Quellstärken im Raum, ist aber damit zur Identifizierung von kritischen Gebäuden

geeignet. Für große Gebäude ist eine parallele Messung in mehreren Räumen möglich. Der Messaufwand beschränkt sich auf die Messung der Radon-Aktivitätskonzentration und die Auswertung erfolgt durch Anpassung von Exponentialfunktionen. Für sporadische Messungen ist dieses Verfahren durch seinen geringen Aufwand im Vergleich zu den anderen Verfahren am besten geeignet. Die Berechnung der Radonquellstärke nach Belüftungsänderung anhand von Aktivitäts-Abbaukurven durch hohe Luftwechselraten ist aufgrund der inhomogenen verteilten Luftströmungen im Raum weniger geeignet.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	1
Tabellenverzeichnis .....	5
1 Einleitung .....	6
2 Zielsetzung .....	7
3 Messmethodik .....	8
3.1 Messobjekte .....	8
3.2 Technische Ausrüstung .....	9
3.3 Messverfahren .....	10
3.3.1 Berechnung der Quellstärke nach vereinf. Differenzgleichung (DIF-Verfahren) .....	10
3.3.1.1 Berechnung der Luftwechselrate .....	11
3.3.1.2 Vereinfachung der Berechnung nach Differenzgleichung .....	11
3.3.1.3 Unsicherheitsbetrachtung .....	12
3.3.2 Vereinfachte Berechnung der Quellstärke nach VDI-Richtlinie (VDI-Verfahren) .....	13
3.3.2.1 Berechnungsmethode .....	13
3.3.2.2 Unsicherheitsbetrachtung .....	13
3.3.3 Das modifizierte Differenzdruckverfahren (BD-Verfahren) .....	13
3.3.3.1 Das BlowerDoor <sup>®</sup> -Verfahren zur Bestimmung der Gebäudedichtigkeit .....	13
3.3.3.2 Modifizierung des Differenzdruckverfahrens .....	14
3.3.3.3 Unsicherheitsbetrachtung .....	16
3.3.4 Berechnung anhand von Sättigungskurven (SAT-Verfahren) .....	16
3.3.4.1 Ermittlung von Luftwechselrate und Radonquellstärke .....	16
3.3.4.2 Unsicherheitsbetrachtung .....	17
3.3.5 Datenverarbeitung mit der Statistiksoftware R Project .....	18
3.3.5.1 Ausgangslage der Datenverarbeitung .....	18
3.3.5.2 Überarbeitete und angepasste Datenverarbeitung .....	18
4 Anwendung und Vergleich der Verfahren.....	19
4.1 Anwendung des DIF-Verfahrens .....	22
4.1.1 Messdatenaufbereitung .....	22
4.1.2 Ergebnisse "Trohe", Raum 1 .....	24
4.1.3 Ergebnisse Objekt "Trohe", Raum 2 .....	26
4.1.4 Ergebnisse Objekt "Allendorf" .....	29
4.2 Anwendung des VDI-Verfahrens .....	29
4.2.1 Messdatenaufbereitung .....	29
4.2.2 Ergebnisse Objekt "Trohe", Raum 1 .....	31
4.2.3 Ergebnisse Objekt "Trohe", Raum 2 .....	35
4.2.4 Ergebnisse Objekt "Allendorf" .....	38
4.3 Anwendung des Differenzdruckverfahrens .....	39

4.3.1	Ergebnisse Objekt "Trohe", Raum 1 .....	39
4.3.2	Ergebnisse Objekt "Trohe", Raum 2 .....	41
4.3.3	Ergebnisse Objekt "Allendorf" .....	42
4.4	Anwendung des SAT-Verfahrens.....	42
4.4.1	Ergebnisse Objekt "Trohe", Raum 1 .....	42
4.4.2	Ergebnisse Objekt "Trohe", Raum 2 .....	44
4.4.3	Ergebnisse Objekt "Allendorf" .....	48
4.5	Vergleich der verschiedenen Verfahren .....	48
4.5.1	Vergleich des DIF- und des VDI-Verfahrens .....	48
4.5.2	Vergleich der Ergebnisse aller angewandten Verfahren .....	49
4.5.3	Vergleich der Verfahren unter BD-Bedingungen .....	51
5	Diskussion .....	52
5.1	Erprobung und Vergleich der Verfahren .....	52
5.2	Charakterisierung der Messobjekte .....	56
6	Fazit .....	57
7	Literaturverzeichnis .....	59

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundriss der beiden baugleichen Kellerräume im Messobjekt Trohe. Das Gesamtvolumen beträgt  $18 \text{ m}^3$ . Die Abkürzung MP steht für Messpunkt und kennzeichnet die Stellen, an denen Messgeräte des Tracergasverfahrens aufgestellt waren. Eine Ausnahme bildete MP2, an dem sich kein Radonmessgerät befand..... 8

Abbildung 2: Grundriss des Messobjektes Allendorf. Das Gesamtvolumen beträgt  $28 \text{ m}^3$ . Die Abkürzung „MP“ steht für Messpunkt und kennzeichnet die Stellen, an denen Messgeräte des Tracergasverfahrens aufgestellt waren..... 9

Abbildung 3: Schematische Darstellung des BlowerDoor<sup>®</sup> Verfahrens zur Charakterisierung von Gebäuden hinsichtlich ihrer Luftdichtigkeit, bearbeitet nach (Schwekendiek kein Datum). ..... 14

Abbildung 4: Aufgebautes Equipment des modifizierten BlowerDoor<sup>®</sup> Verfahrens, Ansicht aus dem zum messenden Innenraum. Die Türöffnung wird mit einer Folie (1) bis auf die Öffnung für den Ventilator (2) abgedichtet. Je nach gewünschter Druckstufe werden unterschiedlich viele Öffnungen (3) am Gerät abgedeckt. Das CO<sub>2</sub>-Messgerät (4) und das Radonmessgerät (5) werden bei BD-Verfahren dicht am Ventilator platziert, damit die Konzentrationen im Luftstrom der abgesaugten Luft gemessen werden können. .... 15

Abbildung 5: Darstellung zur Bestimmung der Luftwechselrate anhand einer Sättigungskurve (Aufbaukurve). Dargestellt sind die gemessene Radonkonzentration (Kreise), die nach Gleichung 10 ermittelte Ausgleichskurve (schwarze, durchgezogene Linie), die Sättigungskonzentration  $cRn^\infty$  (gestrichelte Linie), sowie die Zeitkonstante  $\tau$  des Anstiegs (gepunkteter Linie). ..... 17

Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der berechneten Radonquellstärken nach dem ursprünglichen Differenzenverfahren und dem hier angewandten DIF-Verfahren im Messobjekt Allendorf, im Vergleich. Als Berechnungsgrundlage dienten Messwerte aus der Messkampagne, die im Rahmen von Buermeyer2017 durchgeführt wurde. Die Quellstärke wurde zum einen unter Einbeziehung von zeitgleich gemessenen Außenluftkonzentrationen (Gleichung 2 und 3, schwarze Linie) und zum anderen unter Verwendung der Mittelwerte (Gleichung 4 und 5, grau gestrichelte Linie) von  $cRn = 23 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  und  $c(\text{CO}_2) = 453 \text{ ppm}$  berechnet. .... 22

Abbildung 7: Beispiel für die berechnete Luftwechselrate aus den gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen an verschiedenen Messpunkten in Messobjekt Trohe, Raum 2, DIF-Verfahren. Die schwarz-durchgezogene Linie entspricht der berechneten Luftwechselrate an MP1, die grau-durchgezogene Linie der an MP3 und die grau-gepunktete Linie der an MP4. .... 23

Abbildung 8: Beispiel für die gemessene Radonkonzentration an den verschiedenen Messpunkten in Messobjekt Trohe, Raum 2 im Rahmen des DIF-Verfahren. Die schwarz-durchgezogene Linie entspricht der Radonkonzentration an MP1, die grau-gepunktete Linie der an MP3 und die grau-gestrichelte Linie der an MP4. .... 24

Abbildung 9: Nach Gleichung 5 ermittelte und über die Dauer der Messabschnitte gemittelte Luftwechselrate in Messobjekt Trohe, Raum 1, DIF-Verfahren. Abgebildet sich zwei unterschiedliche Belüftungssituationen (Raumtür offen: Kreise; Raumtür geschlossen: Punkte).....	25
Abbildung 10: Nach Gleichung 4 (DIF-Verfahren) ermittelte und über die Dauer der Messabschnitte gemittelte Radonquellstärken in Messobjekt Trohe, Raum 1 bei unterschiedlichen Belüftungssituationen (Raumtür offen: Kreise; Raumtür geschlossen: Punkte).....	25
Abbildung 11: Nach Gleichung 5 ermittelte und über die Dauer der Messabschnitte Luftwechselrate in Messobjekt Trohe, Raum 2, DIF-Verfahren. Abgebildet sich zwei unterschiedliche Belüftungssituationen (Raumtür offen: quadratischer Rahmen; Raumtür geschlossen: ausgefülltes Quadrat). .....	27
Abbildung 12: Nach Gleichung 4 ermittelte und über die Dauer der Messabschnitte gemittelte Radonquellstärken nach DIF-Verfahren in Messobjekt Trohe, Raum 2 bei unterschiedlichen Belüftungssituationen (Raumtür offen: quadratischer Rahmen ohne Füllung; Raumtür geschlossen: ausgefüllte Quadrate). .....	27
Abbildung 13: Nach Gleichung 4 ermittelter, zeitliche Verlauf der Quellstärke in Messobjekt Allendorf bei unterschiedlichen Belüftungssituationen. Die Berechnung erfolgte nach dem DIF-Verfahren.....	29
Abbildung 14: Gemessene CO <sub>2</sub> -Konzentrationen an den vier Messpunkten in Trohe, Raum 2 im Rahmen des VDI-Verfahren. Die schwarz-durchgezogene Linie stellt die CO <sub>2</sub> -Konzentrationen am MP1 dar, die schwarz-gepunktete am MP2, die grau-durchgezogene Linie wurde am MP3 und die grau-gepunktete am MP4 gemessen. ....	30
Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der aus den gemittelten CO <sub>2</sub> -Konzentrationen errechneten Luftwechselrate, Trohe, Raum 2, VDI-Verfahren .....	30
Abbildung 16: Gemessene Radonkonzentrationen an den drei Messpunkten in Trohe, Raum 2, im Rahmen des VDI-Verfahren. Die schwarz-durchgezogene Linie sind die Messwerte von MP1 die schwarz-gepunktete Linie von MP3 und die grau-gepunktete Linie von MP4. ....	31
Abbildung 17: Nach Gleichung 7 ermittelte und über die Dauer der Messabschnitte gemittelte Radonquellstärken in Messobjekt Trohe, Raum 1, VDI-Verfahren, bei unterschiedlichen Belüftungssituationen (Raumtür offen: Kreise; Raumtür geschlossen: Punkte).....	32
Abbildung 18: Radonquellstärke der gemessenen Zeitabschnitte des Gebäudes Trohe, Raum 1, berechnet nach dem VDI-Verfahren. (Raumtür offen: Kreise; Raumtür geschlossen: Punkte).....	32
Abbildung 19: Beispiel für den aus dem Verlauf der Luftwechselrate und der gemessenen Radon-Aktivitätskonzentration errechneter Verlauf der Quellstärke in Trohe, Raum 2 nach VDI-Verfahren. ....	34
Abbildung 20: Über verschiedene Zeitintervalle (10 Minuten, 1 Tag, 7 Tage) gemittelte Werte der Quellstärke des Gebäudes Trohe, Raum 1 nach VDI-Verfahren. Die Boxen entsprechen dem Bereich, in dem 50% aller Werte liegen, die Antennen umschließen den 1,5-fachen Bereich bzw. stellen, wenn alle	

Werte in diesem Bereich enthalten sind, die Extremwerte dar. Werte außerhalb des 1,5-fachen Bereich werden als Ausreißer ignoriert.....	34
Abbildung 21: Luftwechselrate der gemessenen Zeitabschnitte im Messobjekt Trohe, Raum 2, VDI-Verfahren. Abgebildet sich zwei unterschiedliche Belüftungssituationen (Raumtür offen: quadratischer Rahmen; Raumtür geschlossen: ausgefülltes Quadrat).....	35
Abbildung 22: Radonquellstärke nach VDI-Verfahren der gemessenen Zeitabschnitte des Gebäudes Trohe, Raum 2, VDI-Verfahren. Abgebildet sich zwei unterschiedliche Belüftungssituationen (Raumtür offen: quadratischer Rahmen; Raumtür geschlossen: ausgefülltes Quadrat).....	37
Abbildung 23: Über verschiedene Zeitintervalle (10 Minuten, 1 Tag, 7 Tage, 14 Tage) gemittelte Werte der Quellstärke des Gebäudes Trohe, Raum 2 nach VDI-Verfahren. Die Boxen entsprechen dem Bereich, in dem 50% aller Werte liegen, die Antennen umschließen den 1,5-fachen Bereich bzw. stellen, wenn alle Werte in diesem Bereich enthalten sind, die Extremwerte dar. Werte außerhalb des 1,5-fachen Bereich werden als Ausreißer ignoriert. ....	37
Abbildung 24: Nach VDI-Methode berechneter zeitlicher Verlauf der Radonquellstärke im Messobjekt Allendorf.....	38
Abbildung 25: Über verschiedene Zeitintervalle (10 Minuten, 1 Tag, 7 Tage, 14 Tage) gemittelte Werte der Quellstärke nach VDI-Verfahren des Messobjektes Allendorf bei einer Gesamtmesszeit von etwa sechs Wochen. Die Boxen entsprechen dem Bereich, in dem 50% aller Werte liegen, die Antennen umschließen den 1,5-fachen Bereich bzw. stellen, wenn alle Werte in diesem Bereich enthalten sind, die Extremwerte dar. Werte außerhalb des 1,5-fachen Bereich werden als Ausreißer ignoriert. ....	38
Abbildung 26: Radonquellstärke in Abhängigkeit vom eingestellten Differenzdruck (BD-Verfahren) in Messobjekt Trohe, Raum 1. Die Kreise stellen die errechneten Quellstärken dar, die gestrichelte Linie ist eine lineare Anpassung an die Datenpunkte zur Ermittlung des Achsenabschnittes.....	40
Abbildung 27: Luftwechselrate in Abhängigkeit vom eingestellten Differenzdruck (BD-Verfahren) in Trohe, Raum 1 und Raum 2. Unterschieden werden Messungen mit offener (hellgraue Punkte) und geschlossener (dunkelgraue Punkte) Außentür. Zur besseren Veranschaulichung der Verläufe wurden zwei Gerade an die Daten angepasst (Linien).....	40
Abbildung 28: Radonquellstärke in Abhängigkeit vom eingestellten Differenzdruck (BD-Verfahren) in Messobjekt Trohe, Raum 2. Die Quadrate stellen die errechneten Quellstärken dar, die gestrichelte Linie ist eine lineare Anpassung an die Datenpunkte zur Ermittlung des Achsenabschnittes.....	41
Abbildung 29: Ermittelte Luftwechselraten in Trohe, Raum 1, anhand von Abbaukurven aus verschiedenen Messabschnitten (SAT-Verfahren). Zur Veranschaulichung beinhalten die abgebildeten Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Diskrepanz der Werte an den einzelnen Messpunkten.....	43
Abbildung 30: Ermittelte Radonquellstärken in Trohe, Raum 1, anhand von Abbaukurven aus verschiedenen Messabschnitten (SAT-Verfahren). Zur Veranschaulichung beinhalten die abgebildeten Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Diskrepanz der Werte an den einzelnen Messpunkten.....	43



Abbildung 31: Ermittelte Luftwechselraten in Trohe, Raum 2, anhand von Aufbaukurven aus verschiedenen Messabschnitten (SAT-Verfahren). Zur Veranschaulichung beinhalten die abgebildeten Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Diskrepanz der Werte an den einzelnen Messpunkten.....	45
Abbildung 32: Ermittelte Radonquellstärken in Trohe, Raum 2, anhand von Aufbaukurven aus verschiedenen Messabschnitten (SAT-Verfahren). Zur Veranschaulichung beinhalten die abgebildeten Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Diskrepanz der Werte an den einzelnen Messpunkten.....	45
Abbildung 33: Ermittelte Luftwechselraten in Trohe, Raum 2, anhand von Abbaukurven aus verschiedenen Messabschnitten (SAT-Verfahren). Zur Veranschaulichung beinhalten die abgebildeten Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Diskrepanz der Werte an den einzelnen Messpunkten.....	46
Abbildung 34: Ermittelte Radonquellstärken in Trohe, Raum 2, anhand von Abbaukurven aus verschiedenen Messabschnitten, SAT-Verfahren. Zur Veranschaulichung beinhalten die abgebildeten Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Diskrepanz der Werte an den einzelnen Messpunkten.....	46
Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf der Radonquellstärke im Objekt Trohe, Raum 2. Die schwarze Linie stellt den Quellstärkenverlauf nach VDI-Verfahren dar, die graue Linie die Ergebnisse des DIF-Verfahrens.....	48
Abbildung 36: Vergleich der Ergebnisse für die errechnete Radonquellstärke der Verfahren DIF, VDI, SAT und BD, für Trohe, Raum 1. Die Boxen entsprechen dem Bereich, in dem 50% aller Werte liegen, die Antennen umschließen den 1,5-fachen Bereich bzw. stellen, wenn alle Werte in diesem Bereich enthalten sind, die Extremwerte dar. Werte außerhalb des 1,5-fachen Bereich werden als Ausreißer ignoriert. Der Box-Plot des BD-Verfahrens stellt mit seine Antennen die berechneten Unsicherheiten dar, die Box entspricht der 50% Unsicherheit des ermittelten Wertes.....	49
Abbildung 37: Vergleich der Ergebnisse für die errechnete Radonquellstärke der Verfahren DIF, VDI, SAT und BD, für Trohe, Raum 2. Die Boxen entsprechen dem Bereich, in dem 50% aller Werte liegen, die Antennen umschließen den 1,5-fachen Bereich bzw. stellen, wenn alle Werte in diesem Bereich enthalten sind, die Extremwerte dar. Werte außerhalb des 1,5-fachen Bereich werden als Ausreißer ignoriert. Der Box-Plot des BD-Verfahrens stellt mit seine Antennen die berechneten Unsicherheiten dar, die Box entspricht der 50% Unsicherheit des ermittelten Wertes.....	50
Abbildung 38: Berechnete Luftwechselrate in Abhängigkeit des eingestellten Differenzdruckes, Vergleich verschiedenen Verfahren am Messobjekt Trohe Raum 1 und Raum 2. Dreieck-Rahmen: VDI, ausgefülltes Dreieck: SAT, waagrechter Strich: BD. ....	52
Abbildung 39: Abhängigkeit der Radonquellstärke von der zugehörigen Luftwechselrate anhand von Messobjekt Trohe, Raum 1. Dargestellt und erkennbar sind die beiden Klassen, die sich durch den Zustand der Raumtür unterscheiden. ....	56

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Belüftungssituation und zugehörige Messzeiten der einzelnen Messintervalle in Messobjekt Trohe. Die Messzeiten und der Zustand der Türe beziehen sich auf den Gleichgewichtszustand, auf den das DIF und VDI-Verfahren angewandt wurde. Auf welche Art von Sättigungskurve das SAT-Verfahren vor Herstellung des Gleichgewichtszustandes angewandt wurde, ist aus Spalte „Kurvenart“ abzulesen.. .....	21
Tabelle 2: Übersicht über die an den jeweiligen Messabschnitten ermittelte Radonquellstärke in Trohe, Raum 1, DIF-Verfahren. In der untersten Spalte steht der Median über die jeweiligen Größen. ....	26
Tabelle 3: Übersicht über die an den jeweiligen Messabschnitten ermittelte Radonquellstärke in Trohe, Raum 2, DIF-Verfahren. In der untersten Spalte steht der Median über die jeweiligen Größen. ....	28
Tabelle 4: Ergebnisübersicht der gemessenen Zeitabschnitte des Messobjektes Trohe, Raum 1, VDI-Verfahren. In der untersten Spalte steht der Median über die jeweiligen Größen.....	33
Tabelle 5: Ergebnisübersicht der gemessenen Zeitabschnitte des Messobjektes Trohe, Raum 2, VDI-Verfahren. In der untersten Spalte steht der Median über die jeweiligen Größen.....	36
Tabelle 6: Übersicht der durchgeführten Messreihe mit dem BD-Verfahren. Eingestellte und berechnete Größen für Messobjekt Trohe, Raum 1. ....	39
Tabelle 7: Eingestellte und berechnete Größen für Messobjekt Trohe, Raum 1, BD-Verfahren.....	41
Tabelle 8: Eingestellte und berechnete Größen für Messobjekt Trohe, Raum 1, BD-Verfahren.....	42
Tabelle 8: Ergebnisübersicht der aus dem SAT-Verfahren ermittelten Radonquellstärken aus Abbaukurven. Messobjekt Trohe, Raum 1. Zur Veranschaulichung beinhalten die Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Abweichung der Werte an den einzelnen Messpunkten. In der untersten Zeile steht der Median über die jeweiligen Größen. ....	44
Tabelle 9: Ergebnisübersicht der aus dem SAT-Verfahren ermittelten Radonquellstärken aus Auf- und Abbaukurven. Messobjekt Trohe, Raum 2. Zur Veranschaulichung beinhalten die tabellierten Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Diskrepanz der Werte an den einzelnen Messpunkten. In den beiden untersten Zeilen stehen die Mediane über die Werte der Auf- bzw. Abbaukurven. ....	47
Tabelle 10: Berechnete Luftwechselraten bei verschiedenen Druckdifferenzen in Trohe, Raum 1, ermittelt mit den Verfahren VDI, SAT (CO <sub>2</sub> ) und BD .....	51
Tabelle 11: Vergleich der Ergebnisse aus VDI- und DIF-Verfahren anhand von Trohe, Raum 1, an den einzelnen Messabschnitten.....	53

# 1 Einleitung

Im Zusammenhang mit dem neuen Strahlenschutzgesetz (StrlSchG 2017), das in Bezug auf die Radonbestimmungen am 31.12.2018 in Kraft treten wird, werden umfangreiche neue Regelungen insbesondere in Bezug auf Maßnahmen zum Schutz vor Radon-Expositionen in Wohn- und Arbeitsräumen notwendig ("Radon-Maßnahmenplan"). Dieser Plan soll Maßnahmen zur Reduzierung langfristiger Risiken durch eine Radonexposition beinhalten. Ein zentraler Aspekt ist hierbei die erstmalige Einführung eines Referenzwertes von  $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  für die Radon-Aktivitätskonzentration (StrlSchG 2017). Die Aktivitätskonzentration von Radon-222 in Luft (angegeben in der Einheit  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) wird im Folgenden als „Radonkonzentration“ bezeichnet.

Der Umfang dieser Maßnahmen sowie deren Notwendigkeit und Durchführbarkeit ist abhängig von der Anzahl der betroffenen Wohnungen, in denen die Überschreitung des Referenzwerts erwartet wird. Für eine erste Beurteilung wurden bereits Erhebungsmessungen bezüglich der Radonkonzentration in der Bodenluft mit unterschiedlicher Flächendeckung durchgeführt (Kemski 2004). Allerdings sind Rückschlüsse von der Bodenluftkonzentration auf die Radonkonzentration in Innenräumen nur schwer möglich (Varley et al. 1998). Als Methode zur Beurteilung der Radonsituation im Gebäude eignen sich Langzeitmessungen in Wohnräumen mittels Kernspurdosimetern, die einen Überblick über die mittlere Radonkonzentration im Messobjekt liefern. In der Praxis stellen diese langen Messzeiträume ein Problem dar. Kurzzeitmessungen würden Abhilfe schaffen, jedoch unterliegen sie einer Reihe von Einflussfaktoren, deren komplexe Zusammenhänge eine korrekte Interpretation der Messergebnisse erschweren. Zu diesen Faktoren gehört beispielsweise die Nutzung des Gebäudes durch die Bewohner, da das Lüftungsverhalten die Radonkonzentration im Wohnraum maßgeblich beeinflusst (WHO 2009). Ein weiterer Faktor ist die Abhängigkeit der Radonkonzentration von der Jahreszeit bzw. allgemeinen metrologischen Parametern wie Temperatur und Luftdruck (Zhang et al. 2007).

Um die radiologische Situation des Gebäudes unabhängig von Bewohnern und Nutzern beurteilen zu können, wurde die Radonquellstärke (angegeben in der Einheit  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ ) als aussagekräftiger Parameter identifiziert (Neugebauer 2015). Diese ist, anders als die Radonkonzentration, unabhängig vom Lüftungsverhalten der Bewohner, kann aber weiterhin meteorologischen Parametern unterliegen. Da sich auch im vorangegangenen Projekt (Buermeyer 2017) keine Abhängigkeiten der Radonquellstärke von metrologischen Einflüssen isolieren ließen, erfolgt die Radon-Charakterisierung des Gebäudes anhand des Mittelwertes über diese Größe.

## 2 Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, das in den vorangegangenen Projekten etablierte kontinuierliche Tracergasverfahren (Neugebauer 2015) zur Bestimmung der Radonquellstärke mit anderen Verfahren zu vergleichen und hinsichtlich der Verfahrensgrenzen, Unsicherheiten und Praktikabilität zu untersuchen. Zum Vergleich werden das modifizierte Differenzdruckverfahren (BlowerDoor<sup>®</sup>, BlowerDoor, 2017) und die Berechnung der Radonquellstärke nach Belüftungsänderung durch Untersuchung der Aktivitäts-Aufbaukurve herangezogen. Zusätzlich wird die Bestimmung der Radonquellstärke mit Hilfe von Tracergasmessungen nach der VDI-Richtlinie 4300-7 (VDI 2001) zur Bestimmung der Luftwechselrate betrachtet.

Abschließend soll beurteilt werden, inwiefern und für welche Zwecke sich die verschiedenen Verfahren zur Ermittlung der Radonquellstärke eignen.

Der ursprüngliche Schwerpunkt des Projekts hat sich durch Zwischenergebnisse verschoben und der Rahmen der Arbeit wurde entsprechend erweitert. Die Ergebnisse der in der Leistungsbeschreibung genannten Arbeitspakete finden sich wie folgt in diesem Bericht wieder:

Die Ergebnisse des in Arbeitspaket 1 (Prüfung der Eignung eines modifizierten Differenzdruck-Messverfahrens (BlowerDoor<sup>®</sup>, BlowerDoor 2017) zur Ermittlung der Quellstärke eines Gebäudes; Beschreibung der Grenzen der Methode, Vergleich mit dem Tracergasverfahren) auf Grundlage der neuen Messdaten untersuchten Differenzdruck-Verfahrens findet sich in Abschnitt 4.3. Der Vergleich zu anderen Messmethoden erfolgt in Abschnitt 4.5.3.

Die Ergebnisse der Messkampagnen aus Arbeitspaket 2 (Durchführung einer Messkampagne; Akquisition von mehreren Messorten; jeweilige Messdauer ca. 4 Wochen für Luftwechselrate und Radonkonzentration, Durchführung der modifizierten Differenzdruck-Messverfahrens am Anfang und Ende eines Messeinsatzes) findet sich in Abschnitt 4.1 und 4.3 dieser Arbeit. Eine Beschreibung der Messorte und Messgeräte finden sich in Abschnitt 3.1 bzw. 3.2.

Die Grundlagen des vereinfachten Tracergasverfahrens, das in Arbeitspaket 3 (Erprobung des vereinfachten Verfahrens mittels der Daten der vorangegangenen Projekte sowie die der Messungen des vorliegenden Projekts; Ermittlung der Grenzen des Verfahrens; Verifizierung mittels der Ergebnisse des modifizierten Differenzdruck-Messverfahrens) untersucht werden soll, finden sich in Abschnitt 3.3.1. Die Grenzen des Verfahrens sowie der Vergleich mit den Ergebnissen des Differenzdruck-Messverfahrens, findet sich in Abschnitt 4.2, 4.3 und 4.5 dieser Arbeit.

Die im Rahmen von Arbeitspakete 4 (Anpassung der zuvor erarbeiteten Dokumentations- und Auswerteroutinen zur systematischen Darstellung und Verarbeitung von Messdaten und Ergebnissen an das vereinfachte, praktikable Verfahren zur Ermittlung der Quellstärke eines Gebäudes) überarbeitete Auswerteroutine wird in Abschnitt 3.3.5 vorgestellt.

Im Rahmen dieses Projektes wurde außerdem eine Bachelorarbeit am Fachbereich Life Science Engineering der Technischen Hochschule Mittelhessen angefertigt (Ngwa 2018). Abbildungen und Textpassagen dieses Berichts finden sich auch in diesem Abschlussbericht wieder.

### 3 Messmethodik

In diesem Kapitel werden die Messobjekte, die im Rahmen des Projekts untersucht wurden, die technische Ausrüstung zur Durchführung der Messungen sowie die vier angewandten Verfahren zur Bestimmung der Radonquellstärke beschrieben.

#### 3.1 Messobjekte

Als Messobjekte dienten zwei Kellergeschosse unterschiedlicher Wohnhäuser im Kreis Gießen, Hessen. Messobjekt „Trohe“ ist ein Gebäude im Ortsteil Trohe der Gemeinde Buseck. Die Messungen fanden über einen Zeitraum von vier Monaten abwechselnd in zwei baugleichen Kellerräumen (Raum 1 und Raum 2) mit je einem Raumvolumen von  $18 \text{ m}^3$  statt. Abbildung 1 zeigt den Grundriss der beiden Kellerräume. Die Kellerräume besitzen zwei Fenster, welche für die Messungen luftdicht verschlossen wurden. Damit stellten die Türöffnungen die einzige Raumöffnung dar, durch die ein Luftwechsel stattfinden konnte. Die Türöffnung verbindet den Raum mit dem Kellerflur.

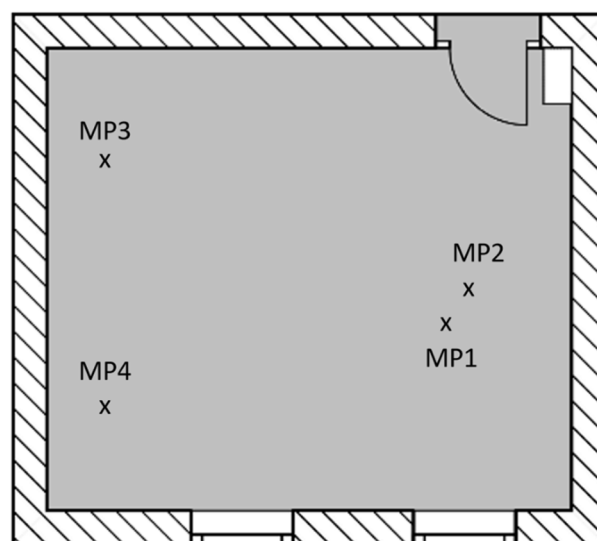


Abbildung 1: Grundriss der beiden baugleichen Kellerräume im Messobjekt Trohe. Das Gesamtvolumen beträgt  $18 \text{ m}^3$ . Die Abkürzung MP steht für Messpunkt und kennzeichnet die Stellen, an denen Messgeräte des Tracergasverfahrens aufgestellt waren. Eine Ausnahme bildete MP2, an dem sich kein Radonmessgerät befand.

Das zweite Messobjekt, „Allendorf“, wurde bereits im Vorgängerprojekt charakterisiert. Es handelt sich hierbei um den Keller eines Wohnhauses in Allendorf, einem Stadtteil von Gießen. Hier wurde im Rahmen dieses Projekts eine Nachmessung über die Dauer von einem Tag durchgeführt. Zusätzlich wurden Messdaten, die im Rahmen vorheriger Messkampagnen gewonnen wurden, ausgewertet. Das Rauminnen des Objektes beträgt  $28 \text{ m}^3$ . Im Gegensatz zum Messobjekt "Trohe" ließen sich die beiden Fenster der Messobjekte (Abbildung 2) nicht verschließen, sodass dort eine hohe Luftwechselrate vorherrschte. Die Tür verbindet den Kellerraum mit dem Hausflur.

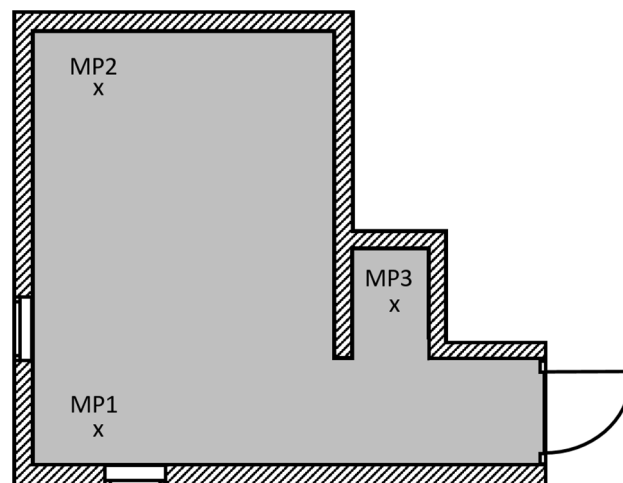


Abbildung 2: Grundriss des Messobjektes Allendorf. Das Gesamtvolumen beträgt  $28 \text{ m}^3$ . Die Abkürzung „MP“ steht für Messpunkt und kennzeichnet die Stellen, an denen Messgeräte des Tracergasverfahrens aufgestellt waren.

### 3.2 Technische Ausrüstung

Im Rahmen der Messkampagnen wurden folgende Arbeits- und Messgeräte verwendet:

- Radonkonzentration: Saphymo AlphaGUARD
- CO<sub>2</sub>-Einspeisung: Bronkhorst el-Flow Durchflussregler
- CO<sub>2</sub>-Konzentration: Wöhler CDL 210
- Differenzdruck: BlowerDoor<sup>®</sup> Messgerät ProTherm INFILTEC E-3

Dabei kamen insgesamt bis zu drei AlphaGUARD\_Geräte zur Ermittlung der Radonkonzentration und bis zu vier Wöhler-Geräte CDL 210 zur Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration zum Einsatz. Die Positionen der Messgeräte werden im Folgenden als Messpunkte (MP) bezeichnet. Diese sind in Abbildung 1 für das Tracergasverfahren gekennzeichnet.

Um die CO<sub>2</sub>-Einspeisung zu homogenisieren, wurde der Durchflussregler mit mehreren Schläuchen verbunden. Diese wurden im Raum verteilt, sodass die Einspeisung dezentral an mehreren Stellen gleichzeitig stattfand.

### 3.3 Messverfahren

Die im Rahmen dieses Projekts untersuchten Verfahren unterscheiden sich in erster Linie durch die Bestimmung der Luftwechselrate. Dies gibt an, wie oft die Raumlufte innerhalb einer Stunde ausgetauscht wird. Die Berechnung der Radonquellstärke aus der Radonkonzentration erfolgt im Anschluss über Formeln, die sich bei drei der vier untersuchten Verfahren nur im Detail unterscheiden. Das Sättigungsverfahren stellt eine Ausnahme dar, da sich die Formel zur Berechnung der Radonquellstärke stark von denen der anderen Verfahren unterscheidet.

Der Begriff „Sättigung“, der im Folgenden verwendet wird, bezeichnet das Gleichgewicht zwischen zu- und abströmender, radon- oder CO<sub>2</sub>-haltiger Luft, das sich nach einer Zustandsänderung (Belüftung) einstellt.

Der Begriff „Normalzustand“ bezeichnet im Folgenden die Druckdifferenz, die sich bei normaler Nutzung des Raums als Wohnraum und ohne zusätzlichen Ventilator einstellt.

Die in Abschnitt 3.3.1 und 3.3.2 beschriebenen Verfahren basieren auf dem kontinuierlichen Tracer-gasverfahren. Dabei wird die Radonquellstärke über den Zusammenhang zur Luftwechselrate und Radonkonzentration ermittelt. Die Bestimmung der Luftwechselrate erfolgt mittels der Konstant-Injektionsmethode mit dem Tracer-gas CO<sub>2</sub> nach ISO 12569:2012 (VDI 2013). Die konstante Injektion wurde mithilfe eines digitalen thermischen Massendurchflussmessers und -reglers realisiert.

#### 3.3.1 Berechnung der Quellstärke nach vereinfachter Differenzgleichung (DIF-Verfahren)

Im vorangegangenen Projekt (Buermeyer 2017) wurde die Radonquellstärke  $Q(n)$  mit folgender Gleichung berechnet:

$$Q(n) = \frac{c_{Rn}(n-1) \cdot (k(n) + \lambda) + c_{Rn}(n) \cdot (k(n) + \lambda) \cdot e^{(k(n) + \lambda) \cdot \Delta t \cdot n} - c_{Rn,a}(n) \cdot k(n) \cdot (e^{(k(n) + \lambda) \cdot \Delta t \cdot n} - 1)}{e^{(k(n) + \lambda) \cdot \Delta t \cdot n} - 1} \quad (1)$$

Zur Berechnung werden die Luftwechselrate  $k$ , die Radonkonzentration im Innenraum  $c_{Rn}$  und die Radonaußenluftkonzentration  $c_{Rn,a}$  im Messintervall zwischen  $\Delta t \cdot n$  und  $\Delta t \cdot (n + 1)$  ermittelt. Der Parameter  $n$  ist der Laufindex des jeweiligen betrachteten Zeitintervalls. Der Parameter  $\lambda$  ist die Zerfallskonstante von Rn<sup>222</sup> mit  $\lambda = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . Unter der Randbedingung, dass die Quellstärke zu einem Zeitpunkt für große  $n$  berechnet wird, wenn sich ein Konzentrations-Gleichgewicht eingestellt hat und damit

$$e^{-(\lambda + k(n)) \cdot \Delta t \cdot n} = 0$$

sowie dem Umstand, dass die Zerfallskonstante  $\lambda$  gegenüber der Luftwechselrate  $k$  vernachlässigbar klein ist, konnte Gleichung 1 zur Ermittlung der Quellstärke vereinfacht werden zu

$$Q(n) = (c_{Rn}(n-1) - c_{Rn,a}(n)) \cdot k(n) \quad (2)$$

Im Rahmen des vorangegangenen Projekts (Buermeyer 2017) wurden die gemessenen Daten in einem zweiten Durchgang mit der vereinfachten Formel, Gleichung 2, ausgewertet. Im Vergleich zu der mit Gleichung 1 berechneten Quellstärke zeigte sich, dass das Rauschen der Quellstärke durch die Betrachtung des Gleichgewichtszustandes deutlich abgenommen hatte. Beide berechneten Quellstärken wurden im Folgenden geglättet. Ein Vergleich der so erhaltenen Verläufe demonstrierte, dass beide Berechnungsverfahren vergleichbare Ergebnisse liefern und die Quellstärkenberechnung mit der vereinfachten Beziehung, Gleichung 2, erfolgen kann (Buermeyer 2017).

### 3.3.1.1 Berechnung der Luftwechselrate

Wird CO<sub>2</sub>-Gas mit einer konstanten Rate  $q$  einem Raum mit dem Volumen  $V$  zugeführt, so ist dessen zeitlicher Konzentrationsverlauf lediglich von der Luftwechselrate  $k$  abhängig nach

$$k = \frac{\frac{c(n+1) - c(n) - q}{\Delta t} V}{c_a(n) - c(n)} \quad (3)$$

Durch diese Methode kann bei bekannter Injektionsrate, Raumvolumen und Konzentration des Tracergases innen  $c(n)$  und außen  $c_a(n)$  die Luftwechselrate im Raum gemessen werden. Mittels  $\Delta t$  wird der zeitliche Abstand zwischen den beiden gemessenen Konzentrationswerten miteinbezogen.

### 3.3.1.2 Vereinfachung der Berechnung nach Differenzgleichung

In der Praxis bedeutet jede Messung nicht nur einen Mehraufwand an Aufstellung der Geräte und Datenverarbeitung, sondern hat auch einen finanziellen Aspekt, da gegebenenfalls mehr Messgeräte angeschafft werden müssen. Ein Bestandteil dieses Projekts war deswegen die Prüfung des Messverfahrens hinsichtlich der Möglichkeit für Vereinfachungen und Reduzierung des Messaufwands.

Die vereinfachte Formel zur Berechnung der Radonquellstärke, Gleichung 2, beinhaltet neben der Luftwechselrate und der Radonkonzentration auch die Radonaußenkonzentration zum Messzeitpunkt. Diese wurde kontinuierlich mitgemessen und floss in die Berechnung ein.

Der Ursprung der zuströmenden Luft (bodennahe Luft oder höher) lässt sich nicht mit Sicherheit bestimmen. Die Radonkonzentration in bodennaher Luft schwankt in Deutschland im Jahresmittel zwischen ca. 3 bis 40 Bq·m<sup>-3</sup>, wobei der Mittelwert über alle Gebiete bei 9 Bq·m<sup>-3</sup> liegt. Nach Gleichung 2 zur Bestimmung der Radonquellstärke ist das Verhältnis zwischen Radon-Innenraumkonzentration und Außenluftkonzentration maßgeblich dafür, ob die Außenluftkonzentration einen Einfluss auf das



Ergebnis hat. Kritische Werte der Radoninnenluftkonzentration liegen mehr als einen Faktor 20 oberhalb des Mittelwertes. Die durch Einsetzen des Mittelwertes statt eines kontinuierlich gemessenen Wertes erzeugte Unsicherheit liegt weit unterhalb der statistischen und meteorologisch bedingten Schwankung der Quellstärke. Der zusätzliche Messaufwand zur zeitgleichen Ermittlung der Radon-Außenluftkonzentration ist bei diesen Verhältnissen unverhältnismäßig. Ersetzt man in Gleichung 2 den kontinuierlichen Messwert  $c_{Rn,a}(n)$  durch die mittlere Konzentration von  $c_{Rn,a}$ , so erhält man:

$$Q(n) = (c_{Rn}(n-1) - c_{Rn,a}) \cdot k(n) \quad (4)$$

In Bezug auf die Luftwechselrate, Gleichung 3, wird mit dem gleichen Argument die kontinuierlich mitgemessene CO<sub>2</sub>-Außenluftkonzentration durch einen Mittelwert ersetzt. Auch hier liegen die im Innenraum erzeugten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen deutlich oberhalb der Außenluftkonzentration, weshalb auch hier der Verlauf der kontinuierlich gemessenen Konzentration in der Unsicherheit der errechneten Luftwechselrate vernachlässigbar ist. Es ergibt sich durch Einsetzen einer Konstanten  $c_a$  für die CO<sub>2</sub>-Außenluftkonzentration in Gleichung 3 die vereinfachte Berechnung der Luftwechselrate

$$k = \frac{\frac{c(n+1) - c(n)}{\Delta t} - \frac{q}{V}}{c_a - c(n)} \quad (5)$$

Eine Berechnung der Quellstärke nach Gleichung 4 und 5 wird im Folgenden als DIF-Verfahren bezeichnet.

### 3.3.1.3 Unsicherheitsbetrachtung

Die Berechnung der Unsicherheiten der Quellstärke erfolgt nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung aus den Unsicherheiten bei der Ermittlung der CO<sub>2</sub>- und der Radonkonzentration.

Für die CO<sub>2</sub>-Messung beträgt die Unsicherheit nach Geräteherstellerangabe 51 ppm + 5% des Anzeigewerts. Die relative Unsicherheit der aus den CO<sub>2</sub>-Werten berechneten Luftwechselrate entspricht der relativen Unsicherheit der CO<sub>2</sub>-Messung.

Für die Radonkonzentrationswerte wird die systematische Unsicherheit von 7% des Anzeigewerts berücksichtigt.

Die relative Unsicherheit der berechneten Quellstärke wird aus der Summe der relativen Unsicherheiten von CO<sub>2</sub>-Konzentration und Radon-Aktivitätskonzentration errechnet. Unsicherheiten aus den Werten für Raumvolumen, Homogenität der CO<sub>2</sub>- und Radonverteilung im Raum sowie der Injektionsrate bleiben unberücksichtigt.

Die statistischen Unsicherheiten lassen sich aufgrund der Mittelung über mehrere Stunden vernachlässigen.

### 3.3.2 Vereinfachte Berechnung der Quellstärke nach VDI-Richtlinie (VDI-Verfahren)

Das VDI-Verfahren basiert auf der Berechnung der Luftwechselrate nach VDI-Richtlinie 4300-7 (VDI 2001) und der anschließenden Quellstärkenberechnung.

#### 3.3.2.1 Berechnungsmethode

Die Radonquellstärke wird nach

$$Q_i = k_i(c_{Rn,i} - c_{Rn,a}) \quad (6)$$

ermittelt, wobei hier für die Radonkonzentration  $c_{Rn}$  und der Luftwechselrate  $k$  Medianwerte der Zeitabschnitte  $i$  eingesetzt werden. Die Berechnung der Luftwechselrate wird nach VDI-Richtlinie (VDI 2001) gemäß

$$k(n) = \frac{q(n)}{c(n)} \cdot \frac{1}{V} \quad (7)$$

durchgeführt. Hierbei ist  $q$  die Injektionsrate des Tracergases,  $V$  das Raumvolumen und  $c(n)$  die  $\text{CO}_2$ -Konzentration. Für jedes Wertepaar der Messzeitintervalle  $n$  wird die Luftwechselrate einzeln berechnet, um letztendlich auch hier über den gesamten Zeitabschnitt  $i$  den Median  $k_i$  zum Einsetzen in Gleichung 6 zu bestimmen.

#### 3.3.2.2 Unsicherheitsbetrachtung

Die Berechnung der Unsicherheiten der Quellstärke erfolgt nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung und mit den systematischen Unsicherheiten der Einzelmessungen, wie es schon in Abschnitt 3.3.1.3 beschrieben wurde.

### 3.3.3 Das modifizierte Differenzdruckverfahren (BD-Verfahren)

Das modifizierte Differenzdruckverfahren, im Folgenden "BD-Verfahren" genannt, beruht auf einer Abwandlung des BlowerDoor<sup>®</sup> Verfahrens (BlowerDoor 2017) zur Messung von Gebäudedichtheiten (DIN 2001).

#### 3.3.3.1 Das BlowerDoor<sup>®</sup>-Verfahren zur Bestimmung der Gebäudedichtheit

Um das Tracergasverfahren zu verifizieren, werden Messungen mit dem Differenzdruckverfahren BlowerDoor<sup>®</sup> (BlowerDoor 2017) durchgeführt. Dieses Verfahren wird üblicherweise verwendet, um die Luftdichtheit eines Gebäudes zu charakterisieren. Abbildung 3 Schematische Darstellung des BlowerDoor<sup>®</sup> Verfahrens zur Charakterisierung von Gebäuden hinsichtlich ihrer Luftdichtheit, bearbeitet nach zeigt den prinzipiellen Messaufbau einer solchen Messung.

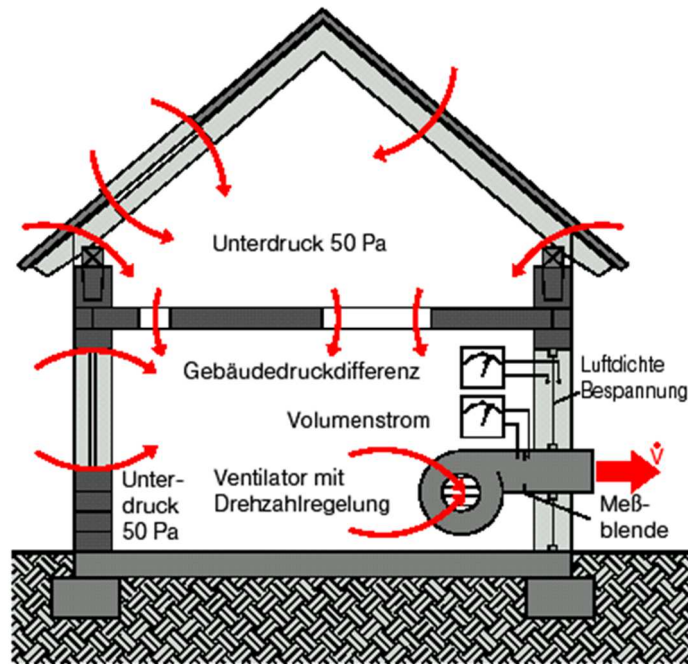


Abbildung 3: Schematische Darstellung des BlowerDoor® Verfahrens zur Charakterisierung von Gebäuden hinsichtlich ihrer Luftdichtigkeit, bearbeitet nach (Schwekendiek 2018).

Um eine BlowerDoor® Messung zur Bestimmung der Luftdichtigkeit durchzuführen ist eine Druckdifferenz von 50 Pa zwischen Innenraum und Umgebung vorgesehen, welche mit einem Ventilator und einem Druckmessgerät realisiert wird (BlowerDoor 2017). Durch diese Druckdifferenz und der daraus resultierenden Luftwechselrate ( $n_{50}$ -Wert) kann die Luftdichtigkeit eines Gebäudes beurteilt werden. Die allgemeine Formel zur Bestimmung der Luftwechselrate  $k$  mit dem BlowerDoor®-Verfahren lautet:

$$k(n) = \frac{\dot{V}}{V} \quad (8)$$

Dabei steht  $\dot{V}$  für den Volumenstrom und  $V$  steht für das Raumvolumen.

### 3.3.3.2 Modifizierung des Differenzdruckverfahrens

Um das BlowerDoor®-Verfahren (BlowerDoor 2017) zur Bestimmung der Radonquellstärke zu verwenden, muss es leicht modifiziert werden. Üblicherweise wird das BlowerDoor®-Messgerät in Haustüren eingebaut, um eine Druckdifferenz zwischen Gebäudeinnern und Umgebung herzustellen. Im Rahmen dieses Projekts sollten jedoch einzelne Innenräume untersucht werden. Dazu wurde das Messgerät in den Rahmen der Innenraumtür eingebaut (siehe Abbildung 4). Darüber hinaus wird zusätzlich zum üblichen BlowerDoor®-Messaufbau ein Radonmessgerät eingesetzt, das die Radonkonzentration der Fortluft erfasst. Aus der Sättigungskonzentration des Radons und der Luftwechselrate kann die Radonquellstärke berechnet werden (Azzam Jai 2012):

$$Q = c_{Rn}(\infty) * k \quad (9)$$

Dabei ist  $c_{Rn}(\infty)$  die Radon-Sättigungskonzentration und  $k$  steht für die Luftwechselrate. Diese wird nach Gleichung 8 anhand des gemessenen Volumenstroms und des Raumvolumens bestimmt.

Im Gegensatz zur üblichen BlowerDoor<sup>®</sup>-Messung (BlowerDoor 2017) wird nicht nur eine einzelne Druckdifferenz von 50 Pa betrachtet, sondern verschiedene Druckstufen im Bereich von 7 bis 60 Pa eingestellt. Es wird von einer linearen Beziehung zwischen der eingestellten Druckstufe und der daraus resultierenden Radonquellstärke ausgegangen (Collignan et al. 2014). Dieser Zusammenhang erlaubt eine Ermittlung der Radonquellstärke unter Normalbedingungen ohne künstlich erzeugte Druckdifferenz durch lineare Extrapolation zu einer Druckdifferenz bei Null durchgeführt.

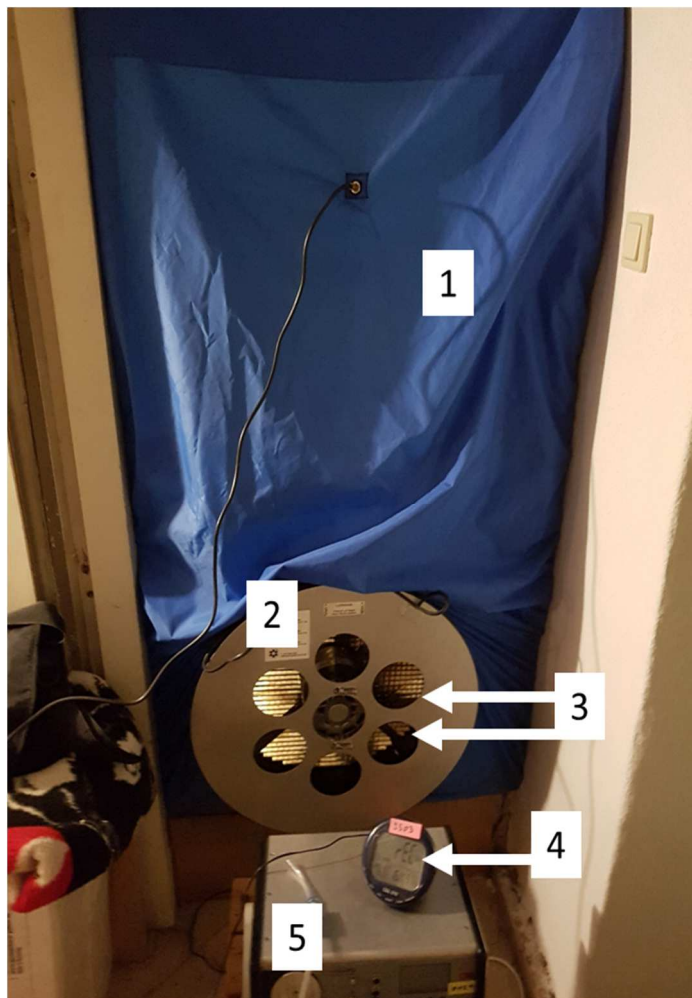


Abbildung 4: Aufgebautes Equipment des modifizierten BlowerDoor<sup>®</sup> Verfahrens, Ansicht aus dem zu messenden Innenraum. Die Türöffnung wird mit einer Folie (1) bis auf die Öffnung für den Ventilator (2) abgedichtet. Je nach gewünschter Druckstufe werden unterschiedlich viele Öffnungen (3) am Gerät abgedeckt. Das CO<sub>2</sub>-Messgerät (4) und das Radonmessgerät (5) werden beim BD-Verfahren dicht am Ventilator platziert, damit die Konzentrationen im Luftstrom der abgesaugten Luft gemessen werden können.

### 3.3.3.3 Unsicherheitsbetrachtung

Die Unsicherheitsbetrachtung wird durch Fehlerfortpflanzung aus den Unsicherheiten der Größen Volumenstrom, Raumvolumen sowie Radonkonzentration berechnet. Bei der Bestimmung des Volumenstroms ist die Unsicherheit des Ablesewerts von der Skala abhängig und variiert mit der Größe des Volumenstroms. Die Unsicherheit der Radonkonzentrationswerte wird für jeden Messwert vom Messgerät geliefert. So wird die Unsicherheit für die Quellstärke bei jede Druckstufe zunächst einzeln bestimmt. Die relativen Unsicherheiten der Messpunkte wurde gemittelt und der Mittelwert als relative Unsicherheit für die Quellstärke bei Null verwendet.

### 3.3.4 Berechnung anhand von Sättigungskurven (SAT-Verfahren)

Bei diesem Verfahren wird die Radonquellstärke mittels „Sättigungskurven“ der Radonkonzentrationen ermittelt. Im Folgenden wird dieses Verfahren als SAT-Verfahren bezeichnet.

#### 3.3.4.1 Ermittlung von Luftwechselrate und Radonquellstärke

Dazu wird zunächst eine Änderung der Luftwechselrate im zu untersuchenden Raum erzeugt. Dies geschieht entweder durch das Öffnen bzw. Schließen der Tür oder der Fenster oder mittels des BlowerDoor<sup>®</sup>-Messgeräts. Daraus resultiert ein exponentieller Anstieg bzw. Abfall der Radonkonzentration. Nach einer gewissen Zeit nähert sich die Radonkonzentration asymptotisch einem Wert (Sättigungskonzentration) an. Dieser Verlauf wird mit folgender Funktion beschrieben:

$$c_{Rn}(t) = e^{-\frac{t}{\tau}}(c_{Rn}(0) - c_{Rn}(\infty)) + c_{Rn}(\infty) \quad (10)$$

Dabei ist  $c_{Rn}(\infty)$  die Sättigungskonzentration,  $\tau$  die Zeitkonstante des Anstiegs bzw. Abfalls,  $c_{Rn}(0)$  die Radonkonzentration zum Zeitpunkt  $t = 0$  und  $c_{Rn}(t)$  die Radonkonzentration zu einem beliebigen Zeitpunkt  $t$ .

Die Zeitkonstante  $\tau$  ist ein Maß für die zeitliche Änderung der Radonkonzentration und ein wichtiger Parameter zur Bestimmung der Luftwechselrate. Sie lässt sich über die folgende Beziehung bestimmen:

$$\tau = \frac{1}{\lambda + k} \Rightarrow k = \frac{1}{\tau} - \lambda \quad (11)$$

Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Bestimmung der Luftwechselrate anhand einer Aufbaukurve der Sättigung. Die Radonquellstärke für den gezeigten Messabschnitt berechnet sich aus der Sättigungskonzentration gemäß:

$$Q = (c_{Rn}(\infty) - c_{Rn,a})k = (c_{Rn}(\infty) - c_{Rn,a}) \cdot \left(\frac{1}{\tau} - \lambda\right) \quad (12)$$

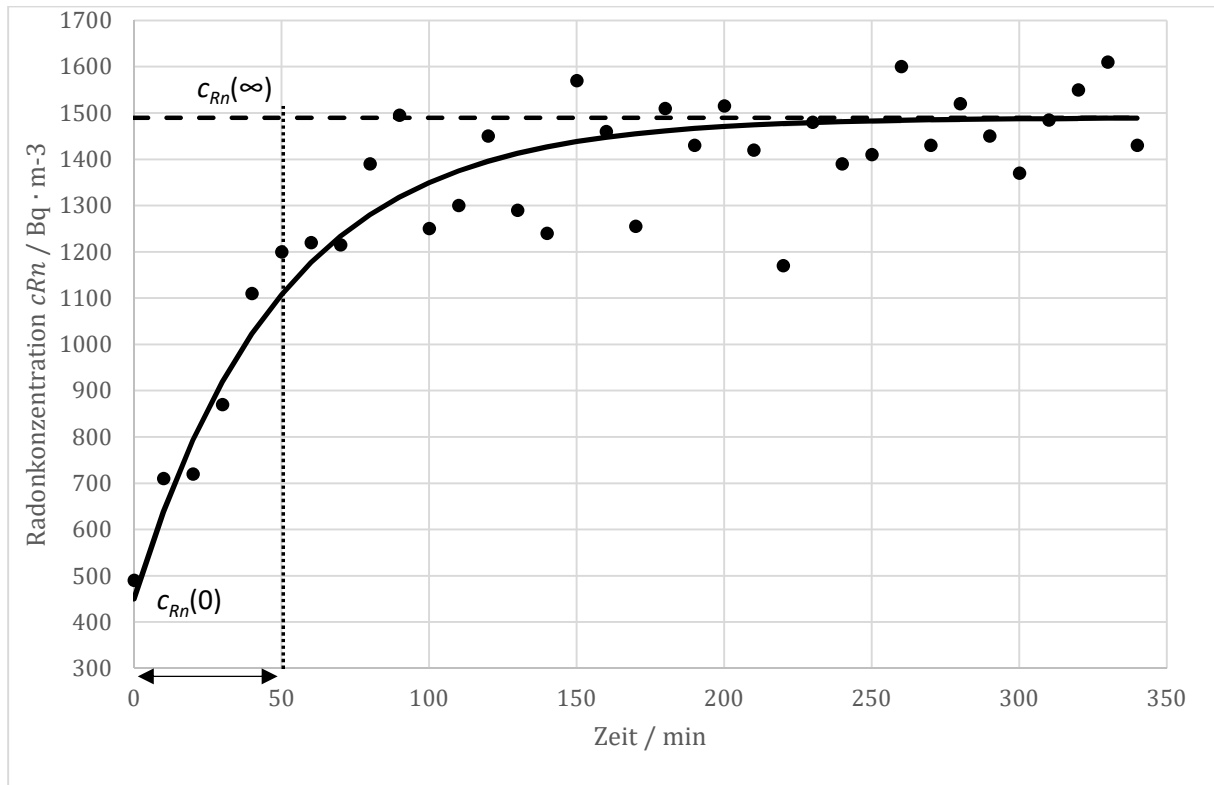


Abbildung 5: Darstellung zur Bestimmung der Luftwechselrate anhand einer Sättigungskurve (Aufbaukurve). Dargestellt sind die gemessene Radonkonzentration (Kreise), die nach Gleichung 10 ermittelte Ausgleichskurve (schwarze, durchgezogene Linie), die Sättigungskonzentration  $c_{Rn}(\infty)$  (gestrichelte Linie), sowie die Zeitkonstante  $\tau$  des Anstiegs (Pfeil und gepunktete Linie).

### 3.3.4.2 Unsicherheitsbetrachtung

Die Unsicherheit der Luftwechselrate ergibt sich aus den relativen Unsicherheiten der Zeitkonstanten  $\tau$ , der Außenkonzentration  $c_{Rn,a}$  und der Sättigungskonzentration  $c_{Rn}(\infty)$ . Die relative Unsicherheit in der Zeitkonstante entspricht der relativen Unsicherheit der Luftwechselrate. Die Gesamtunsicherheit eines einzelnen Messpunktes zu einem Messabschnitt wird mit der Methode der Fehlerfortpflanzung bestimmt. Zur Veranschaulichung werden die Mittelwerte der Ergebnisse an den Messpunkten zu den jeweiligen Messabschnitten angegeben. Die Unsicherheit dieses Mittelwertes ist die Summe der nach der Methode der Fehlerfortpflanzung berechneten statistischen Unsicherheit und der Differenz zwischen den Werten der Mittelwert.

Aus den berechneten Quellstärken der einzelnen Messabschnitte wird der statistische Median über die Quellstärken und Unsicherheiten gebildet. Der Median ist im Vergleich zum Mittelwert robuster gegen unsymmetrische Verteilungen und damit für die vorliegenden Daten der Wert mit der größeren Aussage.

### 3.3.5 Datenverarbeitung mit der Statistiksoftware R Project

Die Statistiksoftware R ist eine quelloffene Programmiersprache bzw. Entwicklungsumgebung für statistische Berechnungen und deren graphische Darstellung. Sie findet zunehmend Verwendung in Wissenschaft und Forschung.

Im Rahmen des vorangegangenen Projekts (Buermeyer 2017) wurden erste Funktionen zur Berechnung und statistischen Analyse der Radonquellstärke in Gebäuden erstellt. Diese Funktionen sollten im Rahmen dieses Projekts angepasst und weiterentwickelt werden.

#### 3.3.5.1 Ausgangslage der Datenverarbeitung

Im Rahmen des vorangegangenen Projekts (Buermeyer 2017) wurde bereits eine kompakte Datenaufbereitung auf Grundlage von Excel und der Statistiksoftware R (R Development 2011) erarbeitet. Aufgrund der unterschiedlichen Datenformate der verschiedenen Messgeräte musste im ersten Schritt eine Datenaufbereitung zur Vereinheitlichung der Messzeiten und Messreihenlänge in Microsoft Excel erfolgen. Erst im zweiten Schritt wurden die zusammengefassten Daten zur weiteren Auswertung und letztendlich Berechnung der Radonquellstärke in R importiert. Die Darstellung von Abbildungen und Diagrammen erfolgt ebenfalls mittels R.

#### 3.3.5.2 Überarbeitete und angepasste Datenverarbeitung

Im Rahmen dieses Projekts wurde die Auswerteroutine in R, die in Buermeyer (2017) entwickelt wurde, an die neuen Fragestellungen angepasst und ergänzt.

Zunächst wurde eine neue Funktion zur einmaligen Konvertierung des Datumsformates eingeführt, welche die alte Routine, in der für jede Messgröße eine eigene Konvertierung des zugehörigen Zeitstempels erfolgen musste, ersetzt.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden, anders als in Buermeyer (2017), viele kleine Messabschnitte betrachtet, um die Grenzen des Tracergas-Verfahrens zu ermitteln. Dazu werden zunächst in einer separaten Excel-Tabelle alle Teilabschnitte definiert, die betrachtet werden sollen. Nach dem Einlesen dieser Abschnitte berechnet die Auswerteroutine in R alle erforderlichen Größen und schreibt diese in eine neue Excel-Datei.

Darüber hinaus mussten neue Funktionen zur Auswertung des BD- und des SAT-Verfahrens geschrieben werden. Dies beinhaltet unter anderem Funktionen zur Luftwechselraten- und Quellstärkeberechnung und eine Funktion für die statistische Betrachtung der Unsicherheiten des BD-Verfahrens.

Des Weiteren wurde die Funktion an die Vereinfachungen, die in Abschnitt 3.3.1.2 beschrieben werden, angepasst.

Im Folgenden werden alle neu geschriebenen Funktionen zur Datenauswertung aufgelistet und mit einer Kurzbeschreibung erläutert. Alle Funktionen sind im Anhang (CD-ROM) als R-Skript im Detail dokumentiert.

1. `getData()`

Globale Konvertierung des Datumsformates für jede Variable. Das Datum und die Uhrzeit aus der ersten Spalte der Excel-Datei werden hier einmalig übergeben und in das POSIX-Format umgewandelt.

2. `sstrength_DIF()`

Berechnung der Radonquellstärke nach vereinfachter Differenzgleichung (Gleichung 4 und 5)

3. `airxchange_BD()`

Berechnung der Luftwechselrate nach Durchführung des Differenzdruckverfahrens (Gleichung 8)

4. `sstrength_BD()`

Berechnung der Radonquellstärke nach Durchführung des Differenzdruckverfahrens (Gleichung 9)

5. `error_propagation_BD()`

Bestimmung der Gesamtunsicherheit des Differenzdruckverfahrens mit der Methode der Fehlerfortpflanzung.

6. `exp_fit_SAT()`

Funktion zur Berechnung der Radonquellstärke nach Belüftungsänderung (Gleichung 10, 11, 12)

## 4 Anwendung und Vergleich der Verfahren

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Messungen in den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Messobjekten mit den unter Abschnitt 3.3 beschriebenen Verfahren vorgestellt und analysiert. In Abschnitt 4.5 erfolgt ein abschließender Vergleich der vier Verfahren.

Die Messungen wurden im Zeitraum zwischen November 2017 und Mai 2018 in den beiden beschriebenen Objekten durchgeführt. Zusätzlich wurden Messdaten aus November und Dezember 2017 neu ausgewertet. Es ist bekannt, dass die Radonkonzentration im Gebäude in den Wintermonaten in erster Linie durch den Kamineffekt und durch verändertes Lüftungsverhalten der Bewohner größer ist, als in den Sommermonaten (KSR 2005). Dieser Umstand wird jedoch in erster Linie dem Luftwechsel zugeschrieben und es wird davon ausgegangen, dass die Quellstärke sich dabei kaum verändert. Sollte es durch den Kamineffekt zu einem leichten Anstieg der Quellstärke durch Ansaugen von radonhaltiger Bodenluft kommen, führt das dazu, dass die im Rahmen dieses Projekts ermittelten Quellstärken die mittlere Quellstärke und damit die Radonkonzentration überschätzen.



Bei der Ermittlung der Radonquellstärke geht es darum, in Bezug auf erhöhte Radonkonzentrationen potentiell kritische Objekte zu identifizieren. Eine Überschätzung der Quellstärke kann nicht dazu führen, dass ein Objekt fälschlicherweise als unbedenklich charakterisiert wird.

Die Messwerte für Radonkonzentration und CO<sub>2</sub>-Konzentration wurden in Intervallen von 10 Minuten aufgezeichnet. Das BlowerDoor<sup>®</sup>-Messgerät verfügt über eine analoge Anzeige, die zu Beginn einer Messung abgelesen wurde und deren Anzeigewert sich im Verlauf der Messung nicht änderte.

Wie mit den Datensätzen der einzelnen Messpunkte (siehe Abschnitt 3.1) verfahren wurde, lässt sich den folgenden Unterkapiteln entnehmen. Allerdings konnten nicht immer an jedem Messpunkt Daten gewonnen werden. Aus technischen Gründen stehen für manche Messreihen auch nur zwei oder nur ein Messpunkt zur Verfügung.

In Messobjekt "Trohe" wurde abwechselnd in beiden Räumen gemessen. Im Zuge der Messungen wurde die Belüftungssituation in den Messobjekten und Räumen aktiv durch Öffnen und Schließen der Raumtür oder der Fenster oder durch Anwendung des BlowerDoor<sup>®</sup>-Verfahrens verändert. Während das in Abschnitt 3.3.4 beschriebene SAT-Verfahren sich auf die sich verändernde Radonkonzentration anwenden lässt, wird beim DIF-Verfahren und beim VDI-Verfahren gewartet, bis sich die Konzentration wieder einem Sättigungswert angenähert hat. Dies hat zum einen zur Folge, dass sich die Messungen in einzelne Zeitabschnitte von einigen Stunden bis einigen Tagen unterteilt. In den folgenden Kapiteln werden diese Zeitabschnitte durchnummeriert. Die Messabschnitte sind für das Messobjekt "Trohe" in Tabelle 1 aufgelistet. Allerdings liefern nicht alle der vier Verfahren zeitliche Quellstärkeverläufe, die miteinander vergleichbar sind. Während die diskreten Werte, die mit dem SAT-Verfahren ermittelt werden, einen zeitlichen Versatz von wenigen Stunden zu den mit DIF- und VDI-Verfahren ermittelten Quellstärken haben, wurde das BD-Verfahren nur an wenigen Tagen in jedem Messobjekt durchgeführt. Die aus den Auf- und Abbaukurven ermittelten Luftwechselraten beim SAT-Verfahren beziehen sich immer auf den neuen Zustand nach Belüftungsänderung und werden, wo immer das möglich war, entsprechend mit den Ergebnissen der zeitlich folgenden Messabschnitte des DIF- und VDI-Verfahrens verglichen. In Tabelle 1 sind die einzelnen Zeitabschnitte benannt und die jeweils angewandten Verfahren aufgelistet.

Das BD-Verfahren wird nur im Zusammenhang mit dem Einsatz des BlowerDoor<sup>®</sup>-Messgeräts durchgeführt. Durch die Herstellung eines Unterdrucks wird die Radonquellstärke verändert (siehe dazu Abschnitt 4.3). Während des Betriebs des BlowerDoor<sup>®</sup>-Messgeräts konnten deswegen keine Quellstärkebestimmungen mit den anderen Verfahren durchgeführt werden.

*Tabelle 1: Belüftungssituation und zugehörige Messzeiten der einzelnen Messintervalle in Messobjekt "Trohe". Die Messzeiten und der Zustand der Tür beziehen sich auf den Gleichgewichtszustand, auf den das DIF- und das VDI-Verfahren angewandt wurde. Auf welche Art von Sättigungskurve das SAT-Verfahren vor Herstellung des Gleichgewichtszustandes angewandt wurde, ist aus Spalte „Kurvenart“ abzulesen.*

Raum 1				Raum 2			
Nr.	Tür	Kurvenart	Verfahren	Nr.	Tür	Kurvenart	Verfahren
1	zu	-	DIF, VDI	101	zu	Aufbau	DIF, VDI, SAT
2	offen	-	DIF, VDI	102	offen	Abbau	DIF, VDI, SAT
3	offen	Abbau	DIF, VDI, SAT	103	offen	Aufbau	DIF, VDI, SAT
4	zu	-	DIF, VDI	104	zu	Aufbau	DIF, VDI, SAT
5	zu	-	DIF, VDI	105	zu	Aufbau	DIF, VDI, SAT
6	zu	Abbau	DIF, VDI, SAT	106	offen	Abbau	DIF, VDI, SAT
7	zu	-	DIF, VDI	107	zu	Aufbau	DIF, VDI, SAT
8	offen	Abbau	DIF, VDI, SAT	108	zu	Aufbau	DIF, VDI, SAT
9	offen	Abbau	DIF, VDI, SAT	109	offen	Abbau	DIF, VDI, SAT
10	zu	-	DIF, VDI	110	zu	Aufbau	DIF, VDI, SAT
11	zu	-	DIF, VDI	111	zu	Aufbau	DIF, VDI, SAT
12	offen	Abbau	SAT	112	offen	Abbau	DIF, VDI, SAT
13	offen	Abbau	SAT	113	zu	Aufbau	DIF, VDI, SAT
				114	offen	Abbau	DIF, VDI, SAT
				115	offen	-	DIF, VDI
				116	offen	Aufbau	DIF, VDI, SAT
				117	offen	-	DIF, VDI
				118	offen	Aufbau	DIF, VDI, SAT
				119	offen	Aufbau	SAT

Unter der Annahme, dass sich die Radonquellstärke auf der Zeitskala von einigen Wochen nicht wesentlich verändert (siehe dazu Ergebnisse in Abschnitt 4.1 und 4.2), wurden die ermittelten Quellstärken aller Verfahren untereinander verglichen (Abschnitt 4.5).

In Messobjekt "Allendorf" wurden im Rahmen dieses Projekts nur Messungen zum Differenzdruckverfahren durchgeführt, die keine Benennung von Zeitabschnitten erfordert. Im Zuge des vorangegangenen Projekts (Buermeyer 2017) wurden hier allerdings schon Messreihen aufgenommen, die sich mit dem DIF- und VDI-Verfahren auswerten lassen. Diese Messreihe wurde nicht weiter in Zeitabschnitte unterteilt.

## 4.1 Anwendung des DIF-Verfahrens

Mittels des DIF-Verfahrens wurden in den Messobjekten "Trohe" und "Allendorf" die Radonquellstärken in verschiedenen Zeitabschnitten berechnet.

### 4.1.1 Messdatenaufbereitung

Zunächst sollte die in Abschnitt 3.3.1.2 beschriebene vereinfachte Berechnungsform der Radonquellstärke erprobt werden. Dazu wurde eine Messreihe aus Buermeyer (2017) neu ausgewertet. Hier wurden die Radon-Außenluftkonzentration und die CO<sub>2</sub>-Außenluftkonzentration kontinuierlich mitgemessen. Die Messdaten, die im Messobjekt "Allendorf" gewonnen wurden, wurden zunächst nach Gleichung 2 (Radonquellstärke) und 3 (Luftwechselrate) ausgewertet. Zum direkten Vergleich wurde aus dem gleichen Datensatz die Radonquellstärke mit Gleichung 4 (Radonquellstärke) und 5 (Luftwechselrate) berechnet. Dabei wurde für die Radon-Außenluftkonzentration, sowie die CO<sub>2</sub>-Außenluftkonzentration der Mittelwert über die sechs Wochen Messzeit berechnet und eingesetzt. Die so erhaltenen Quellstärkenverläufe sind in Abbildung 6 dargestellt.

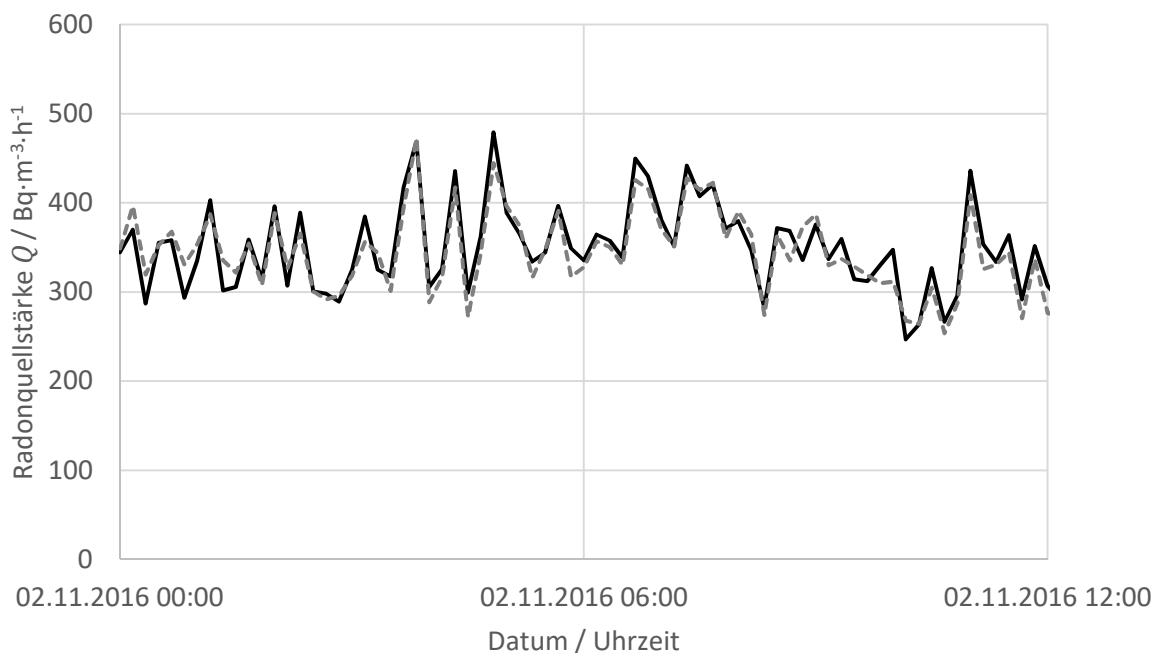


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der berechneten Radonquellstärken nach dem ursprünglichen Differenzenverfahren und dem hier angewandten DIF-Verfahren im Messobjekt "Allendorf", im Vergleich. Als Berechnungsgrundlage dienten Messwerte aus der Messkampagne, die im Rahmen von Buermeyer (2017) durchgeführt wurde. Die Quellstärke wurde zum einen unter Einbeziehung von zeitgleich gemessenen Außenluftkonzentrationen (Gleichung 2 und 3, schwarze Linie) und zum anderen unter Verwendung der Mittelwerte (Gleichung 4 und 5, grau gestrichelte Linie) von  $c_{Rn} = 23 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  und  $c(\text{CO}_2) = 453 \text{ ppm}$  berechnet.

Der berechnete Quellstärkenverlauf ist für beide Berechnungsverfahren nahezu identisch. Der Mehraufwand für eine zeitgleiche Messung der Außenluftkonzentrationen ist somit unnötig. Für die Messungen, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurden, wurden die Mittelwerte vorheriger Außenluftmessungen an den jeweiligen Objekten berechnet. Die Berechnung der Radonquellstärke erfolgte mit Gleichung 4 (Radonquellstärke) und 5 (Luftwechselrate) durch Einsetzen der Mittelwerte. Die Aufnahme der Messdaten erfolgte, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, an unterschiedlichen Messpunkten im Messobjekt. Anhand der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ließ sich so für jeden Messpunkt MP ein zeitlicher Verlauf der Luftwechselrate bestimmen (Abbildung 7). Anhand der Kurven ist zu erkennen, dass schon innerhalb eines Raums unterschiedliche Luftwechselraten mit bis zu  $\Delta k = 4 \text{ h}^{-1}$  Differenz berechnet werden können.

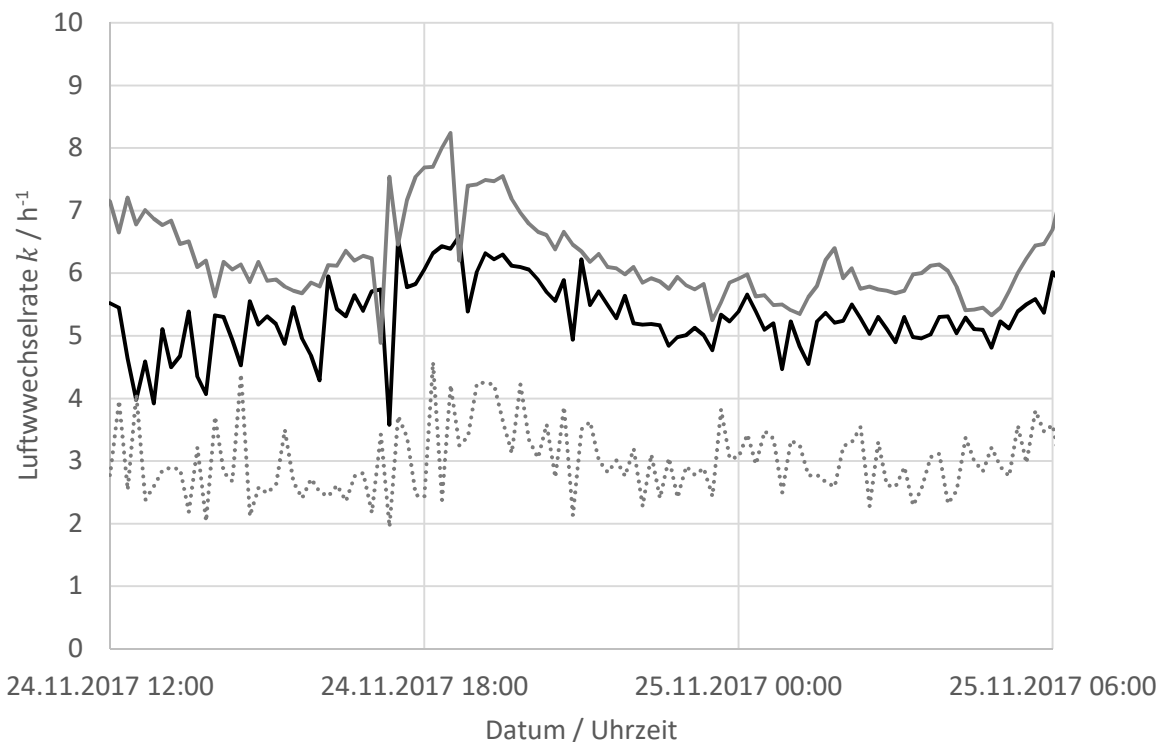


Abbildung 7: Beispiel für die berechnete Luftwechselrate aus den gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen an verschiedenen Messpunkten in Messobjekt "Trohe", Raum 2, DIF-Verfahren. Die schwarz-durchgezogene Linie entspricht der berechneten Luftwechselrate an Messpunkt MP1, die grau-durchgezogene Linie der an MP3 und die grau-gepunktete Linie der an MP4.

Auch für die gemessene Radonkonzentration ergab sich für jeden Messpunkt ein eigener Verlauf. Nach dem in Abschnitt 3.3.1.2 beschriebenen Verfahren wurden daraus die Radonquellstärken an den einzelnen Messpunkten berechnet. Diese sind in Abbildung 8 dargestellt. Die verschiedenen Quellstärken stimmen innerhalb der Unsicherheiten der Messungen überein (siehe folgende Abschnitte). Für die weitere Auswertung wurde der Mittelwert aus den berechneten Quellstärken gebildet. Die Berechnung der Unsicherheiten erfolgte gemäß dem in Abschnitt 3.3.1.3 beschriebenen Verfahren.

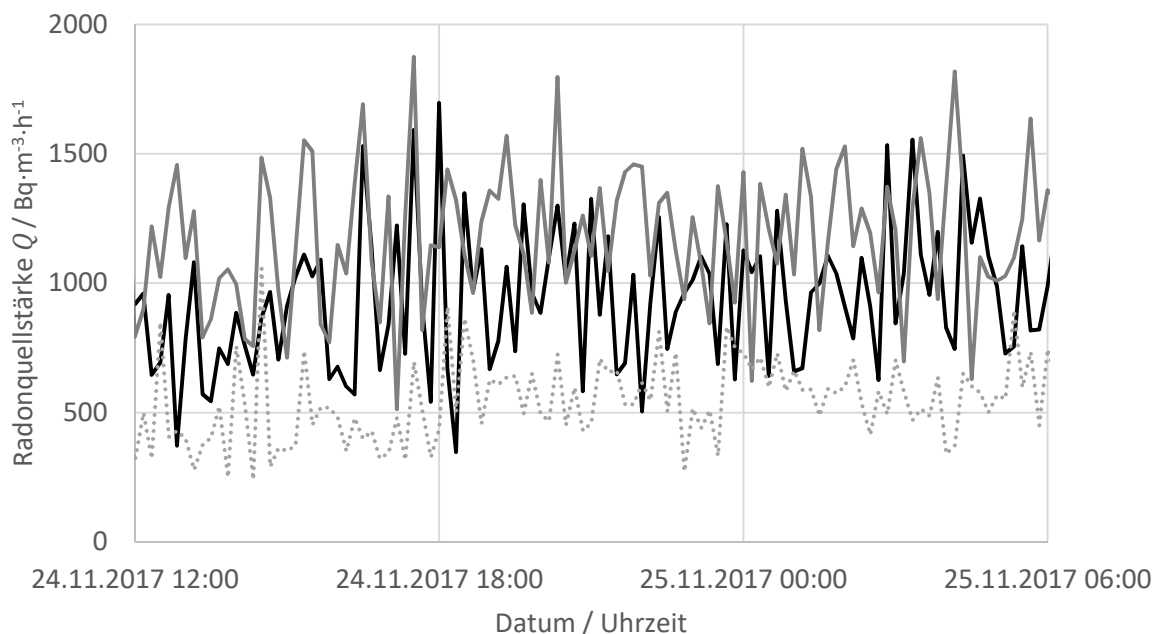


Abbildung 8: Beispiel für die gemessene Radonkonzentration an den verschiedenen Messpunkten in Messobjekt "Trohe", Raum 2 im Rahmen des DIF-Verfahren. Die schwarz-durchgezogene Linie entspricht der Radonkonzentration an Messpunkt MP1, die grau-gepunktete Linie der an MP3 und die grau-gestrichelte Linie der an MP4.

#### 4.1.2 Ergebnisse "Trohe", Raum 1

Zunächst wurde die Luftwechselrate für jedes Wertepaar mit Gleichung 5 bestimmt. Zur Veranschaulichung wurden die Mittelwerte über die Dauer der einzelnen Messabschnitte berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 zu sehen.

Abgebildet sind zwei unterschiedliche Belüftungssituationen: "Raumtür offen" und "Raumtür geschlossen". Im Vergleich mit den gelisteten Belüftungssituationen aus Tabelle 1 zeigt sich, dass bei geschlossener Raumtür sich für Raum 1 eine Luftwechselrate von  $k < 1,5 \text{ h}^{-1}$  einstellt, während die Luftwechselrate bei offener Raumtür zwischen 2 und etwa  $4,5 \text{ h}^{-1}$  schwankt.

Im zweiten Schritt wurde die Radonquellstärke gemäß Gleichung 4 aus den berechneten Luftwechselraten für jeden Messzeitpunkt bestimmt. Aus diesen Daten wurde über die Dauer der Messabschnitte ein Mittelwert gebildet. Die so berechneten Quellstärken sind in Abbildung 10 zu sehen und in Tabelle 2 aufgelistet. Als statistischer Median für die Radonquellstärke für "Trohe", Raum 1 ergibt sich nach DIF-Verfahren  $Q = (207 \pm 32) \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ .

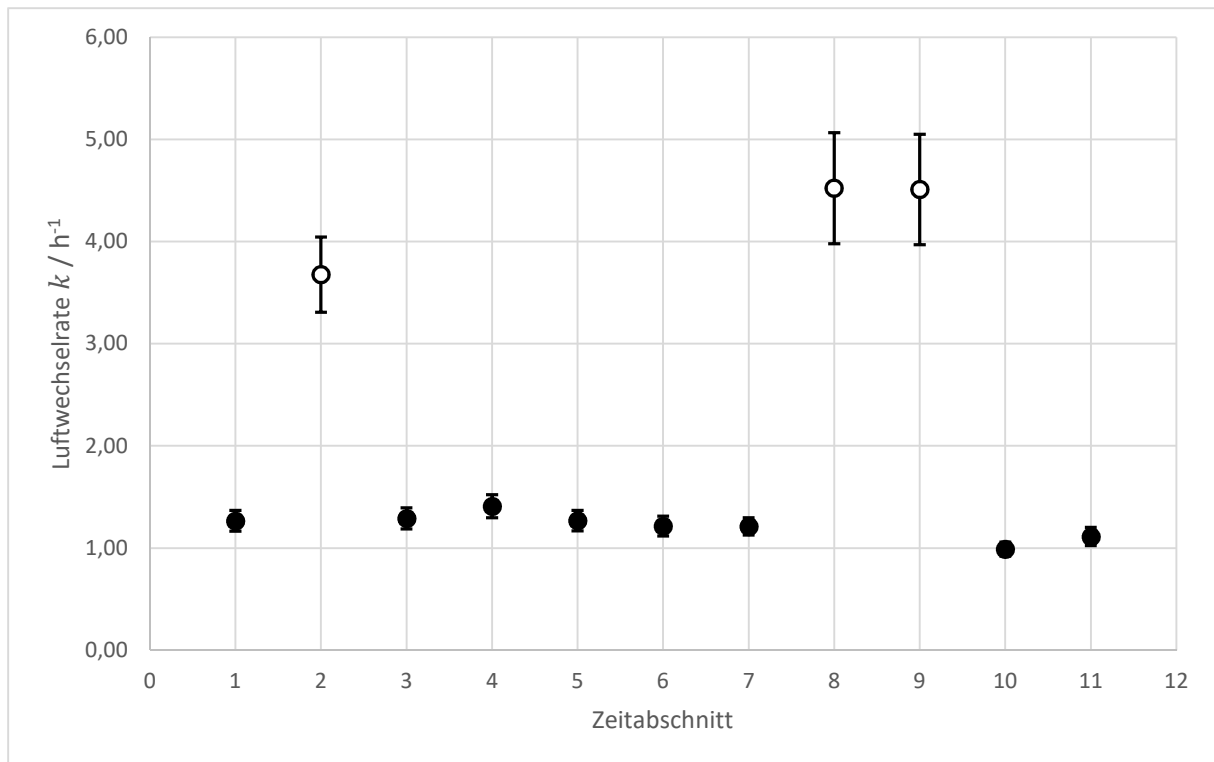


Abbildung 9: Nach Gleichung 5 ermittelte und über die Dauer der Messabschnitte gemittelte Luftwechselrate in Messobjekt "Trohe", Raum 1, DIF-Verfahren. Abgebildet sind zwei unterschiedliche Belüftungssituationen (Kreise: Raumtür offen, Punkte: Raumtür geschlossen).

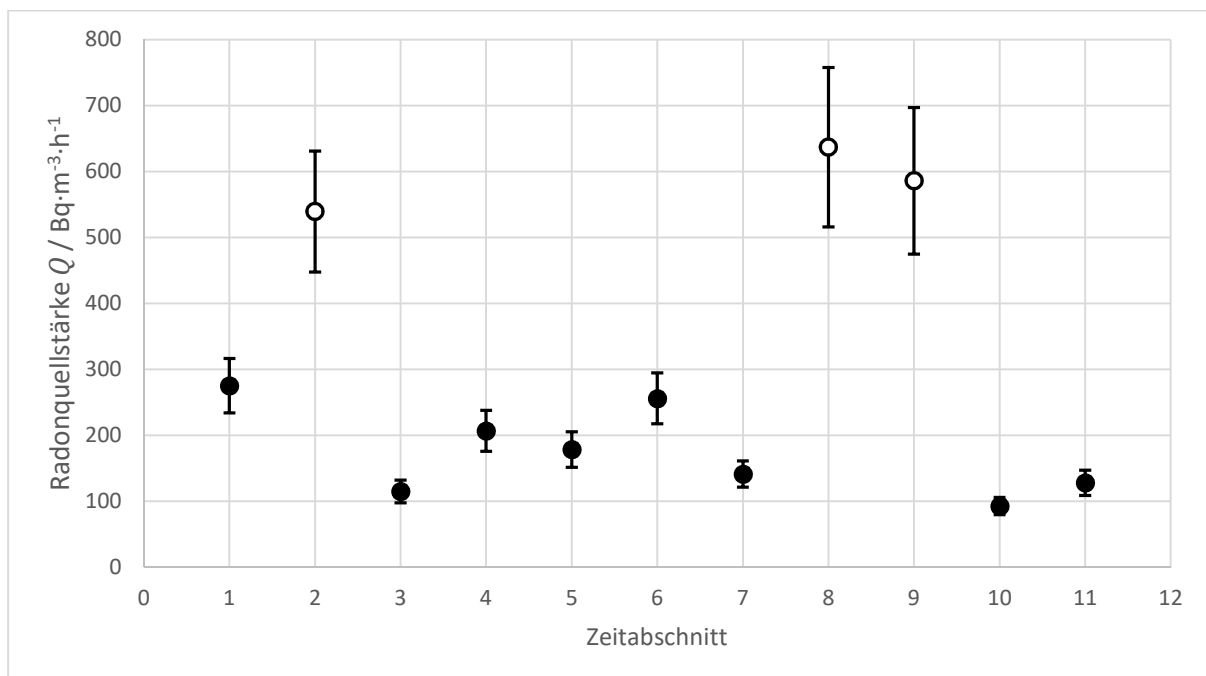


Abbildung 10: Nach Gleichung 4 (DIF-Verfahren) ermittelte und über die Dauer der Messabschnitte gemittelte Radonquellstärken in Messobjekt "Trohe", Raum 1 bei unterschiedlichen Belüftungssituationen (Kreise: Raumtür offen, Punkte: Raumtür geschlossen).

Der Vergleich der Messergebnisse in Raum 1, Abbildung 9 und Abbildung 10, zeigt, dass die Luftwechselrate die berechnete Quellstärke beeinflusst. Während die Quellstärken bei geschlossener Raamtür im Bereich zwischen 90 und 300 Bq·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup> liegen, sind die drei bei offener Tür ermittelten Quellstärken in Messabschnitt 2 und 8 mit knapp 540 bis 650 Bq·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup> deutlich höher.

Tabelle 2: Übersicht über die an den jeweiligen Messabschnitten ermittelte Radonquellstärke in "Trohe", Raum 1, DIF-Verfahren. In der untersten Spalte steht der aus den jeweiligen Größen ermittelte Median.

Nr.	Zeit- spanne	Tür	Mittelwert CO <sub>2</sub>	Mittelwert Radon	Luftwechsel- rate	Quellstärke	$\Delta k/k$	$\Delta Q/Q$
	T/h		c (CO <sub>2</sub> )/ppm	$c_{Rn}/\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	$k/\text{h}^{-1}$	$Q/\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$	in %	in %
1	48	zu	1985	234	1,27	275	8	15
2	20	offen	943	165	3,68	539	10	17
3	51	zu	1883	108	1,29	115	8	15
4	3	zu	1849	164	1,41	207	8	15
5	19	zu	1897	157	1,27	178	8	15
6	4	zu	1908	228	1,22	256	8	15
7	23	zu	2173	135	1,21	141	7	14
8	39	offen	811	158	4,52	637	12	18
9	11	offen	850	147	4,51	586	12	18
10	20	zu	2304	111	0,99	93	7	14
11	4	zu	2059	132	1,11	128	8	15
<b>Ges.</b>	<b>233</b>		<b>1897</b>	<b>157</b>	<b>1,27</b>	<b>207</b>	<b>8</b>	<b>15</b>

#### 4.1.3 Ergebnisse Objekt "Trohe", Raum 2

Die Berechnung der Luftwechselrate und der Quellstärke für Raum 2 erfolgte analog zur Berechnung in Raum 1.

Die gemittelten Luftwechselraten sind in Abbildung 11 dargestellt. Auch hier sind zwei Belüftungssituationen zu sehen: "Raumtür offen" und "Raumtür geschlossen". Im Vergleich zeigt sich für Raum 2, ähnlich wie für Raum 1, dass eine Luftwechselrate von  $k < 2 \text{ h}^{-1}$  bei geschlossener Raamtür vorherrscht, während die Luftwechselrate bei offener Raamtür zwischen 3,5 und etwa 8,5 h<sup>-1</sup> schwankt.

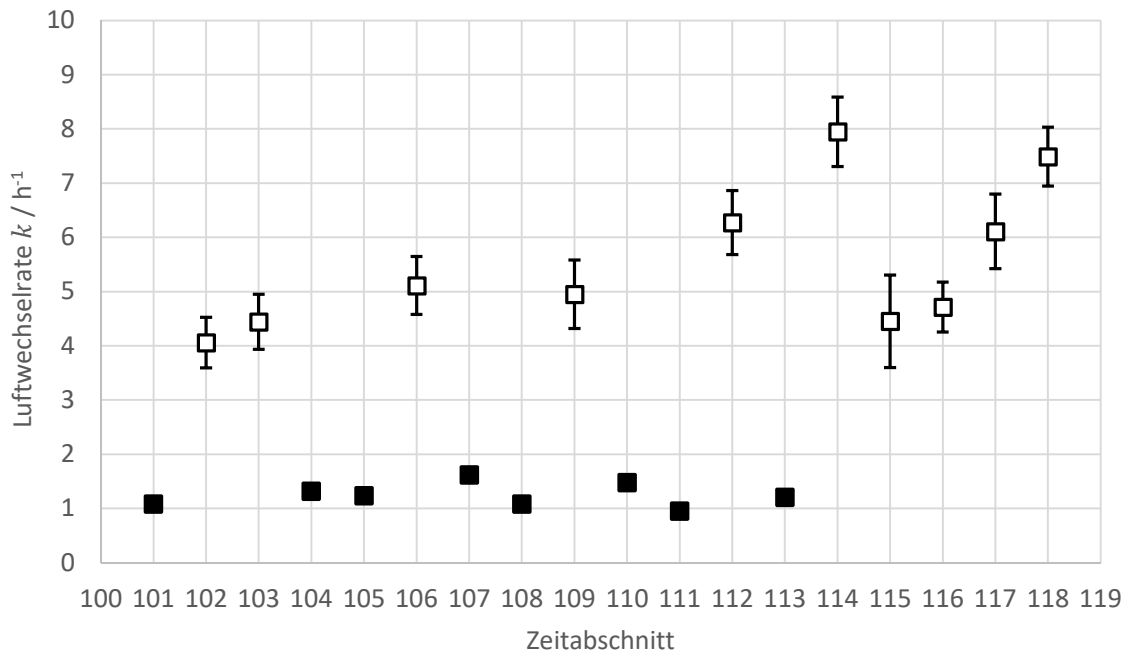


Abbildung 11: Nach Gleichung 5 ermittelte und über die Dauer der Messabschnitte gemittelte Luftwechselrate in Messobjekt "Trohe", Raum 2, DIF-Verfahren. Abgebildet sind zwei unterschiedliche Belüftungssituationen (Kreise: Raumtür offen, Punkte: Raumtür geschlossen).

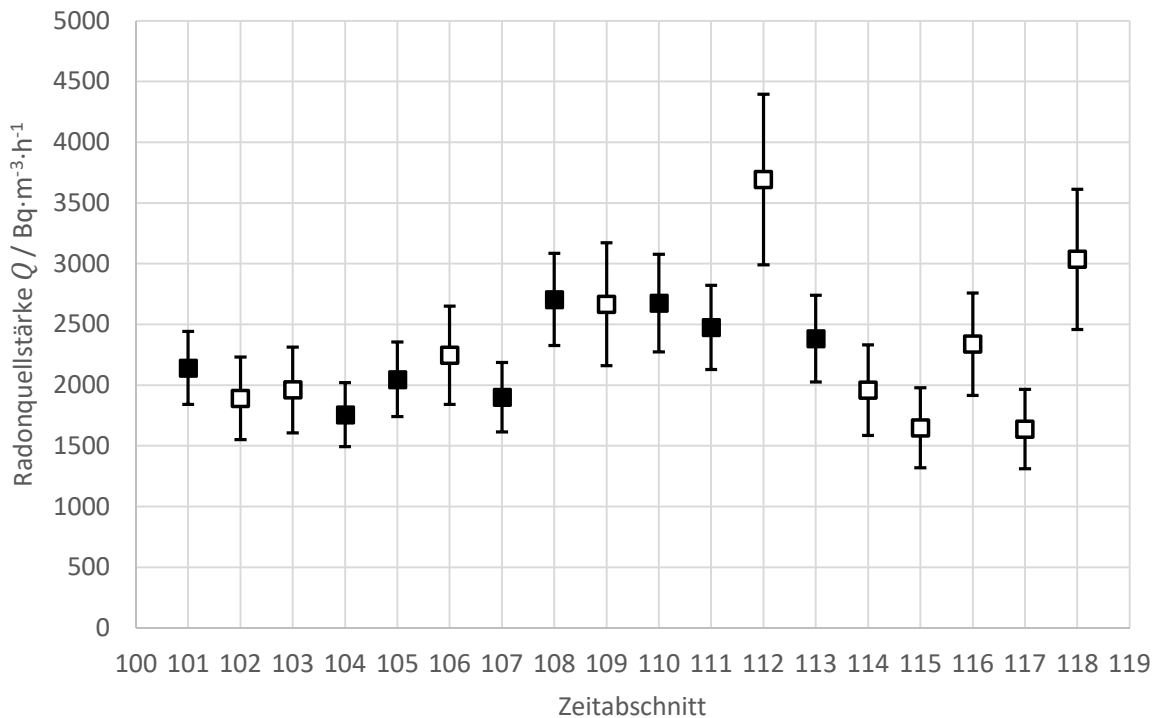


Abbildung 12: Nach Gleichung 4 ermittelte und über die Dauer der Messabschnitte gemittelte Radonquellstärken nach DIF-Verfahren in Messobjekt "Trohe", Raum 2 bei unterschiedlichen Belüftungssituationen (Kreise: Raumtür offen, Punkte: Raumtür geschlossen).



Die im Anschluss berechneten und gemittelten Quellstärken sind in Abbildung 12 zu finden. In Tabelle 3 sind die einzelnen über die jeweiligen Messabschnitte gemittelten Werte aufgelistet. Als statistischer Median über die Radonquellstärke für "Trohe", Raum 2 ergibt sich nach dem DIF-Verfahren eine Radonquellstärke von  $Q = (2194 \pm 395) \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Der Eindruck, dass die Luftwechselrate die Quellstärke beeinflusst, lässt sich mit den Ergebnissen aus Raum 2 nicht bestätigen. Hier schwanken die berechneten Quellstärken unabhängig von der Belüftungssituation zwischen  $Q = 1500 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$  und etwas über  $3000 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Im direkten Vergleich der beiden Räume fällt außerdem auf, dass Messobjekt "Trohe", Raum 2 (Abbildung 12) eine deutlich höhere Quellstärke aufweist, als Messobjekt "Trohe", Raum 1 (Abbildung 10).

*Tabelle 3: Übersicht über die an den jeweiligen Messabschnitten ermittelte Radonquellstärke in Messobjekt "Trohe", Raum 2, DIF-Verfahren. In der untersten Spalte steht der aus den jeweiligen Größen ermittelte Median.*

Nr.	Zeit- spanne	Tür	Mittelwert CO <sub>2</sub>	Mittelwert Radon	Luftwechsel- rate	Quellstärke	$\Delta k/k$	$\Delta Q/Q$
	T/h		c (CO <sub>2</sub> )/ppm	$c_{Rn}/\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$	$k/\text{h}^{-1}$	$Q/\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$	in %	in %
101	7	zu	2145	2004	1,08	2142	7	14
102	21	offen	898	488	4,06	1891	11	18
103	31	offen	863	463	4,44	1960	11	18
104	11	zu	1835	1354	1,32	1758	8	15
105	22	zu	1946	1679	1,23	2048	8	15
106	8	offen	821	465	5,11	2246	11	18
107	11	zu	1583	1194	1,62	1901	8	15
108	34	zu	2321	2566	1,08	2706	7	14
109	8	offen	735	563	4,95	2665	12	19
110	24	zu	1785	1924	1,48	2676	8	15
111	21	zu	2406	2648	0,95	2476	7	14
112	21	offen	756	594	6,27	3693	12	19
113	64	zu	2078	1855	1,20	2383	8	15
114	54	offen	752	391	7,95	1958	12	19
115	88	offen	707	391	4,45	1648	13	20
116	13	offen	837	663	4,71	2337	11	18
117	14	offen	760	508	6,11	1638	13	20
118	43	offen	877	424	7,49	3035	12	19
<b>Ges.</b>	<b>493</b>		<b>888</b>	<b>629</b>	<b>4,25</b>	<b>2194</b>	<b>11</b>	<b>18</b>

#### 4.1.4 Ergebnisse Objekt "Allendorf"

Aus den kompletten Messreihen für die CO<sub>2</sub>- und Radonkonzentration aus Buermeyer (2017), Messobjekt "Allendorf", wurde nach dem DIF-Verfahren der zeitliche Verlauf der Quellstärke berechnet (Abbildung 13). Als Mittelwert über die gesamte Messreihe ergab sich eine Quellstärke von  $Q = (337 \pm 54) \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ .

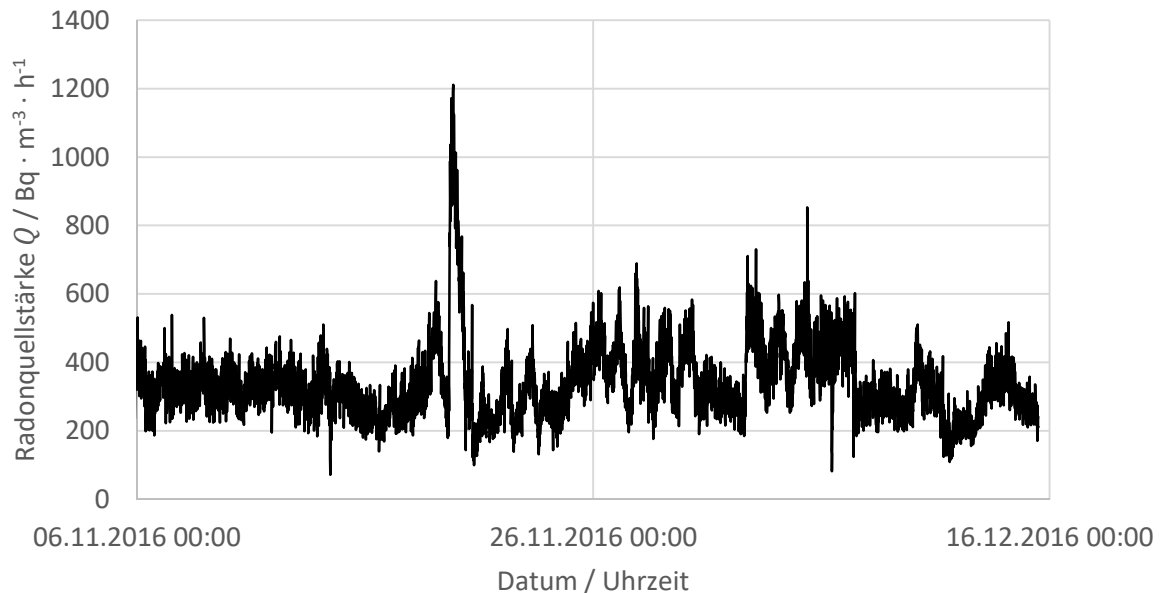


Abbildung 13: Nach Gleichung 4 ermittelter zeitlicher Verlauf der Quellstärke in Messobjekt "Allendorf" bei unterschiedlichen Belüftungssituationen. Die Berechnung erfolgte nach dem DIF-Verfahren.

#### 4.2 Anwendung des VDI-Verfahren

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden mit dem VDI-Verfahren aus der Messkampagne in Messobjekt "Trohe" und anhand von Daten aus Messobjekt "Allendorf" ermittelt.

##### 4.2.1 Messdatenaufbereitung

Abbildung 14 zeigt den zeitlichen Verlauf der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentration exemplarisch für Raum 2 im Zeitraum vom 28.11.2017 bis 05.12.2017. Dargestellt sind die Verläufe an den einzelnen Messpunkten (siehe Abschnitt 3.1). Es ist deutlich zu sehen, dass sich selbst die Werte der beiden dicht nebeneinander stehenden Messgeräte (MP1 und MP2) deutlich voneinander unterscheiden. Anders als beim zuvor beschriebenen DIF-Verfahren werden zur Ermittlung des Verlaufs der Luftwechselrate  $k$  nach Gleichung 7 die CO<sub>2</sub>-Werte aller Messgeräte bzw. Messpunkte zunächst gemittelt (Abbildung 15).

Die zeitgleich gemessenen Radonkonzentrationswerte an den einzelnen Messpunkten, dargestellt in Abbildung 16, wurden ebenfalls gemittelt.

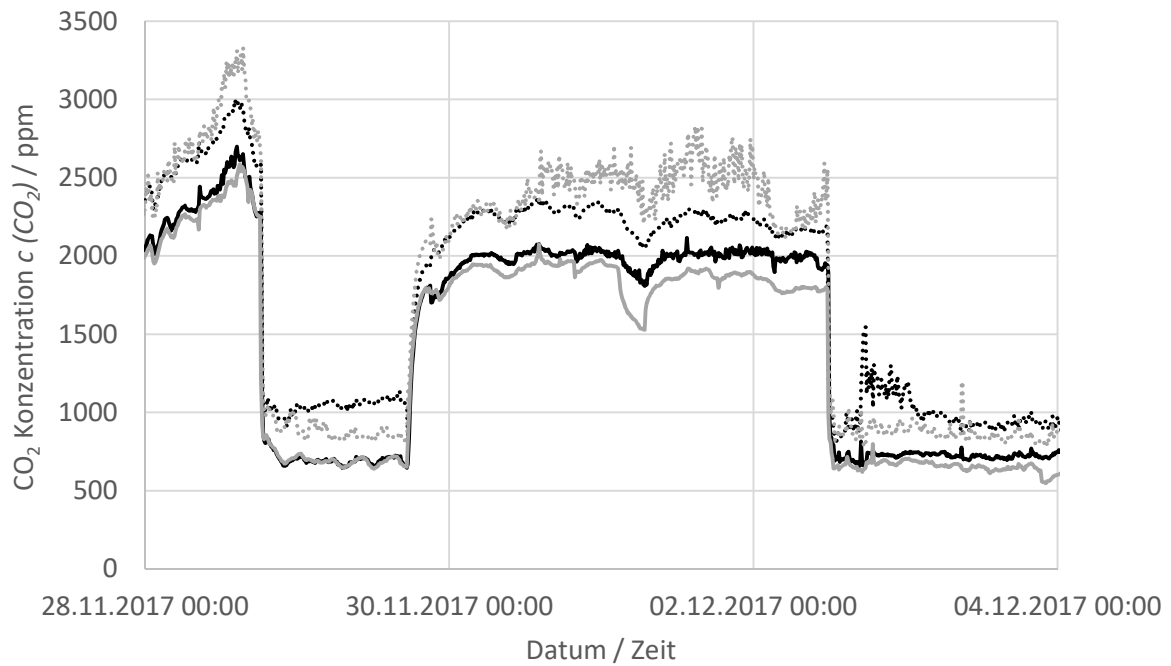


Abbildung 14: Gemessene  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen an den vier Messpunkten in "Trohe", Raum 2 im Rahmen des VDI-Verfahrens. Die schwanz-durchgezogene Linie stellt die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen am MP1 dar, die schwarz-gepunktete am MP2, die graudurchgezogene Linie wurde am MP3 und die grau-gepunktete am MP4 gemessen.

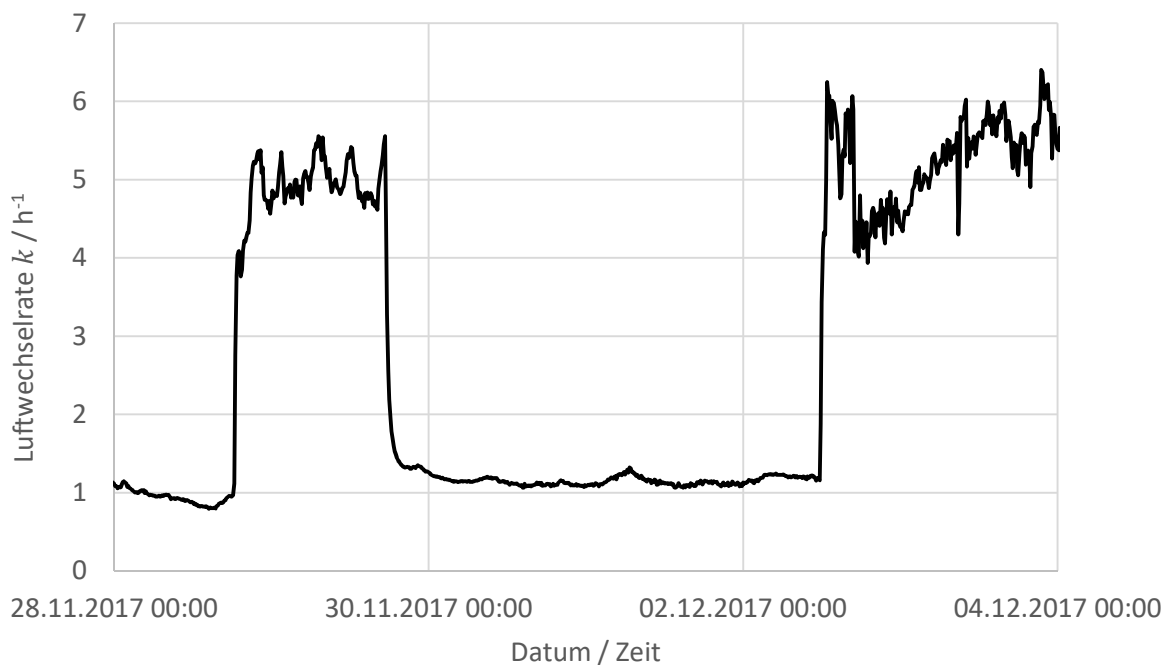


Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der aus den gemittelten  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen errechneten Luftwechselrate, "Trohe", Raum 2, VDI-Verfahren

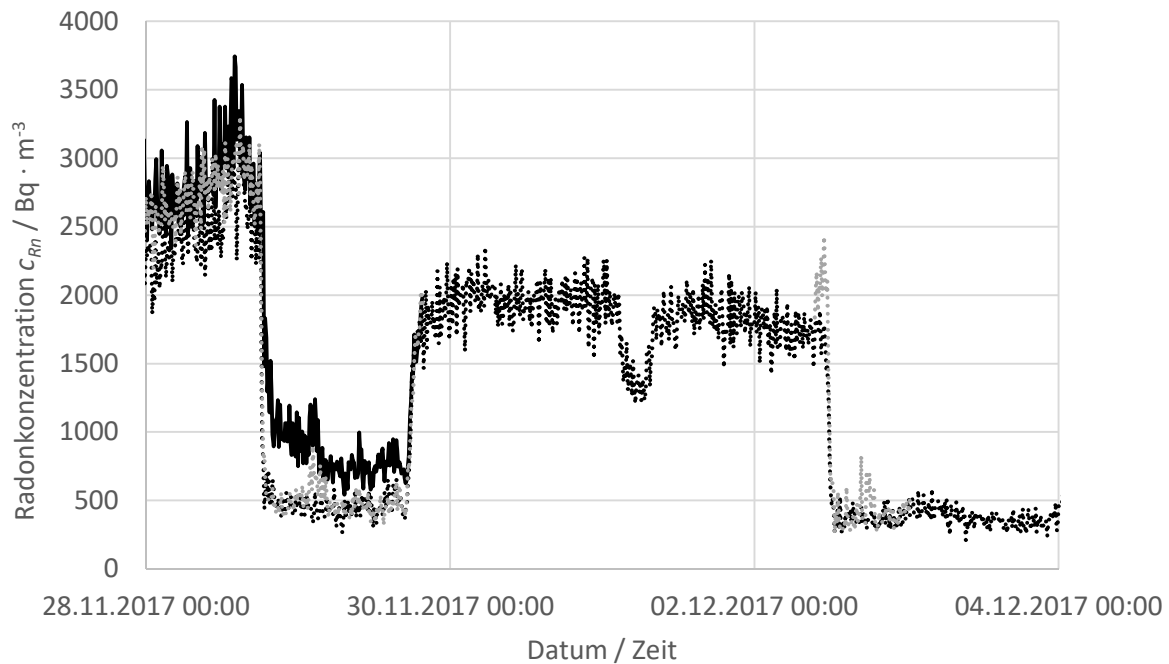


Abbildung 16: Gemessene Radonkonzentrationen an den drei Messpunkten in "Trohe", Raum 2, im Rahmen des VDI-Verfahrens. Die schwarz-durchgezogene Linie sind die Messwerte von MP1 die schwarz-gepunktete Linie von MP3 und die grau-gepunktete Linie von MP4.

Im nächsten Schritt wurden aus den zeitlichen Verläufen der gemittelten Luftwechselrate und der gemittelten Radonkonzentration der Median über die einzelnen Messabschnitte bestimmt. Aus diesem Median wurden die Radonquellstärken für die einzelnen Messabschnitte berechnet. Der Median ist im Vergleich zum Mittelwert robuster gegen asymmetrische Verteilungen und damit für die vorliegenden Daten zu bevorzugen. Die Unsicherheiten berechnen sich nach dem in Abschnitt 3.3.2.2 beschriebenen Verfahren.

#### 4.2.2 Ergebnisse Objekt "Trohe", Raum 1

Die nach Gleichung 7 aus den mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ermittelten Werte für die Luftwechselrate  $k$  der einzelnen Messabschnitte sind in Abbildung 17 dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die beiden Belüftungssituationen. Während sich die Werte bei geschlossener Raamtür bei  $k=1$  bis  $2 \text{ h}^{-1}$  bewegen, liegen die Luftwechselraten bei geöffneter Tür mit  $k > 3,5 \text{ h}^{-1}$  klar darüber.

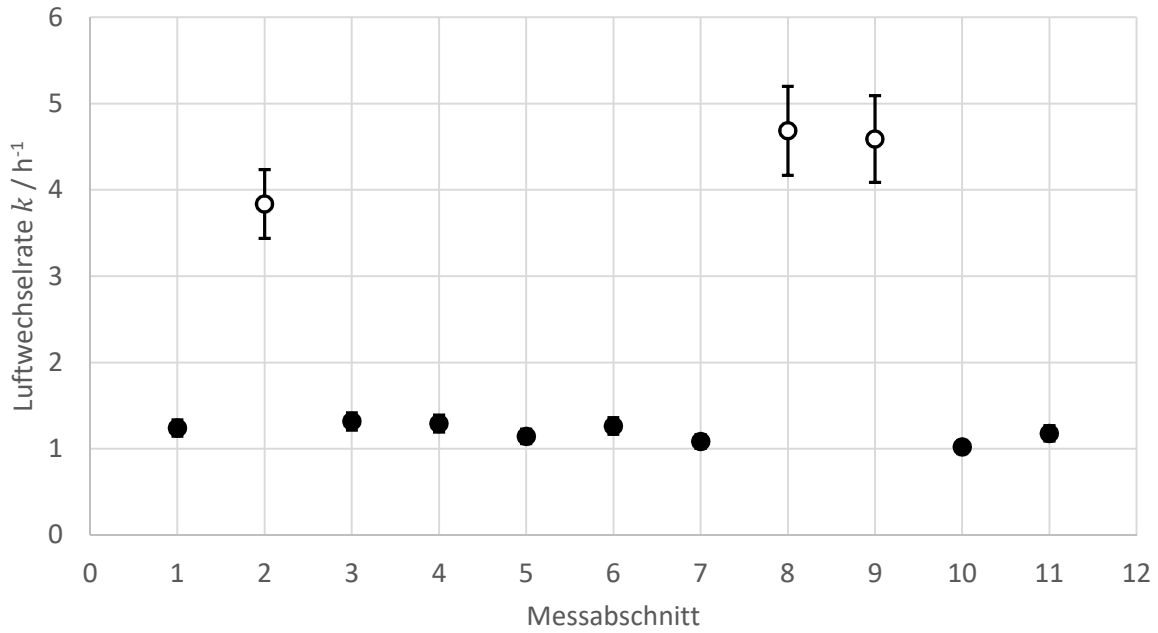


Abbildung 17: Nach Gleichung 7 ermittelte und über die Dauer der Messabschnitte gemittelte Radonquellstärken in Messobjekt "Trohe", Raum 1, VDI-Verfahren, bei unterschiedlichen Belüftungssituationen (Kreise: Raumtür offen, Punkte: Raumtür geschlossen).

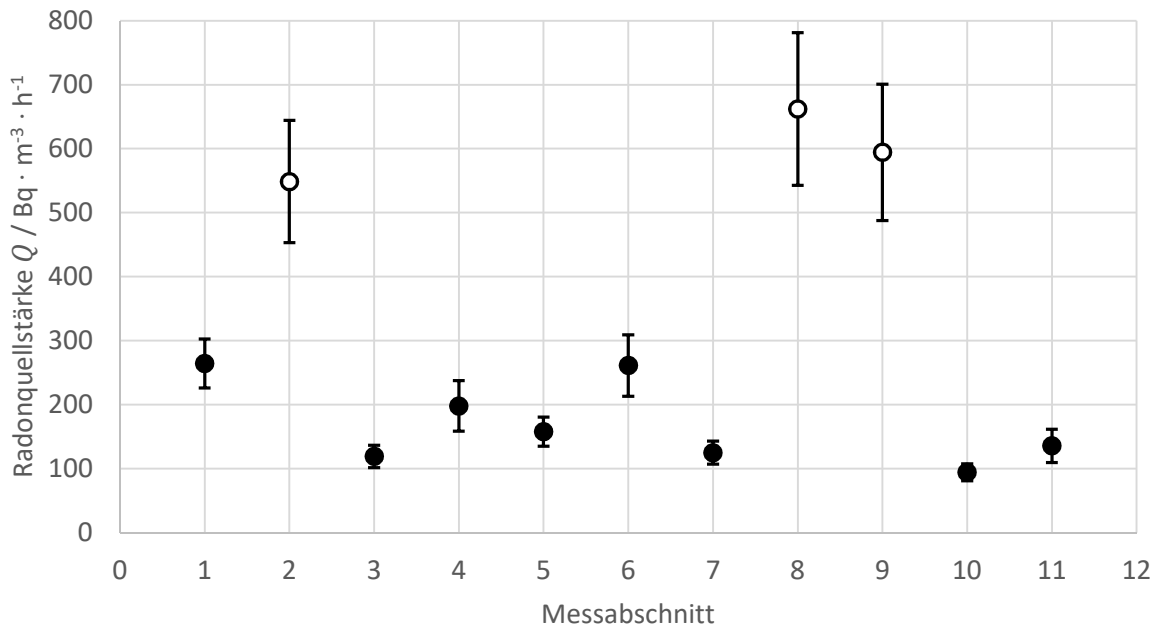


Abbildung 18: Radonquellstärke der gemessenen Zeitabschnitte des Gebäudes Trohe, Raum 1, berechnet nach dem VDI-Verfahren. (Kreise: Raumtür offen, Punkte: Raumtür geschlossen).

Aus den gemittelten Radonkonzentrationen und der Luftwechselrate wurde mit Gleichung 6 die Radonquellstärke in den einzelnen Messabschnitten bestimmt (Abbildung 18). Auch hier lässt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem berechneten Wert und der Belüftungssituation erkennen. Die Werte bei geschlossener Tür liegen mit  $Q < 300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  deutlich unterhalb der Werte bei geöffneter Raumtür, die sich alle oberhalb von  $450 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  befinden.

Um einen abschließenden Wert für die Radonquellstärke des Raums zu erhalten, wurde aus den Werten für die einzelnen Messabschnitte der Median gebildet. Er beträgt  $Q = (198\pm 34) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ . Alle berechneten Werte finden sich in Tabelle 4 wieder.

Tabelle 4: Ergebnisübersicht der gemessenen Zeitabschnitte des Messobjekts "Trohe", Raum 1, VDI-Verfahren. In der untersten Spalte steht der aus den jeweiligen Größen ermittelte Median steht der Median.

Nr.	Zeit- spanne	Tür	Mittelwert CO <sub>2</sub>	Mittelwert Radon	Luftwechsel- rate	Quellstärke	$\Delta k/k$	$\Delta Q/Q$
	T/h		c (CO <sub>2</sub> )/ppm	$c_{Rn}/\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	$k/\text{h}^{-1}$	$Q/\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$	in %	in %
1	48	zu	2001	230	1,24	264	8	15
2	20	offen	942	160	3,84	549	10	17
3	51	zu	1911	108	1,32	119	8	15
4	3	zu	1939	170	1,29	198	8	20
5	19	zu	2133	155	1,14	158	7	14
6	4	zu	1972	224	1,26	261	8	18
7	23	zu	2224	132	1,09	125	7	14
8	39	offen	850	158	4,68	662	11	18
9	11	offen	859	147	4,59	594	11	18
10	20	zu	2339	109	1,02	94	7	14
11	4	zu	2083	132	1,18	136	7	19
<b>Ges.</b>	<b>233</b>		<b>1972</b>	<b>155</b>	<b>1,26</b>	<b>198</b>	<b>8</b>	<b>17</b>

Die Länge einer Messung zur Beurteilung der Radonsituation eines Gebäudes sollte aus Kostengründen so kurz wie möglich und nur so lang wie nötig sein. Um die Messdauer, die für eine Beurteilung benötigt wird, besser einschätzen zu können wurde in einem zweiten Ansatz zunächst aus den gemittelten CO<sub>2</sub>-Werten und Radonkonzentrationen nach Gleichung 6 und 7 der zeitliche Verlauf der Radonquellstärke in den Messabschnitten bestimmt. Beispielhaft ist dies in Abbildung 19 zu sehen.

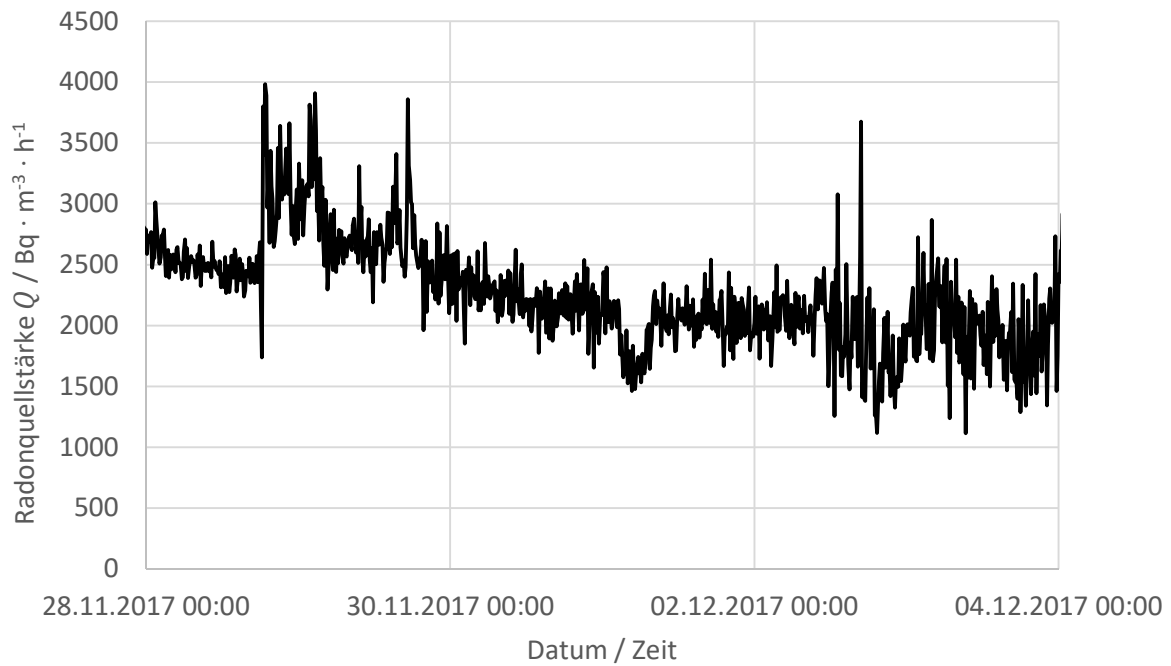


Abbildung 19: Beispiel für den aus dem Verlauf der Luftwechselrate und der gemessenen Radon-Aktivitätskonzentration errechneter Verlauf der Quellstärke in "Trohe", Raum 2 nach dem VDI-Verfahren.

Zur Betrachtung der Verteilung der Werte für die Radonquellstärke  $Q$  von "Trohe", Raum 1 dient Abbildung 20. Dargestellt sind die Box-Plots der Mittelwerte der Radonquellstärke über unterschiedliche Zeitintervalle. Gemittelt wurde über die Zeitintervalle von einem Tag und einer Woche. Die 10-Minuten-Werte sind die ungemittelten Werte der Messintervalle.

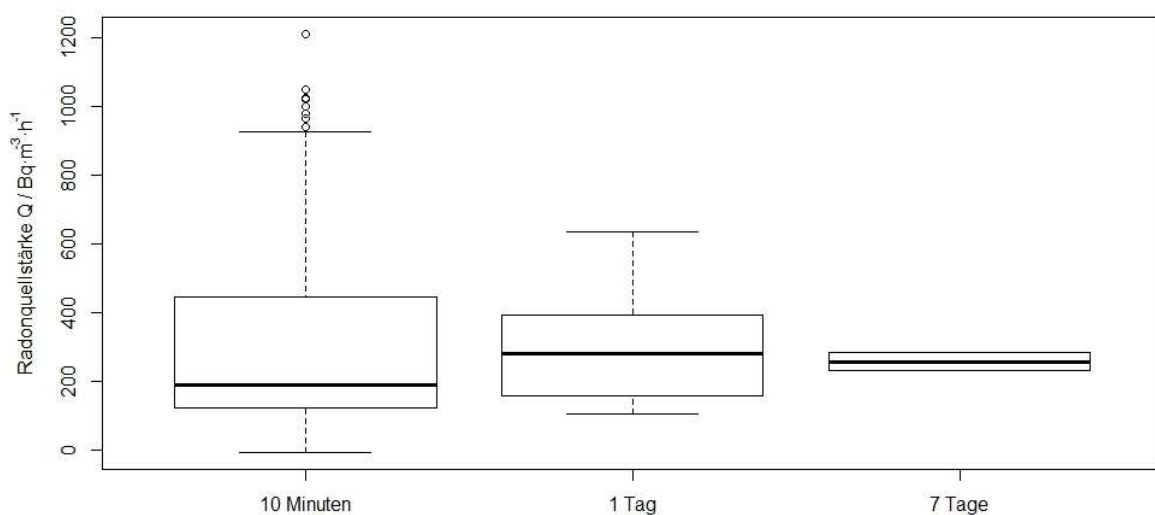


Abbildung 20: Über verschiedene Zeitintervalle (10 Minuten, 1 Tag, 7 Tage) gemittelte Werte der Quellstärke des Gebäudes "Trohe", Raum 1 nach dem VDI-Verfahren. Die Boxen entsprechen dem Bereich, in dem 50% aller Werte liegen, die Antennen umschließen den 1,5-fachen Bereich bzw. stellen die Extremwerte dar, wenn alle Werte in diesem Bereich enthalten sind. Werte außerhalb des 1,5-fachen Bereiches werden als Ausreißer ignoriert.

### 4.2.3 Ergebnisse Objekt "Trohe", Raum 2

Analog zu den Berechnungen aus dem vorigen Abschnitt, wurden die Luftwechselraten und Radonquellstärken für Messobjekt "Trohe", Raum 2 bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt.

Wie schon bei den Ergebnissen für Raum 1 ist die Abhängigkeit der Luftwechselrate von dem Status der Tür deutlich erkennbar. Auch hier liegen die Luftwechselraten bei geschlossener Raamtür bei  $k = 1$  bis  $2 \text{ h}^{-1}$ , während die ermittelten Luftwechselraten bei geöffneter Tür alle größer als  $4 \text{ h}^{-1}$  und bis  $7,5 \text{ h}^{-1}$  groß sind.

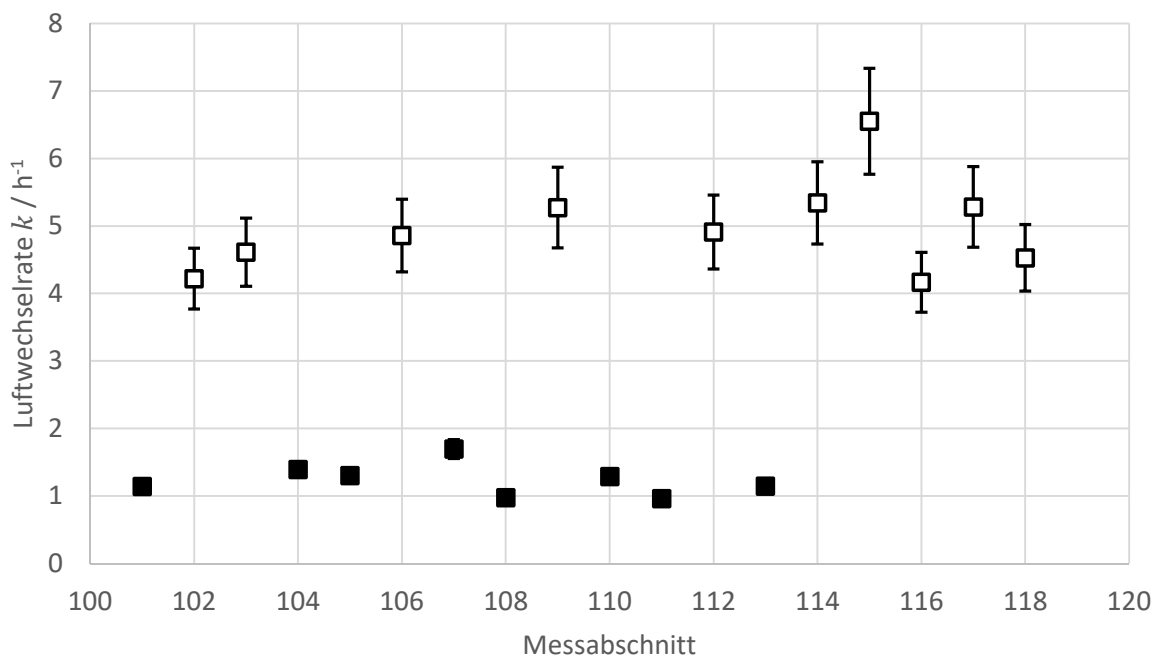


Abbildung 21: Luftwechselrate der gemessenen Zeitabschnitte im Messobjekt "Trohe", Raum 2, VDI-Verfahren. Abgebildet sind zwei unterschiedliche Belüftungssituationen (Offene Quadrate: Raamtür offen, ausgefüllte Quadrate: Raamtür geschlossen).

Anders als zuvor ist diese Abhängigkeit in den errechneten Werten der Quellstärken, Abbildung 22, nicht mehr zu erkennen. Diese schwanken unabhängig vom Belüftungszustand zwischen  $1500$  und  $3300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Über die Quellstärken der einzelnen Messabschnitte wurde der Median gebildet. Er beträgt  $Q_{Rn,V} = (2216 \pm 399) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ . Die Ergebnisse der Messungen aus "Trohe", Raum 2 sind in Tabelle 5 aufgelistet.



Tabelle 5: Ergebnisübersicht der gemessenen Zeitabschnitte des Messobjektes "Trohe", Raum 2, VDI-Verfahren. In der untersten Spalte steht der aus den jeweiligen Größen ermittelte Median.

Nr.	Zeit- spanne	Tür	Mittelwert CO <sub>2</sub>	Mittelwert Radon	Luftwechsel- rate	Quellstärke	$\Delta k/k$	$\Delta Q/Q$
	T/h		c (CO <sub>2</sub> )/ppm	$c_{Rn}/Bq \cdot m^{-3}$	$k/h^{-1}$	$Q/Bq \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$	in %	in %
101	7	zu	2138	1988	1,14	2249	7	14
102	21	offen	896	483	4,22	1966	11	18
103	31	offen	857	462	4,61	2052	11	18
104	11	zu	1832	1352	1,39	1856	8	15
105	22	zu	1928	1688	1,30	2174	8	15
106	8	offen	836	466	4,86	2182	11	18
107	11	zu	1581	1196	1,70	2000	8	15
108	34	zu	2428	2572	0,97	2490	7	14
109	8	offen	804	515	5,27	2627	11	18
110	24	zu	1945	1978	1,29	2523	8	15
111	21	zu	2457	2637	0,96	2516	7	14
112	21	offen	831	588	4,91	2805	11	18
113	64	zu	2131	1880	1,15	2134	7	14
114	54	offen	799	382	5,34	1950	11	18
115	88	offen	732	382	6,55	2392	12	19
116	13	offen	902	658	4,17	2669	11	18
117	14	offen	804	477	5,28	2429	11	18
118	43	offen	865	422	4,53	1834	11	19
<b>Ges.</b>	<b>493</b>		<b>899</b>	<b>623</b>	<b>4,20</b>	<b>2216</b>	<b>11</b>	<b>18</b>

Analog zu dem Vorgehen bei "Trohe", Raum 1, wurden auch für Raum 2 Mediane über den zeitlichen Verlauf der Radonquellstärke gebildet. Die Messkampagne in Raum 2 ging insgesamt über einen längeren Zeitraum, die Mediane konnten deshalb zusätzlich zu den Zeitintervallen von einem Tag und einer Woche auch über 14 Tage erfolgen (Abbildung 23).

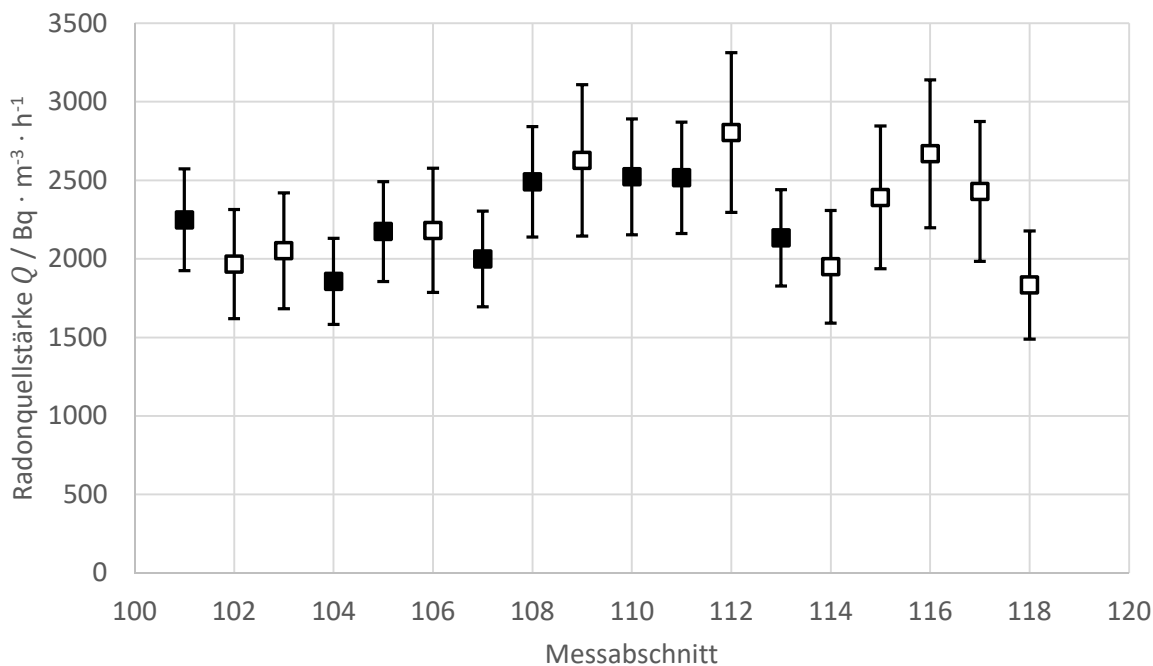


Abbildung 22: Radonquellestärke nach dem VDI-Verfahren der gemessenen Zeitabschnitte des Gebäudes "Trohe", Raum 2, VDI-Verfahren. Abgebildet sich zwei unterschiedliche Belüftungssituationen (Offene Quadrate: Rauntür offen, ausgefüllte Quadrate: Rauntür geschlossen).

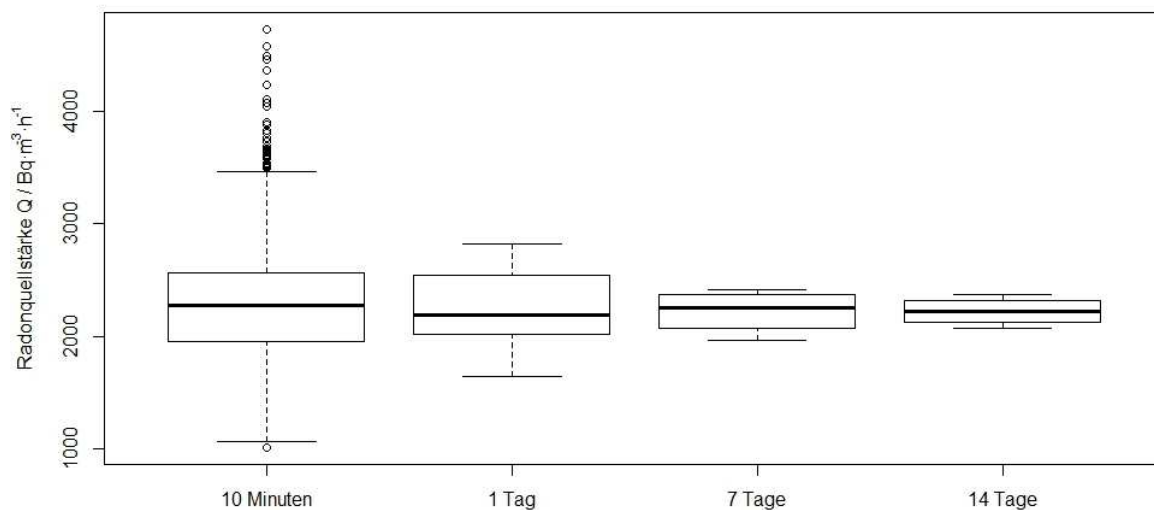


Abbildung 23: Über verschiedene Zeitintervalle (10 Minuten, 1 Tag, 7 Tage, 14 Tage) gemittelte Werte der Quellstärke des Gebäudes "Trohe", Raum 2 nach dem VDI-Verfahren. Die Boxen entsprechen dem Bereich, in dem 50% aller Werte liegen, die Antennen umschließen den 1,5-fachen Bereich bzw. stellen die Extremwerte dar, wenn alle Werte in diesem Bereich enthalten sind. Werte außerhalb des 1,5-fachen Bereiches werden als Ausreißer ignoriert.

#### 4.2.4 Ergebnisse Objekt "Allendorf"

Aus den kompletten Messreihen für die CO<sub>2</sub>- und Radonkonzentration aus Buermeyer (2017), Messobjekt "Allendorf", wurde nach dem VDI-Verfahren der zeitliche Verlauf der Quellstärke berechnet (Abbildung 24). Die Verteilung der Messwerte bzw. die Ergebnisse der Mittelung über verschiedene Zeitintervalle, wurden per Box-Plot in Abbildung 25 dargestellt. Als Median über die gesamte Messreihe ergab sich eine Quellstärke von  $Q_{Rn,V} = (331 \pm 47) \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ .

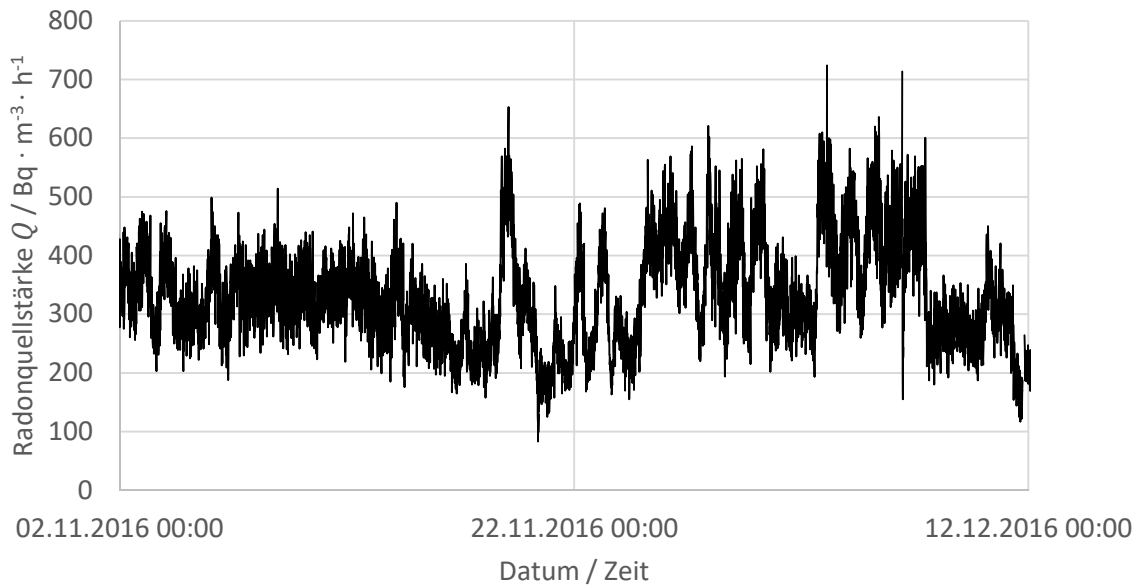


Abbildung 24: Nach dem VDI-Methode berechneter zeitlicher Verlauf der Radonquellstärke im Messobjekt "Allendorf".

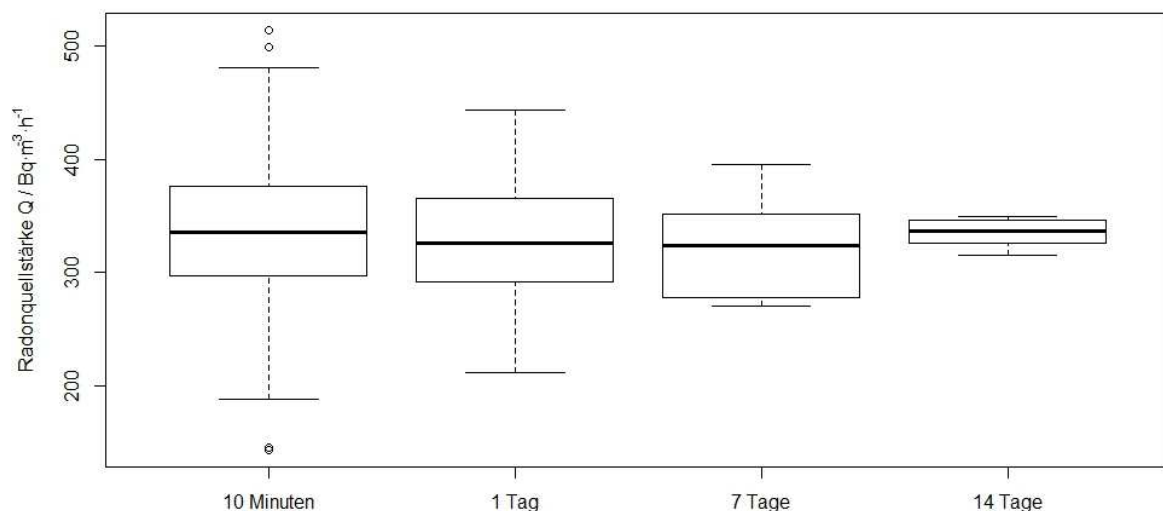


Abbildung 25: Über verschiedene Zeitintervalle (10 Minuten, 1 Tag, 7 Tage, 14 Tage) gemittelte Werte der Quellstärke nach dem VDI-Verfahren des Messobjekts "Allendorf" bei einer Gesamtmesszeit von etwa sechs Wochen. Die Boxen entsprechen dem Bereich, in dem 50% aller Werte liegen, die Antennen umschließen den 1,5-fachen Bereich bzw. stellen die Extremwerte dar wenn alle Werte in diesem Bereich enthalten sind. Werte außerhalb des 1,5-fachen Bereiches werden als Ausreißer ignoriert.

### 4.3 Anwendung des Differenzdruckverfahrens

In diesem Abschnitt wird die Durchführung des modifizierten Differenzdruck Messverfahrens an den verschiedenen Messorten behandelt.

Das modifizierte Differenzdruckverfahren (BD-Verfahren) wurde in beiden Objekten "Allendorf" und "Trohe" durchgeführt. Generell wurde im zu untersuchenden Volumen ein Unterdruck gegenüber der Außenluft erzeugt, der Betrag dieser Druckdifferenz wurde zwischen etwa 5 bis 50 Pa variiert. Die Berechnung der Unsicherheiten erfolgte gemäß der in Abschnitt 3.3.3.3 beschriebenen Methode.

#### 4.3.1 Ergebnisse Objekt "Trohe", Raum 1

In Messobjekt "Trohe", Raum 1 wurden unter Verwendung von sechs Druckstufen die verschiedenen Luftwechselraten anhand von Gleichung 8 berechnet. Gemeinsam mit der Radonkonzentration nach Eintritt der Sättigung wurde über Gleichung 9 die jeweilige Quellstärke ermittelt. Die aus den Messdaten resultierenden Ergebnisse finden sich in Tabelle 6.

Tabelle 6: Übersicht der durchgeführten Messreihe mit dem BD-Verfahren. Eingestellte und berechnete Größen für Messobjekt "Trohe", Raum 1.

Differenzdruck	Radonkonzentration	Luftwechselrate	Quellstärke
$\Delta p/\text{Pa}$	$c_{Rn}/\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	$k/\text{h}^{-1}$	$Q/\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$
7	92	19	1737
12	189	13	2411
19	144	28	4009
45	261	28	7183
48	248	29	7239
50	152	35	5329

In *Abbildung 26* wurden die errechneten Quellstärken gegen die eingestellte Druckdifferenz aufgetragen. Unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen den Größen kann über eine Extrapolation die Radonquellstärke bei  $\Delta p = 0$  zu einem Wert von  $Q = (994 \pm 606) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  bestimmt werden. Dies stellt die Radonquellstärke im normalen Nutzungszustand des Raums dar. In Raum 1 des Messobjekts "Trohe" wurde eine weitere Messreihe durchgeführt, diesmal mit geöffneter Außentür des Kellers. Diese wurden mit den Daten beider Messobjekte in "Trohe" verglichen, bei denen die Außentür des Kellers geschlossen blieb. Die berechneten Luftwechselraten sind in *Abbildung 27* gegen die eingestellte Druckdifferenz aufgetragen. Es zeigt sich ein systematischer Unterschied in Abhängigkeit vom Status dieser Tür. Plausibel ist nur ein funktioneller Zusammenhang von Luftwechselrate und

Druckdifferenz durch den Ursprung – eine Druckdifferenz von Null führt zwingend zu einer Luftwechselrate von Null. Während bei offener Tür hierbei ein linearer Zusammenhang abzuleiten ist, ist dies bei geschlossener Tür nicht der Fall. Zur Veranschaulichung wurden zwei Geraden an die Datenpunkte angepasst. Die Messdaten bei geschlossener Außentür scheinen auf einer Geraden mit einem Achsenabschnitt von  $14 \text{ h}^{-1}$  zu liegen, die parallel zur Ursprungsgeraden durch die Daten bei offener Außentür verläuft.

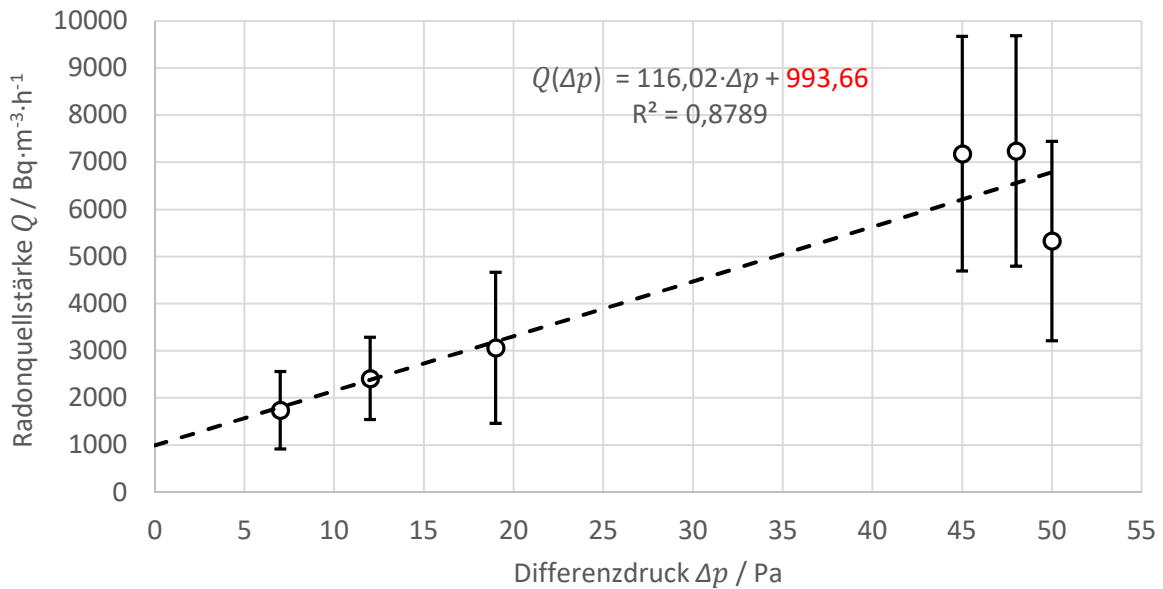


Abbildung 26: Radonquellstärke in Abhängigkeit vom eingestellten Differenzdruck (BD-Verfahren) in Messobjekt "Trohe", Raum 1. Die Kreise stellen die errechneten Quellstärken dar, die gestrichelte Linie ist eine lineare Anpassung an die Datenpunkte zur Ermittlung des Achsenabschnittes.

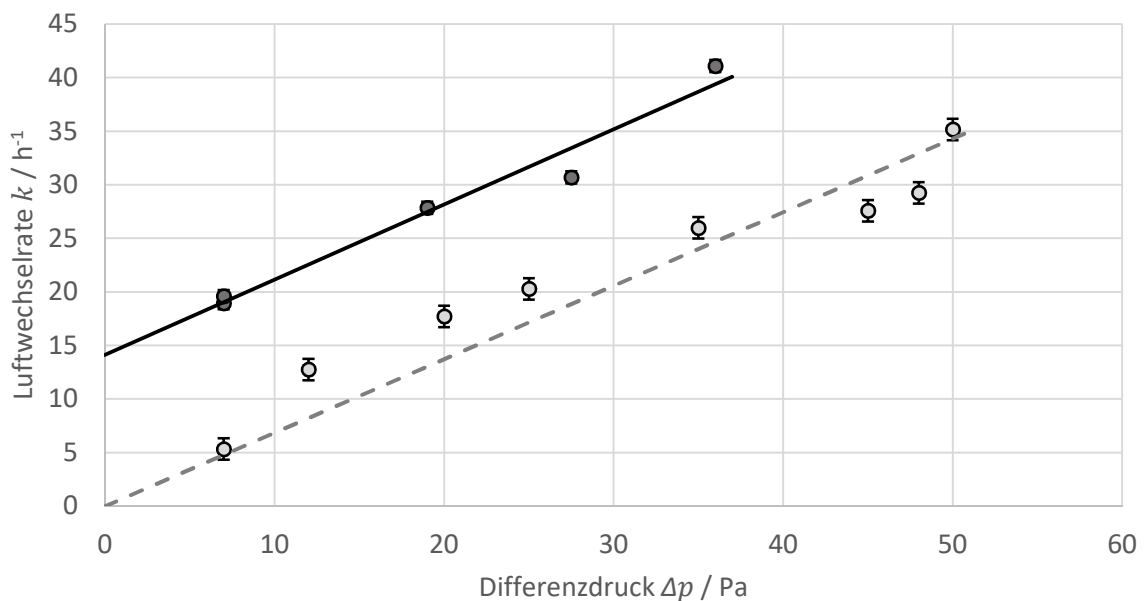


Abbildung 27: Luftwechselrate in Abhängigkeit vom eingestellten Differenzdruck (BD-Verfahren) in "Trohe", Raum 1 und Raum 2. Unterschieden werden Messungen mit offener (hellgraue Punkte) und geschlossener (dunkelgraue Punkte) Außentür. Zur besseren Veranschaulichung der Verläufe wurden zwei Gerade an die Daten angepasst (Linien).

### 4.3.2 Ergebnisse Objekt "Trohe", Raum 2

In Raum 2 des Objekts "Trohe" wurden die Luftwechselraten bei drei verschiedenen Druckdifferenzen ermittelt. Die Außentür des Kellers war bei allen Messungen geschlossen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 aufgelistet. Abbildung 28 zeigt die lineare Interpolation zum Ermitteln der Quellstärke bei  $\Delta p = 0$ . Die Extrapolation liefert eine Radonquellstärke von  $(4098 \pm 2909) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Tabelle 7: Eingestellte und berechnete Größen für Messobjekt "Trohe", Raum 1, BD-Verfahren

Differenzdruck	Radonkonzentration	Luftwechselrate	Quellstärke
$\Delta p/\text{Pa}$	$c_{Rn}/\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	$k/\text{h}^{-1}$	$Q/\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$
7	344	19	6737
27,5	323	31	9901
36	389	41	15972

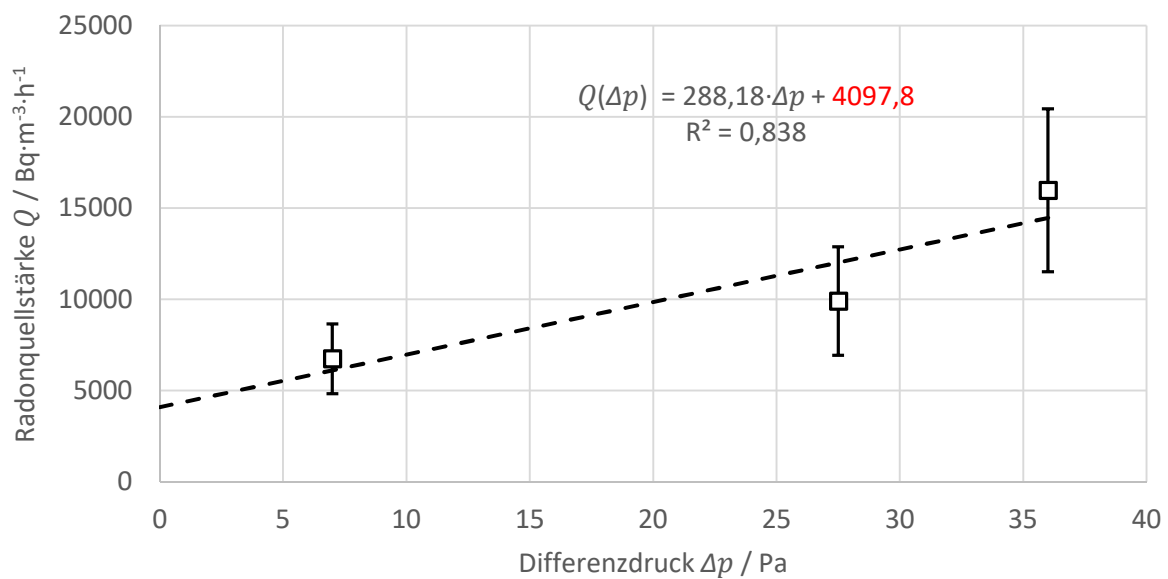


Abbildung 28: Radonquellstärke in Abhängigkeit vom eingestellten Differenzdruck (BD-Verfahren) in Messobjekt "Trohe", Raum 2. Die Quadrate stellen die errechneten Quellstärken dar, die gestrichelte Linie ist eine lineare Anpassung an die Datenpunkte zur Ermittlung des Achsenabschnittes.

### 4.3.3 Ergebnisse Objekt "Allendorf"

In Objekt "Allendorf" konnten lediglich Messdaten aus zwei unterschiedlichen Druckstufen (Tabelle 8) gewonnen werden.

Tabelle 8: Eingestellte und berechnete Größen für Messobjekt "Allendorf", BD-Verfahren

Differenzdruck	Radonkonzentration	Luftwechselrate	Quellstärke
$\Delta p/\text{Pa}$	$c_{Rn}/\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	$k/\text{h}^{-1}$	$Q/\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$
25	200	22	4472
60	453	40	18299

## 4.4 Anwendung des SAT-Verfahrens

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des SAT-Verfahrens, wie in Abschnitt 3.3.4 beschrieben, für die Messkampagnen in Messobjekt "Trohe" und "Allendorf", vorgestellt. Dabei wurden die Quellstärken sowohl durch Betrachtung von Auf-, als auch von Abbaukurven der Radonkonzentration ermittelt. Die beiden Methoden werden im Folgenden getrennt betrachtet. Die Berechnung der Unsicherheiten erfolgte gemäß der im Abschnitt 3.3.4.2 beschriebenen Methode. Das SAT-Verfahren wurde getrennt für die Datensätze der Messpunkte MP1 und MP3 durchgeführt. Konnte die Quellstärke anhand von beiden Messpunkten ermittelt werden, so wurden als Quellstärke für den Messabschnitt der Mittelwert angegeben. Zur Veranschaulichung wurde hier als Unsicherheit für den Einzelwert eines Messabschnittes auf die statistische Unsicherheit die Abweichung der Messwerte an den einzelnen Messpunkten vom Mittelwert addiert.

### 4.4.1 Ergebnisse Objekt "Trohe", Raum 1

Im Messobjekt "Trohe", Raum 1 wurde die Radonquellstärke anhand von sechs Abbaukurven berechnet. Dabei wurde im Raum zunächst durch Schließen von Fenstern und Türen eine erhöhte Radonkonzentration erreicht, die dann nach Ändern der Belüftungssituation zu einem Sättigungswert abfiel. Aufbaukurven konnten aufgrund der generell niedrigen Quellstärke nicht ausgewertet werden.

Im ersten Schritt wurden die Luftwechselraten nach Gleichung 11 aus dem exponentiellen Fit der Konzentrationskurve ermittelt. In Abbildung 29 sind die Ergebnisse für die Luftwechselraten, die anhand von Abbaukurven bestimmt wurden, dargestellt.

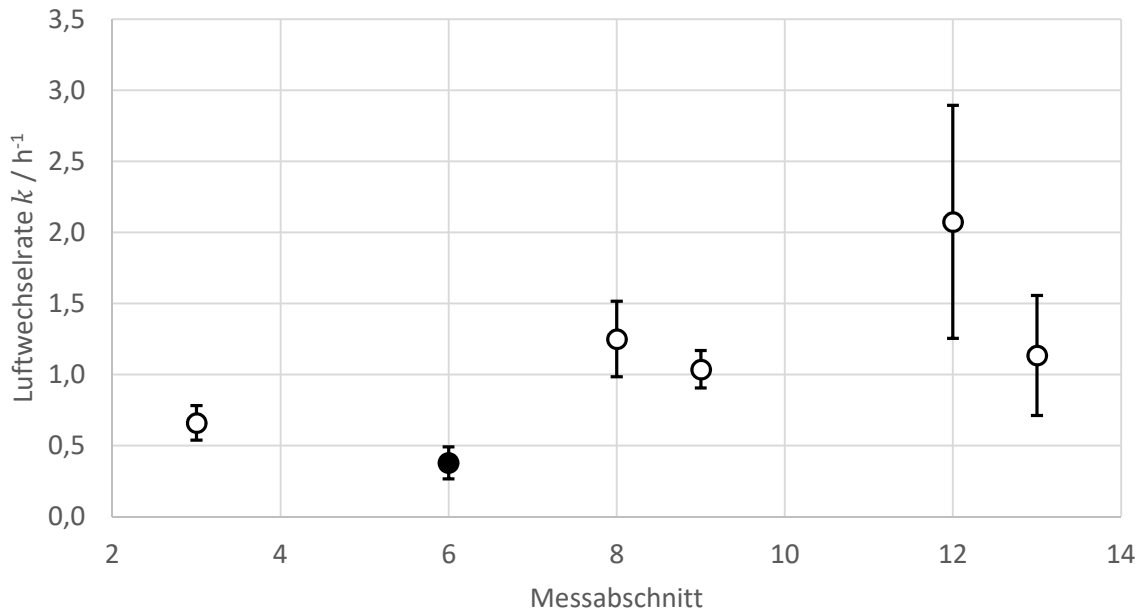


Abbildung 29: Ermittelte Luftwechselraten in "Trohe", Raum 1, anhand von Abbaukurven aus verschiedenen Messabschnitten (SAT-Verfahren). Zur Veranschaulichung beinhalten die abgebildeten Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Diskrepanz der Werte an den einzelnen Messpunkten. (Kreise: Raamtür offen, Punkt: Raamtür geschlossen)

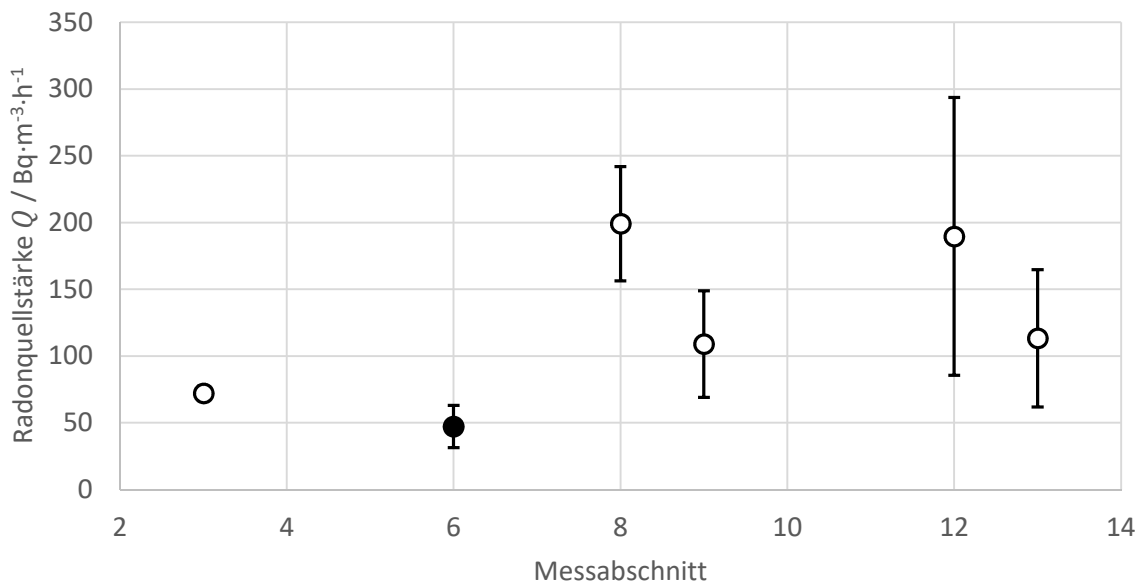


Abbildung 30: Ermittelte Radonquellstärken in "Trohe", Raum 1, anhand von Abbaukurven aus verschiedenen Messabschnitten (SAT-Verfahren). Zur Veranschaulichung beinhalten die abgebildeten Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Diskrepanz der Werte an den einzelnen Messpunkten. (Kreise: Raamtür offen, Punkt: Raamtür geschlossen)



Anhand der Luftwechselraten und der ebenfalls im Fit ermittelten Sättigungskonzentration des Radon, wurden die Quellstärken der einzelnen Messabschnitte nach Gleichung 12 bestimmt. Die aus den Abbaukurven ermittelten Quellstärken sind in Abbildung 30 dargestellt. Die errechneten Quellstärken liegen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten unter  $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ . Die Messpunkte streuen und stimmen innerhalb der Unsicherheit nicht immer miteinander überein. Es konnte nur ein Datenpunkt mit geschlossener Raamtür bestimmt werden. Er liegt leicht unterhalb der Werte, die bei offener Tür ermittelt wurden. Eine detaillierte systematische Untersuchung war anhand dieses Punktes nicht möglich. Die errechneten Quellstärken sind, zusammen mit den ermittelten Luftwechselraten, in Tabelle 9 aufgelistet. Als Median über alle Messungen wurde für Trohe, Raum 1, eine Radonquellstärke von  $(111 \pm 29) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  anhand von Abbaukurven ermittelt.

*Tabelle 9: Ergebnisübersicht der aus dem SAT-Verfahren ermittelten Radonquellstärken aus Abbaukurven. Messobjekt "Trohe", Raum 1. Zur Veranschaulichung beinhalten die Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Abweichung der Werte an den einzelnen Messpunkten. In der untersten Zeile steht der aus den jeweiligen Größen ermittelte Median.*

Nr.	Tür	Luftwechselrate	Quellstärke	$\Delta k/k$	$\Delta Q/Q$
		$k / \text{h}^{-1}$	$Q / \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$	in %	in %
3	offen	0,66	72	19	8
6	zu	0,38	47	30	34
8	offen	1,25	199	22	22
9	offen	1,04	109	13	37
12	offen	2,07	290	40	55
13	offen	1,13	113	38	46
<b>Ges.</b>		<b>1,09</b>	<b>111</b>	<b>26</b>	<b>26</b>

#### 4.4.2 Ergebnisse Objekt "Trohe", Raum 2

Im Messobjekt "Trohe", Raum 2 wurden elf Situationen, in denen sich die Radonkonzentration nach einer Belüftungsänderung aufbaut, und sechs Situationen mit einem Abbau betrachtet.

Entsprechend dem Vorgehen bei "Trohe", Raum 1 wurde zunächst die Luftwechselraten nach Gleichung 11 aus dem exponentiellen Fit der Konzentrationskurve ermittelt. In Abbildung 31 sind die Ergebnisse für die Luftwechselraten, die anhand von Aufbaukurven bestimmt wurden, dargestellt. Es fällt sofort auf, dass erwartungsgemäß die Luftwechselraten bei offener Tür deutlich oberhalb der Werte bei geschlossener Tür liegen. Die größten Messunsicherheiten stammen aus der Diskrepanz zwischen den Ergebnissen an den einzelnen Messpunkten, die insbesondere bei geöffneter Tür signifikant ist. Anhand dieser Luftwechselraten und der ebenfalls im Fit ermittelten Sättigungskonzentration des

Radon, wurden die Quellstärken der einzelnen Messabschnitte nach Gleichung 12 bestimmt. Die aus den Aufbaukurven ermittelten Quellstärken sind in Abbildung 32 dargestellt. Die Quellstärken sind im Vergleich zu denen in "Trohe", Raum 1 ermittelten Quellstärken mit Werten inklusive Unsicherheiten von ca. 500 bis 3700 Bq·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup> relativ hoch.

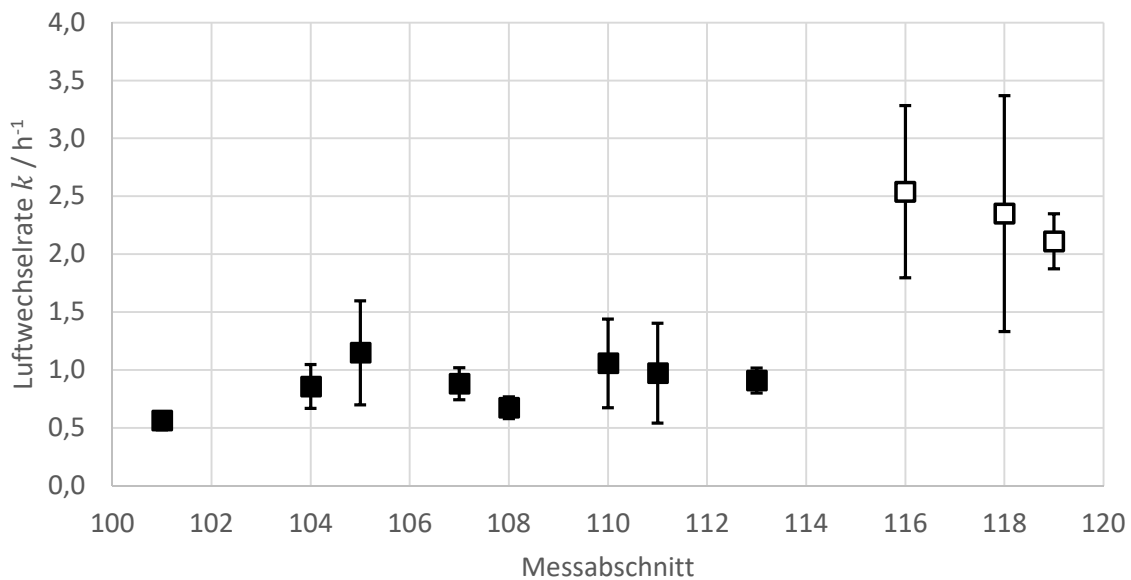


Abbildung 31: Ermittelte Luftwechselraten in "Trohe", Raum 2, anhand von Aufbaukurven aus verschiedenen Messabschnitten (SAT-Verfahren). Zur Veranschaulichung beinhalten die abgebildeten Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Diskrepanz der Werte an den einzelnen Messpunkten.

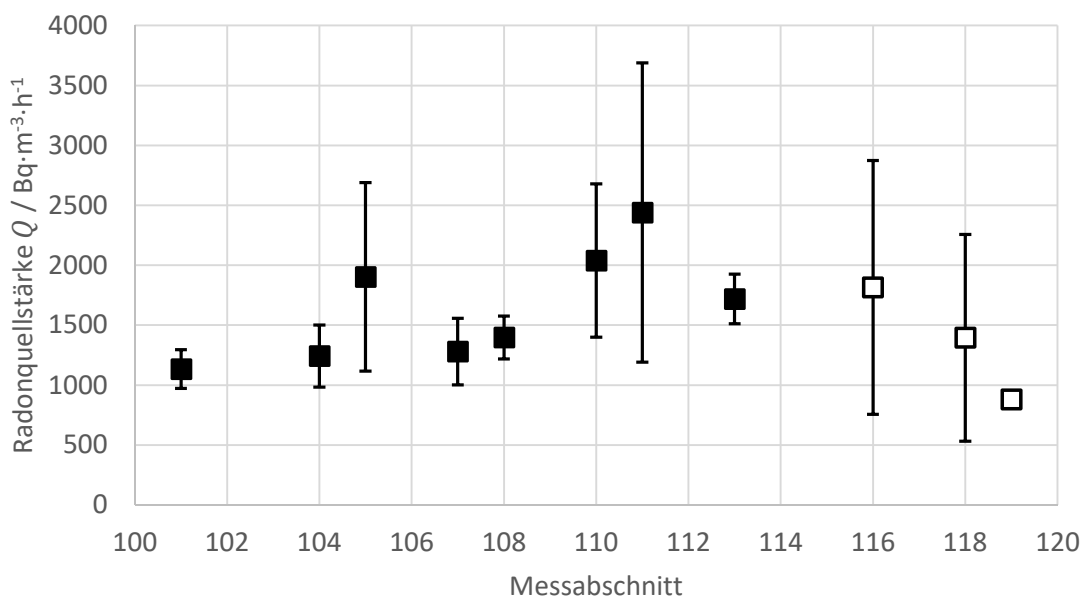


Abbildung 32: Ermittelte Radonquellstärken in "Trohe", Raum 2, anhand von Aufbaukurven aus verschiedenen Messabschnitten (SAT-Verfahren). Zur Veranschaulichung beinhalten die abgebildeten Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Diskrepanz der Werte an den einzelnen Messpunkten.

Analog wurden die Radonquellstärken einzelner Messabschnitte anhand von Abbaukurven bestimmt. Die dafür ermittelten Luftwechselraten finden sich in Abbildung 33. Alle Messungen wurden bei geöffneter Raamtür durchgeführt und die Luftwechselraten liegen zwischen ca 0,5 und 4 h<sup>-1</sup>. Die letztendlich berechneten Quellstärken sind in Abbildung 34 aufgetragen. Sie streuen inklusive Unsicherheiten zwischen ca. 150 und 1900 Bq·m<sup>-3</sup>·h<sup>-1</sup>.

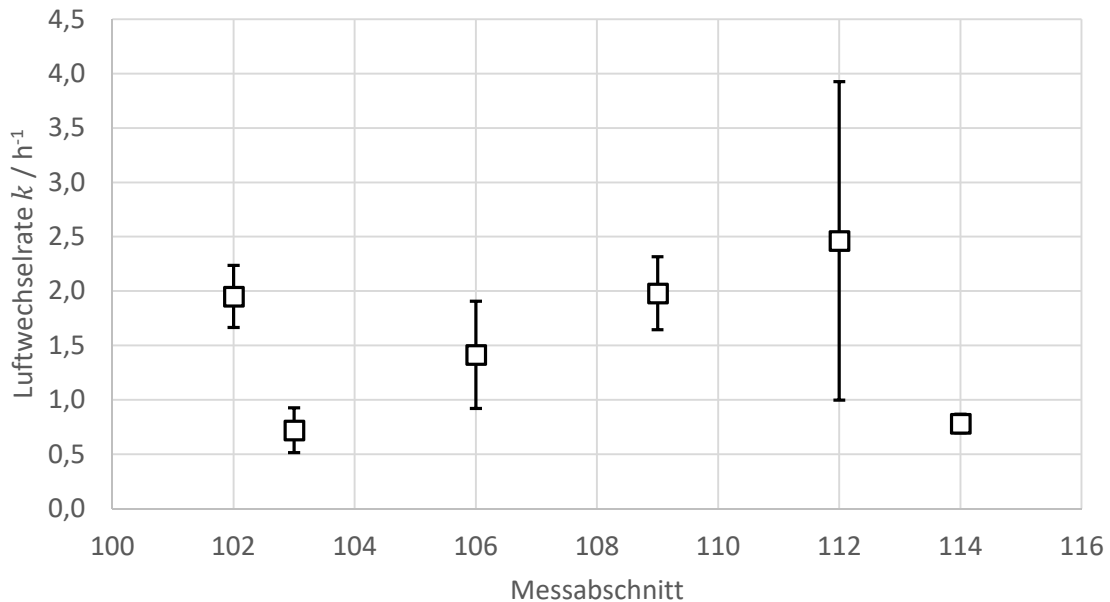


Abbildung 33: Ermittelte Luftwechselraten in "Trohe", Raum 2, anhand von Abbaukurven aus verschiedenen Messabschnitten (SAT-Verfahren). Zur Veranschaulichung beinhalten die abgebildeten Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Diskrepanz der Werte an den einzelnen Messpunkten.

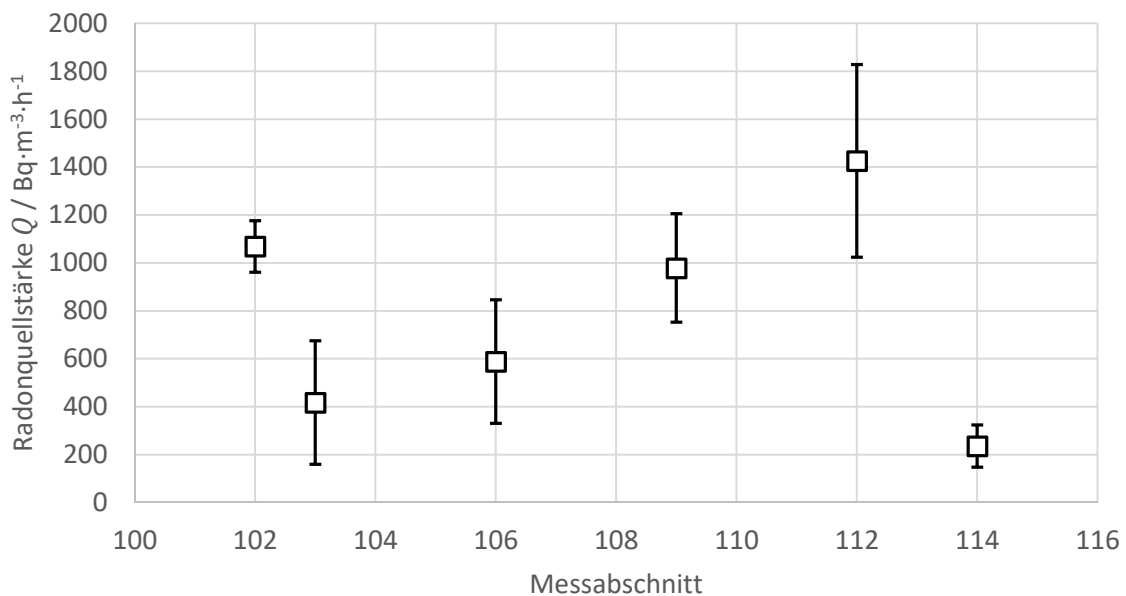


Abbildung 34: Ermittelte Radonquellstärken in "Trohe", Raum 2, anhand von Abbaukurven aus verschiedenen Messabschnitten, SAT-Verfahren. Zur Veranschaulichung beinhalten die abgebildeten Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Diskrepanz der Werte an den einzelnen Messpunkten.

Auch für dieses Messobjekt wurden die Datensätze der Messpunkte MP1 und MP3 getrennt ausgewertet und letztendlich ein Mittelwert gebildet. Die errechneten Quellstärken für "Trohe", Raum 2 aus Aufbaukurven (Tür zu) und Abbaukurven (Tür auf) sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10: Ergebnisübersicht der aus dem SAT-Verfahren ermittelten Radonquellstärken aus Auf- und Abbaukurven. Messobjekt "Trohe", Raum 2. Zur Veranschaulichung beinhalten die tabellierte Unsicherheiten gegebenenfalls auch die Diskrepanz der Werte an den einzelnen Messpunkten. In den beiden untersten Zeilen stehen die Mediane über die Werte der Auf- bzw. Abbaukurven.

Nr.	Tür	Luftwechselrate	Quellstärke	$\Delta k/k$	$\Delta Q/Q$
		$k /h^{-1}$	$Q /Bq \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$	in %	in %
101	zu	0,56	1133	15	11
102	offen	1,95	1069	15	62
103	offen	0,72	430	29	29
104	zu	0,86	1257	23	22
105	zu	1,15	1921	40	22
106	offen	1,41	612	35	19
107	zu	0,88	1294	16	27
108	zu	0,67	1408	14	22
109	offen	1,98	1012	17	16
110	zu	1,06	2057	45	23
111	zu	0,97	2456	12	15
112	offen	2,46	1467	60	17
113	zu	0,91	1733	12	13
114	offen	0,78	249	11	15
116	offen	2,54	1857	30	34
118	offen	2,35	1434	44	53
119	offen	2,11	881	12	7
<b>Aufbau</b>		<b>0,97</b>	<b>1397</b>	<b>23</b>	<b>22</b>
<b>Abbau</b>		<b>1,68</b>	<b>783</b>	<b>23</b>	<b>33</b>

Für die Radonquellstärken der einzelnen Messabschnitte der Messpunkte wurde ein Mittelwert berechnet, und aus den Werten für Auf- und Abbaukurven wiederum ein Median. Damit wurde für "Trohe", Raum 2 eine Radonquellstärke von  $(1397 \pm 308) Bq \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$  anhand der Aufbaukurven und durch Betrachtung der Abbaukurven von  $(783 \pm 259) Bq \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$ . Die Werte unterscheiden sich deutlich und stimmen innerhalb der Unsicherheit nicht überein.

#### 4.4.3 Ergebnisse Objekt "Allendorf"

Eine Auswertung der Messdaten aus Messobjekt mit dem SAT-Verfahren war nicht möglich.

#### 4.5 Vergleich der verschiedenen Verfahren

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse der vier verschiedenen Verfahren verglichen werden. Eine Interpretation der Unterschiede sowie eine abschließende Bewertung findet sich in Abschnitt 5.

##### 4.5.1 Vergleich des DIF- und des VDI-Verfahrens

Zum Vergleich des zeitlichen Auflösungsvermögens des VDI-Verfahrens und des DIF-Verfahrens dient der gleiche Datensatz, mit dem zuvor schon die Messwertverarbeitung des VDI-Verfahrens erprobt und dargestellt wurde. Abbildung 35 zeigt im Vergleich die zeitlichen Verläufe der Quellstärken nach dem VDI-Verfahren und dem DIF-Verfahren. Auf die Darstellung von wenigen Ausreißern bis knapp 10 000  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  wurde verzichtet.

Es fällt auf, dass beide Verfahren einen identischen Verlauf der Quellstärke zeigen. Die Unterschiede liegen nur im Detail. Das VDI-Verfahren hat einen etwas stabileren Verlauf und zeigt weniger Rauschen. Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass die zeitliche Abbildung des Verlaufs mit dem VDI-Verfahren gleichermaßen, gegebenenfalls sogar besser, als mit dem DIF-Verfahren gelingt, da plötzliche starke Schwankungen der Quellstärke auf kurzen Zeitskalen als nicht plausibel erachtet und am Ende, beispielweise durch ein Glättungsverfahren, entfernt werden.

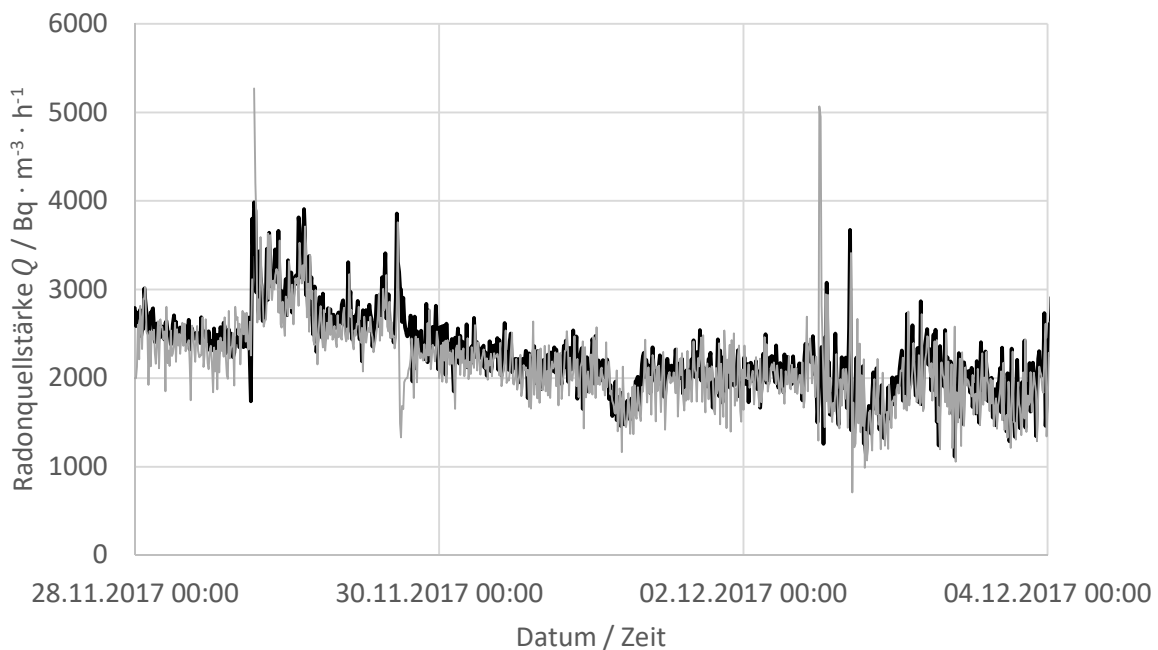


Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf der Radonquellstärke im Objekt "Trohe", Raum 2. Die schwarze Linie stellt den Quellstärkenverlauf nach dem VDI-Verfahren dar, die graue Linie die Ergebnisse des DIF-Verfahrens.

## 4.5.2 Vergleich der Ergebnisse aller angewandten Verfahren

Im Folgenden sind in einer Box-Plot-Darstellung der Median, die Quantile sowie Minimum und Maximum der Werte aller angewandter Verfahren dargestellt. Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse für "Trohe", Raum 1, Abbildung 37 für "Trohe", Raum 2. Die Ergebnisse des DIF- und des VDI-Verfahrens beinhalten alle errechneten Quellstärken. In den Ergebnissen des SAT-Verfahrens wurden nur die Aufbaukurven berücksichtigt, bei denen die Tür zur Veränderung des Belüftungszustandes geschlossen wurde.

Vergleicht man die Ergebnisse des DIF- und des SAT-Verfahrens, die beide nur eine geringe Streuung aufweisen, so findet man für Messobjekt "Trohe", Raum 1, eine Radonquellstärke von unter  $500 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ . Dieser Wert wird vom VDI-Verfahren unterstützt, das lediglich aufgrund seiner großen Unsicherheit durch die Streuung der Messwerte auch einen Wert bis zu  $700 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  zulässt. Das Ergebnis des BD-Verfahrens fällt mit fast  $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  etwas aus der Reihe, stimmt aber im Rahmen seines relativ großen Fehlerbereichs mit den Ergebnissen der anderen Verfahren überein.

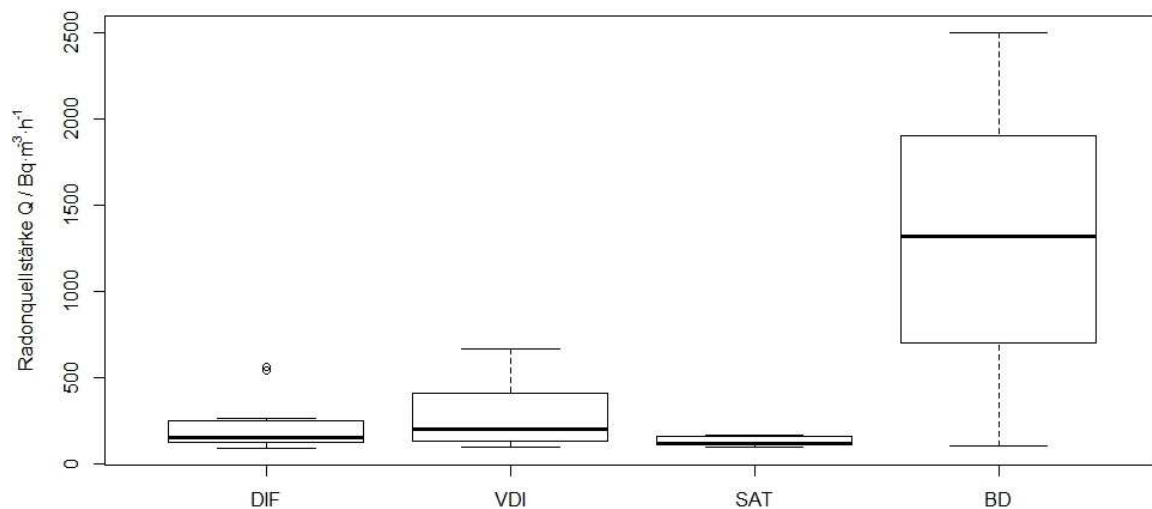


Abbildung 36: Vergleich der Ergebnisse für die errechnete Radonquellstärke der Verfahren DIF, VDI, SAT und BD für "Trohe", Raum 1. Die Boxen entsprechen dem Bereich, in dem 50% aller Werte liegen, die Antennen umschließen den 1,5-fachen Bereich bzw. stellen die Extremwerte dar, wenn alle Werte in diesem Bereich enthalten sind. Werte außerhalb des 1,5-fachen Bereichs werden als Ausreißer ignoriert. Der Box-Plot des BD-Verfahrens stellt mit seinen Antennen die berechneten Unsicherheiten dar, die Box entspricht der 50%-Unsicherheit des ermittelten Wertes.

Die Ergebnisse zu "Trohe", Raum 2, liegen im Vergleich zu Raum 1 insgesamt näher zusammen. Das DIF- und das VDI-Verfahren liefern weitgehend übereinstimmende Werte ähnlicher Streuung im Bereich von  $1500$  bis  $3000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ . Die Ergebnisse des SAT-Verfahrens liegen im Schnitt etwa  $1000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  niedriger, stimmen im Rahmen der Unsicherheit aber mit den Werten der beiden anderen Verfahren überein. Ähnlich wie bei "Trohe", Raum 1, liegen auch hier die Ergebnisse des BD-

Verfahrens deutlich oberhalb der anderen Verfahren. Im Mittel ergibt sich hier ein Wert von größer als  $4000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ . Die Unsicherheit dieses Wertes ist wiederum so groß, dass die Ergebnisse des BD-Verfahrens im Rahmen der Unsicherheit immer noch mit den Ergebnissen der anderen Verfahren übereinstimmen.

Im Vergleich der Ergebnisse der Verfahren untereinander ist eine Varianz der Werte zu beobachten, die in ihrer Größe nicht durch die Fehlerrechnung gedeckt ist. Diese systematischen Fehlerquellen werden in Abschnitt 5 diskutiert.

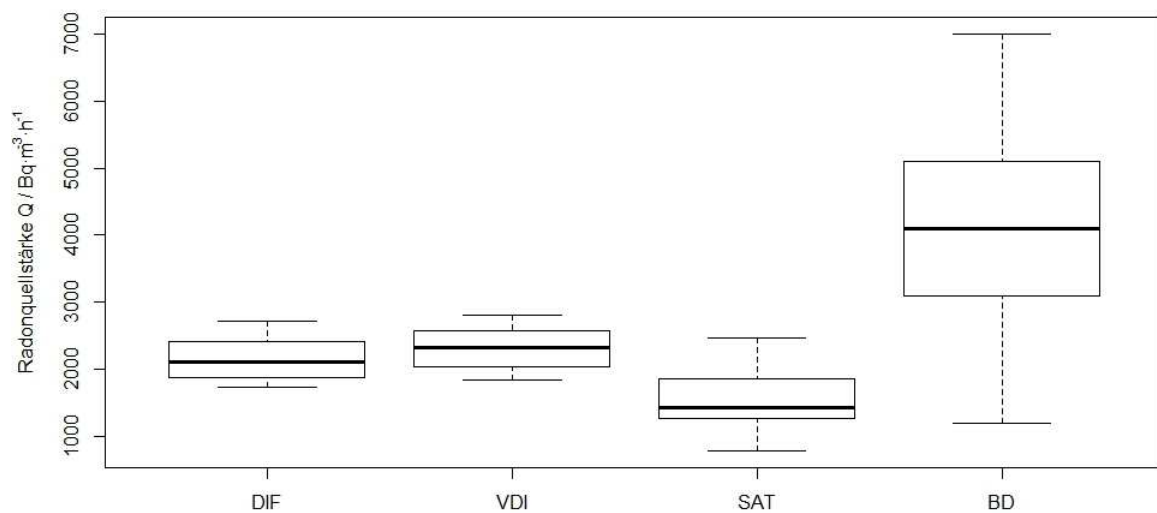


Abbildung 37: Vergleich der Ergebnisse für die errechnete Radonquellstärke der Verfahren DIF, VDI, SAT und BD für "Trohe", Raum 2. Die Boxen entsprechen dem Bereich, in dem 50% aller Werte liegen, die Antennen umschließen den 1,5-fachen Bereich bzw. stellen die Extremwerte dar, wenn alle Werte in diesem Bereich enthalten sind. Werte außerhalb des 1,5-fachen Bereichs werden als Ausreißer ignoriert. Der Box-Plot des BD-Verfahrens stellt mit seinen Antennen die berechneten Unsicherheiten dar, die Box entspricht der 50%-Unsicherheit des ermittelten Wertes.

Für Messobjekt "Allendorf" existieren nur Ergebnisse des DIF- und des VDI-Verfahrens. Die beiden Werte von  $(337\pm 54) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  und  $(331\pm 47) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$  stimmen im Rahmen der statistischen Unsicherheit gut überein. Allerdings unterscheiden sich die beiden Verfahren in der Praxis weniger voneinander als das SAT- und das BD-Verfahren. Eine gute Übereinstimmung der beiden Verfahren anhand der vorher beschriebenen Ergebnisse für die Messobjekte "Trohe" war für das Messobjekt "Allendorf" zu erwarten.

### 4.5.3 Vergleich der Verfahren unter BD-Bedingungen

Der große Unterschied zwischen dem BD-Verfahren und den anderen Verfahren liegt in der Berechnung der Luftwechselrate. Die mit dem BD-Verfahren ermittelte Luftwechselrate sollte deswegen exemplarisch mit den Werten aus dem VDI-Verfahren verglichen werden. Hierfür wurde eine zusätzliche Messreihe erstellt, in der zusätzlich zum Messaufbau für das BD-Verfahren mit einer konstanten Rate  $\text{CO}_2$  in den zu untersuchenden Raum injiziert wurde. Um die  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Raum zu bestimmen, wurde diese in der Abluft des BD-Ventilators gemessen. Die hieraus per VDI-Verfahren ermittelten Werte der Luftwechselrate, sowie die sich aus den Werten der beiden Verfahren ergebenden Quellstärken sind Tabelle 11 und Abbildung 38 zu entnehmen.

Tabelle 11: Berechnete Luftwechselraten bei verschiedenen Druckdifferenzen in "Trohe", Raum 1, ermittelt mit den Verfahren VDI, SAT ( $\text{CO}_2$ ) und BD.

Druckdifferenz $\Delta p$ / Pa	Ermittelter Median		VDI-Verfahren		BD-Verfahren		SAT-Verfahren
	$c(\text{CO}_2)$	$c_{\text{RN}} / \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$	$k / \text{h}^{-1}$	$Q / \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$	$k / \text{h}^{-1}$	$Q / \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$	$k / \text{h}^{-1}$ mit $c(\text{CO}_2)$
7	1035	235	<b>8,84</b>	<b>1930</b>	5,3	1248	4,6
20	742	399	<b>17,30</b>	<b>6614</b>	18	7187	
25	825	628	<b>13,63</b>	<b>8325</b>	20	12558	12,7
35	1064	768	<b>8,43</b>	<b>6332</b>	26	19971	
50	1749	1325	<b>4,03</b>	<b>5272</b>	35	46359	

Es fällt sofort eine große Diskrepanz der Quellstärken ab einer Druckdifferenz von 20 Pa auf. Die gemessene Radonkonzentration ist bei diesen Messungen ähnlich, sodass sich der Unterschied vollständig auf die verschiedenen Luftwechselraten zurückführen lässt. Um einen weiteren Vergleich zu ermöglichen, wurde anhand von zwei Verläufen der  $\text{CO}_2$ -Konzentration die Luftwechselrate zusätzlich mit dem SAT-Verfahren ermittelt. Auch diese Ergebnisse finden sich zum Vergleich in Tabelle 11 und Abbildung 38. Bei einem Druck von 7 Pa stimmen die Luftwechselraten aller drei Verfahren weitgehend überein. Auch bei 20 Pa liefern das VDI- und das BD-Verfahren noch einen ähnlichen Wert. Ab einer



Druckdifferenz von 25 Pa liegen die mit dem BD-Verfahren bestimmten Luftwechselraten deutlich oberhalb der mit dem VDI-Verfahren ermittelten Werte. Die Luftwechselrate, die bei 25 Pa mit dem SAT-Verfahren bestimmt wurde, stimmt mit dem Wert des VDI-Verfahrens überein und weist auf eine Überschätzung der Luftwechselrate durch das BD-Verfahren hin.

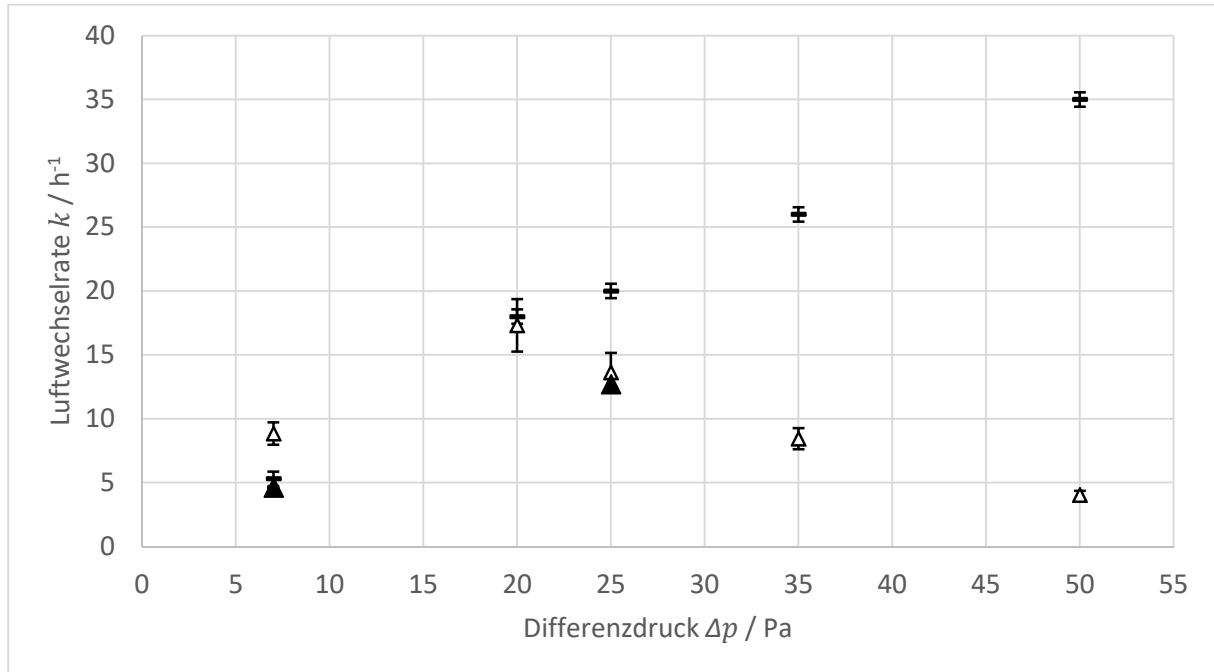


Abbildung 38: Berechnete Luftwechselrate in Abhängigkeit vom eingestellten Differenzdruck. Vergleich verschiedener Verfahren am Messobjekt "Trohe" Raum 1 und Raum 2. Dreieck-Rahmen: VDI, ausgefülltes Dreieck: SAT, waagrechter Strich: BD.

## 5 Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus Abschnitt 4 analysiert und bewertet. Dabei werden zunächst die verschiedenen Mess- und Berechnungsverfahren diskutiert und anschließend die Ergebnisse für die einzelnen Messobjekte.

### 5.1 Erprobung und Vergleich der Verfahren

Mit Abbildung 35 lässt sich das zeitliche Auflösungsvermögen des **VDI- und des DIF-Verfahrens** anhand eines exemplarischen Zeitabschnittes vergleichen. Beide Verfahren zeigen einen ähnlichen Verlauf der Quellstärke, die Unterschiede sind klein. Das VDI-Verfahren hat einen im Vergleich stabileren Verlauf und zeigt weniger Rauschen und die zeitliche Abbildung des Verlaufs der Werte aus dem VDI-Verfahren gelingt besser als mit denen des DIF-Verfahrens. Werden die Werte des Radonquellstärkenverlaufs über wenige Stunden gemittelt, sind diese im Rahmen der Messunsicherheiten gleich. Tabelle 12 zeigt die einzelnen Zeitabschnitte aus "Trohe", Raum 1. Neben dem Quotienten aus den Werten der beiden Verfahren ist auch die Zeitspanne aufgeführt, über die der jeweilige Messabschnitt gemessen wurde.

Unabhängig von der Dauer der Messung stimmen die Werte beider Verfahren innerhalb einer errechneten Messunsicherheit von nicht mehr als 14% überein. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse ist der gesteigerte Aufwand des DIF-Verfahrens, der Berechnung über Differenzgleichung mit anschließende Reduzierung des Rauschens mittels Glättung, nicht gerechtfertigt. Das VDI-Verfahren kann ohne die Zuhilfenahme einer Statistiksoftware wie „R Project“ mittels einer einfachen Tabellenkalkulation gerechnet werden und ist dabei deutlich einfacher und transparenter in der Durchführung und Archivierung. Im Folgenden werden deshalb als Methode zur kontinuierlichen Ermittlung der Radonquellstärke nur noch die Ergebnisse des VDI-Verfahrens mit denen der diskontinuierlichen Verfahren BD und SAT diskutiert.

*Tabelle 12: Vergleich der Ergebnisse aus VDI- und DIF-Verfahren anhand von "Trohe", Raum 1, an den einzelnen Messabschnitten.*

Nr.	Zeitspanne / h	$Q_{VDI}/Q_{DIF}$
1	48	0,96
2	20	1,02
3	51	1,03
4	3	0,96
5	19	0,89
6	4	1,02
7	23	0,89
8	39	1,04
9	11	1,01
10	20	1,01
11	4	1,06
<b>Ges.</b>	<b>233</b>	<b>0,96</b>

Um die Verfahren VDI, BD und SAT vergleichen zu können, wurden auch für die Daten des VDI-Verfahrens Zeitabschnitte mit verhältnismäßig stabiler Lüftungssituation mit einer Zeitspanne von 4 bis 51 h ausgewertet (siehe auch Tabelle 4 und Tabelle 5). Die Medianwerte dieser Zeitabschnitte sind zusammen mit denen der Verfahren SAT und BD in den Abbildung 36 und Abbildung 37 als Boxplot-Diagramme der Werte aus "Trohe", Raum 1 und 2 dargestellt. Auffällig ist zunächst die hohe Unsicherheit des BD-Verfahrens, die lediglich eine sehr grobe Einschätzung der Radonsituation erlaubt. Ansonsten sind die Ergebnisse aufgrund der Schwankungsbreite innerhalb einer Methode nicht methodenspezifisch zu unterscheiden. Präzisere Aussagen sind mit den Methoden VDI und SAT zu machen,

jedoch sind auch hier die zu beobachtenden Schwankungsbreiten nicht von den Ergebnissen der Messunsicherheitsabschätzung gedeckt. Sie geht über die statistisch berechneten Grenzen hinaus. Augenscheinlich kommen weitere systematische, zeitveränderliche Störeinflüsse zum Tragen. Die Diskussion möglicher Störeinflüsse erfolgt nachfolgend im Rahmen der Charakterisierung der Messobjekte hinsichtlich ihrer Radonsituation (Abschnitt 5.2).

Die Herausforderung bei der Durchführung des **SAT-Verfahrens** ist vor allem, möglichst stabile Luftwechselsituationen zu erreichen, denen ein abrupter, sprunghafter Wechsel der Luftwechselrate vorausgegangen ist. Gerade wenn die Radonquellstärke klein ist, gelingt dies am ehesten mit der Durchführung einer gründlichen Stoßlüftung mit Außenluft, um anschließend eine geringe Luftwechselrate, gegebenenfalls deutlich unter  $1 \text{ h}^{-1}$ , durch schnelles Schließen der Türen/Fenster anzustreben. Auch die Ergebnisse des SAT-Verfahrens für die Radonquellstärke sind davon beeinflusst, welche Radonkonzentration die Zuluft des Luftwechsels tatsächlich besitzt. Bezieht der betrachtete Raum statt von außen seine Luft von einem anderen Raum des Gebäudes, kann die Quellstärke des Raums überschätzt werden und zeigt sich abhängig von der Höhe der Luftwechselrate (siehe Ergebnisse zu "Trohe" Raum 1, Abbildung 29 und Abbildung 30).

Die **BD-Methode** setzt das zu untersuchende Objekt unter extreme, nicht praxisnahe Bedingungen. Das zeigt auch eine weitere Beobachtung, die bei der Untersuchung des Messobjekts "Trohe", Raum 1, gemacht wurde (siehe Abschnitt 4.3.1 bzw. Abbildung 26). Steht während der Durchführung der BD-Messung zusätzlich zu recht kleinen Kellerfenstern außerhalb des zu untersuchenden Raums die Außentür des Kellers geöffnet, zeigen Druckdifferenz und Luftwechselrate einen plausiblen funktionalen Zusammenhang, nämlich linear und durch den Ursprung gehend. Dies ist nicht der Fall, wenn die Außentür geschlossen ist. Zwar zeigt sich der Zusammenhang der Größen ebenfalls linear, aber mit einem positiven Achsenabschnitt. Bei einer Druckdifferenz von Null ergäbe sich ein erheblicher Luftwechsel von etwa  $15 \text{ h}^{-1}$ . Die aus dem zu untersuchenden Raum geförderte Luft sorgt, wenn diese nicht mit ausreichend geringem Widerstand ins Freie entweichen kann, für einen Staudruck im Keller und Treppenhaus des Gebäudes. Der für das BD-Verfahren maßgebliche Wert der Druckdifferenz zwischen Innen und Außen wird diesseits und jenseits des Ventilators ermittelt. Aufgrund des besagten Staudrucks entspricht dieser Messwert aber nicht dem Druck, mit dem Außenluft in den Raum gedrückt wird. Auch könnte die Ermittlung des Volumenstroms, die durch Nutzung des Venturi-Prinzips ebenfalls in Form der Messung einer Druckdifferenz erfolgt, von dem Vorhandensein des Staudrucks beeinflusst sein. In welchem Maße dies der Fall ist, konnte jedoch nicht ermittelt werden. Die Werte aus Messobjekt "Trohe", Raum 1, die bei geschlossener Außentür erfasst wurden, werden daher nicht für die Charakterisierung des Objekts herangezogen. Die BD-Messungen für "Trohe", Raum 2, erfolgten stets bei geschlossener Außentür und führten so zu einer möglichen Überschätzung der Werte für Luftwechselrate und Quellstärke. Im Objekt "Allendorf" wurde ebenfalls in das Treppenhaus des Gebäudes

und lediglich über ein kleines Fenster entlüftet. Die Nichtplausibilität der Ergebnisse lässt sich auch hier möglicherweise mit einem Staudruck hinter dem Ventilator erklären.

Auch das BD-Verfahren wurde jeweils nur auf einen einzelnen Raum angewendet, um die Ergebnisse mit denen der anderen Verfahren vergleichen zu können. Prinzipiell lässt sich das BD-Verfahren ohne zusätzlichen messtechnischen Aufwand auch auf komplexere Keller, Wohnräume oder ganze Häuser ausdehnen. Unter Berücksichtigung der Beobachtung, dass die Quellstärke durch die extremen Druckverhältnisse veränderlich ist, ist sicherzustellen, dass alle Räume des zu untersuchenden Volumens mit dem gleichen Unterdruck beaufschlagt und gleichermaßen mit Frischluft durchströmt werden.

In Ergänzung zu der Erprobung der einzelnen Verfahren wurde die **Kombination aller drei Verfahren** VDI, SAT und BD untersucht, um die verschiedenartig ermittelten Werte für die Luftwechselrate zu vergleichen. Dabei wurde auch unter den erhöhten Druckbedingungen des BD-Verfahrens mittels VDI-Verfahren die Luftwechselrate anhand der CO<sub>2</sub>-Konzentration bestimmt. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration wird zusätzlich zur Radonkonzentration in der Fortluft des BD-Ventilators gemessen. Die sprunghafte Änderung der Druckdifferenz und damit der Luftwechselrate ermöglicht zusätzlich die Anwendung des SAT-Verfahrens. Die Ergebnisse der Messungen bei fünf verschiedenen Druckdifferenzen und über insgesamt etwa 10 Stunden sind in Abschnitt 4.5.2 beschrieben.

Liefern die drei Verfahren bei geringen Druckdifferenzen noch vergleichbare Werte, laufen die Werte des VDI- und des BD-Verfahrens ab einer Druckdifferenz von 25 Pa zunehmend auseinander. Für die beiden größten Druckdifferenzen waren keine Werte mit dem SAT-Verfahren ermittelbar. Während die BD-Werte plausibel proportional mit der Druckdifferenzen steigen, fallen die des VDI-Verfahrens deutlich ab. Ermittelt wird demnach oberhalb einer Druckdifferenz von 20 Pa bei steigender Druckdifferenz eine sinkende Luftwechselrate. Erklärlich wird dieses Phänomen, wenn beachtet wird, dass die Fortluft bei dieser Untersuchung nicht ins Freie gefördert wird, sondern in den Flur des Kellers. Wenn nun der untersuchte Raum nicht dicht gegenüber dem Flur ist (wegen des Alters des Gebäudes in Trohe von über 100 Jahren ist dies sehr wahrscheinlich), wird wegen des Druckunterschieds diese CO<sub>2</sub>-reiche Luft zurück in den Raum gefördert. Ermitteln lässt sich die Luftwechselrate aber nur, wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Zuluft gering und bekannt ist. Mit erhöhten CO<sub>2</sub>-Werten in der Zuluft wird eine zu geringe Luftwechselrate berechnet. Ein weiteres Indiz für diesen Umstand liefern die Werte der Radonkonzentration, die sich ebenfalls nicht plausibel zu den mit dem BD-Verfahren ermittelten Luftwechselraten verhalten und ebenfalls mit einem „Kurzschluss“ der abzuführenden Luft erklärbar sind. Dieser Kurzschluss ist kein Problem für die Ermittlung der Luftwechselraten per BD, wohl aber für die Berechnung der Quellstärke und wird durch die Bildung eines Staudrucks hinter dem Ventilator noch verstärkt. Die Konsequenz hieraus wird in Abschnitt 5.2 mit der Charakterisierung der Messobjekte diskutiert.

## 5.2 Charakterisierung der Messobjekte

Für Messobjekt "Trohe", Raum 1, wurden mittels des VDI-Verfahrens zwei Klassen von Luftwechselraten ermittelt, die dadurch gekennzeichnet waren, ob die Tür zum Flur geschlossen oder offen war (Abbildung 17). Die aus den Luftwechselraten ermittelten Quellstärken lassen sich nach dem gleichen Prinzip ebenfalls in zwei Klassen unterteilen (Abbildung 18). Sowohl die Klassenbildung der Werte der Luftwechselraten als auch die Abhängigkeit der Quellstärke von der Luftwechselrate veranschaulicht Abbildung 39. Bestätigt wird diese Beobachtung auch durch die Ergebnisse des SAT-Verfahrens (Tabelle 9).

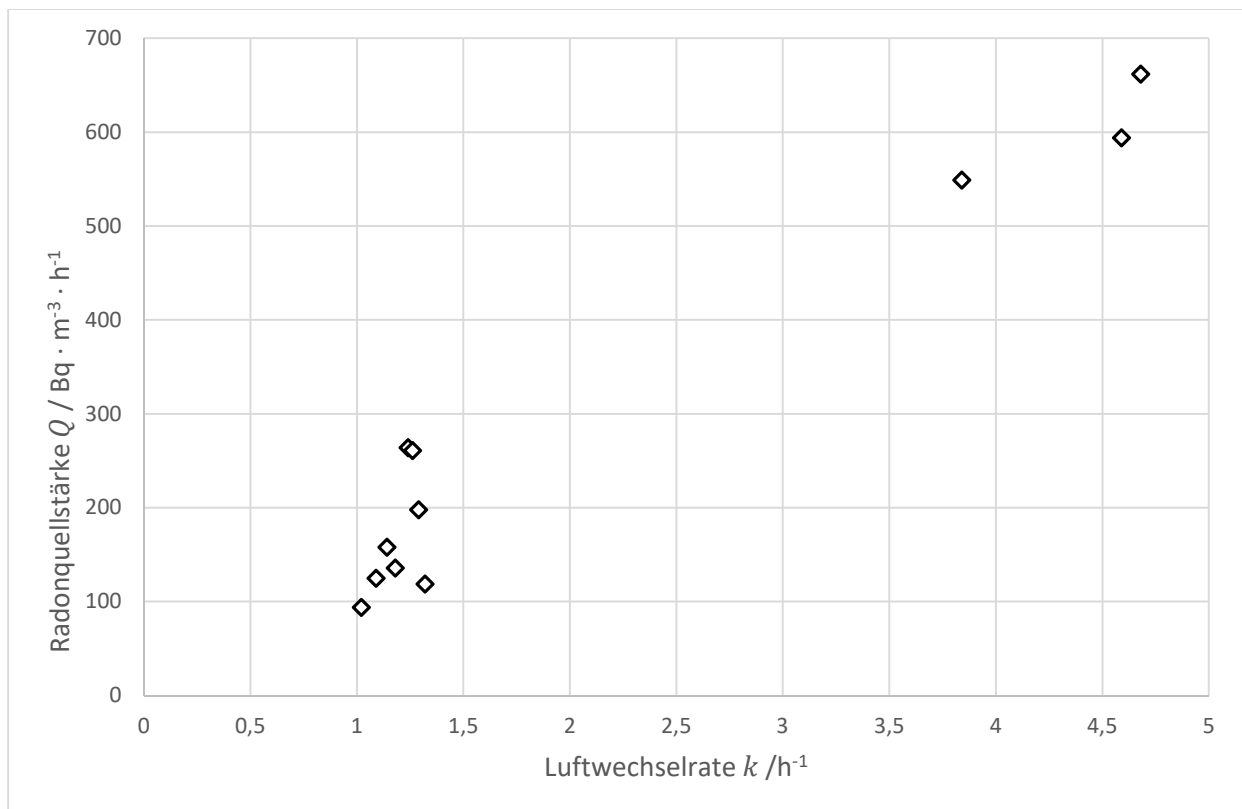


Abbildung 39: Abhängigkeit der Radonquellstärke von der zugehörigen Luftwechselrate anhand von Messobjekt "Trohe", Raum 1. Dargestellt und erkennbar sind die beiden Klassen "geringe Luftwechselrate" und "hohe Luftwechselrate", die sich durch den Zustand der Raamtür unterscheiden.

Dieser Zusammenhang wird erst erklärbar, wenn mit der Definition der Quellstärke eines Raums auch der Radonzufluss durch Konvektion der Luft aus angrenzenden Räumen eingeschlossen wird. Im beobachteten Fall wird der Luftwechsel nicht, wie in dem Ansatz des Verfahrens, durch Außenluft niedriger Radonkonzentration erfolgen; vielmehr strömt offensichtlich Luft aus dem Kellerflur in Raum 1, die Entlüftung erfolgt über die undichten Fenster ins Freie. Der Radongehalt der Flurluft erhöht rechnerisch die Radonquellstärke des Raums. Für die Beurteilung der Quellstärke des Raums allein durch Baustoffe und Bodenluft sind daher die Werte bei geringerer Luftwechselrate die belastbareren. Dieser

Umstand träge auch auf das SAT-Verfahren zu. Wegen dessen begrenzten Anwendbarkeit liefern aber ohnehin nur Messungen während niedriger Luftwechselraten aussagekräftige Werte.

Werden die Ergebnisse des VDI- und des SAT-Verfahrens zusammengenommen, beträgt die Quellstärke des Objekts **"Trohe", Raum 1**  $155 \text{ Bq h}^{-1} \text{ m}^{-3}$ . Wird dieser Wert als Durchschnitt für alle erdberührenden Räume des Gebäudes angenommen und darüber hinaus eine gleichmäßige Verteilung des Radons im gesamten Gebäude, ergibt das bei einem Luftwechsel von  $1 \text{ h}^{-1}$  eine Radon-Aktivitätskonzentration von  $51 \text{ Bq m}^{-3}$ . Der Referenzwert von  $300 \text{ Bq m}^{-3}$  bliebe somit unterschritten. Aufgrund der Unsicherheiten bei der Bestimmung der Quellstärke und durch die idealisierte Annahme einer homogenen Radonverteilung, sowie eines bestimmten Luftwechsels ist es schwierig, eine exakte Wahrscheinlichkeit für die Richtigkeit dieser Aussage zu nennen. Jedoch ermöglicht dieser Wert der zu erwarteten Radon-Aktivitätskonzentration, Gebäude untereinander zu vergleichen.

Auch **"Trohe", Raum 2** zeigt die für "Trohe", Raum 1 beschriebene Abhängigkeit der Luftwechselrate von Zustand der Raamtür. Allerdings ist für "Trohe", Raum 2 keine Abhängigkeit der Quellstärke von der Luftwechselrate zu erkennen – weder mit dem VDI-, noch mit dem SAT-Verfahren. Die Quellstärke dieses Raumes ist wesentlich größer als die im Messobjekt "Trohe", Raum 1. Das zusätzliche Radon aus dem Kellerflur, das bei hohen Luftwechselraten in den Kellerraum gelangt, beeinflusst die Werte der Quellstärke nicht maßgeblich.

Die Quellstärke des Raums 2 beträgt nach VDI-Verfahren und den Aufbaukurven des SAT-Verfahrens etwa  $1807 \text{ Bq h}^{-1} \text{ m}^{-3}$ . Wird dieser Wert als Durchschnitt für alle erdberührenden Räume des Gebäudes angenommen und darüber hinaus eine gleichmäßige Verteilung des Radons im gesamten Gebäude, ergibt das bei einem Luftwechsel von  $1 \text{ h}^{-1}$  eine Radon-Aktivitätskonzentration von etwa  $432 \text{ Bq m}^{-3}$ . Der Referenzwert von  $300 \text{ Bq m}^{-3}$  wird somit überschritten und Radonschutzmaßnahmen wären angebracht.

Bezüglich der Charakterisierung des Gebäudes hinsichtlich seiner Radonsituation ergaben sich für Messobjekt **"Allendorf"** über das vorangegangene Projekt (Buermeyer 2017) hinaus keine neuen Erkenntnisse.

## 6 Fazit

Das in den vorangegangenen Forschungsprojekten zur Radonquellstärke in Gebäuden entwickelte Verfahren zur kontinuierlichen Ermittlung der Radonquellstärke lässt sich ohne Einschränkungen bis hin zum Verzicht auf die Anwendung der Differenzgleichung vereinfachen. Die Rechnung nach VDI ist einfach und transparent in ihrer Durchführung und Qualitätssicherung. Die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Radonquellstärke ermöglicht insbesondere die Untersuchungen möglicher Einflussgrößen

auf die Radonquellstärke eines Raums, dann ist der mit dem Einsatz eines kontinuierlich injizierten Tracergases verbundene Aufwand gerechtfertigt.

Zur Beurteilung der Radonsituation eines Gebäudes sind generell alle in diesem Bericht beschriebenen Verfahren geeignet. Wird ohnehin im Rahmen einer Bauabnahme die Ermittlung der Gebäudedichtigkeit mittels BlowerDoor© (BlowerDoor 2017) durchgeführt, liegt es nahe, diese wie hier beschrieben zu modifizieren (BD-Verfahren). Die extremen Bedingungen bezüglich Druckverhältnisse und Luftführung machen jedoch die Übertragung auf normale Verhältnisse ungenau und fehleranfällig.

Für sporadische oder auch regelmäßig wiederkehrende Untersuchungen ist das Verfahren mittels Messung des zeitlichen Verlaufs der Radonkonzentration nach sprungartig geänderter Luftwechselrate (SAT-Verfahren) prädestiniert. Es bedarf den geringsten personellen und gerätetechnischen Aufwand und liefert nach wenigen Stunden bereits erste Ergebnisse. Auch lässt sich dieses Verfahren dadurch praktikabel auf mehrere Räume eines Gebäudes gleichzeitig anwenden.

In jedem Fall liefert die Kenntnis der Radonquellstärke einen deutlichen Mehrwert gegenüber der bloßen Radon-Aktivitätskonzentration, enthält sie doch zusätzlich die Information der Luftwechselrate während der Radonmessung. Damit können die Ergebnisse auf andere Lüftungssituationen übertragen, sowie mit anderen Gebäuden oder mit anderem Bewohnerverhalten desselben Gebäudes besser verglichen werden. Vergleichbare Aussagekraft erlangt man mit reinen Radonmessungen nur, wenn diese über sehr lange Zeiträume erfolgen, um etwa die jahreszeitlichen Schwankungen der Raumlüftung zu egalisieren.

## 7 Literaturverzeichnis

- Azzam Jai 2012 Azzam Jai, T.: Systemtheoretischer Ansatz für ein Rekonstruktionsverfahren zur Ermittlung von Luftwechselraten aus Radonmessdaten. Masterarbeit, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen 2012.
- BlowerDoor 2017 BlowerDoor GmbH, MessSysteme für Luftdichtheit. BlowerDoor Standard, Springe-Eldagsen, Okt. 2017
- Buermeyer 2017 Buermeyer, J.: Radiologisches Forschungsvorhaben „Radonquellstärke von Gebäuden“. Technische Hochschule Mittelhessen, Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Gießen 2017.
- Collignan et al. 2014 Collignan, B., Powaga, E.: Procedure for the characterization of radon potential in existing dwellings and to assess the annual average indoor radon concentration. J Environ Radioact 137, 64-70, 2014
- DIN 2001 Deutsches Institut für Normung: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden, Differenzdruckverfahren (ISO 9972:1996, modifiziert). DIN 13829:2000. Beuth Verlag, 2001.
- Kemski 2004 Kemski, J.: Die Radonkarte Deutschlands - Kurzinformation zu Radon in der Boden- und Raumluft. 2004. [http://www.kemski-bonn.de/downloads/Erl\\_Radonkarte2004.pdf](http://www.kemski-bonn.de/downloads/Erl_Radonkarte2004.pdf) (Zugriff am 26. 06 2018).
- KSR 2005 Eidgenössische Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität (KSR): Analyse der Beiträge zur Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung. Bundesamt für Gesundheit Bern, 2005
- Neugebauer 2015 Neugebauer, T.: Bestimmung der Radonquellstärke von Gebäuden und deren Einflussgrößen - Bedeutung für den Strahlenschutz. Masterarbeit, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen 2015.
- Ngwa 2018 Ngwa, A.N.: Anwendbarkeit und Grenzen eines Verfahrens zur Bestimmung der Radonquellstärke. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen, 2018.
- R Development 2011 R Development Core Team: R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria : the R Foundation for Statistical Computing. ISBN: 3-900051-07-0, 2011. Available online at <http://www.R-project.org/>
- StrlSchG 2017 Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG). Art. 1 des Gesetzes zur Neuordnung des Rechts zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S.1966)
- Schwekendiek 2018 Schwekendiek, T.: <http://www.bsm-schwekendiek.de> (Zugriff am 26. 06 2018).
- Varley et al. 1998 Varley N.R., Flower A.G.: Indoor radon prediction from soil gas measurements. Health Phys 74(6), 714-718, 1998.
- VDI 2001 Verein der Ingenieure: Messen von Innenraumluftverunreinigungen - Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen. VDI-Richtlinie: VDI 4300 Blatt 7. Beuth Verlag GmbH, 2001.
- VDI 2013 Verein der Ingenieure: ISO 12569:2012 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden und Werkstoffen - Bestimmung des spezifischen Luftvolumenstroms in Gebäuden - Indikatorgasverfahren. Beuth Verlag, 2013.
- WHO 2009 World Health Organisation: WHO Handbook on Indoor Radon - A public Health Perspective. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, 2009.



Zhang et al. 2007      Zhang Z., Smith B., Steck D.J., Guo Q., Field R.W.: Variation in yearly residential radon concentrations in the upper midwest. *Health Phys*, 93(4), 288-297, 2007