



Bundesamt  
für Strahlenschutz

## **Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz**

Untersuchung der Abhängigkeit von Radoneintrittsrates und Luftwechsel von Witterungsparametern und Nutzerverhalten als Grundlage für die Beurteilung der Radondichtheit von Gebäuden

**Vorhaben 3621S12220**

Sachverständigenbüro für Radonanalytik und Baubiologie  
Sachverständigenbüro Uwe Münzenberg

Dr. Thomas Haumann  
Uwe Münzenberg

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUKN (Ressortforschungsplan) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

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

## **Impressum**

Bundesamt für Strahlenschutz  
Postfach 10 01 49  
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0  
Fax: +49 30 18333-1885  
E-Mail: ePost@bfs.de  
De-Mail: epost@bfs.de-mail.de

[www.bfs.de](http://www.bfs.de)

BfS-RESFOR-259/26

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:  
urn:nbn:de:0221-2026040759652

Salzgitter, April 2026

<b>Abschlussbericht - FKZ 3621S12220</b>
--

**Auftraggeber:** Bundesamt für Strahlenschutz  
Z4/AG-R  
Postfach 10 01 49  
38201 Salzgitter

**Auftragnehmer:** Dr. Thomas Haumann  
Sachverständigenbüro für Radonanalytik und Baubiologie  
Am Ruhrstein 59  
D-45133 Essen

Mitarbeiter

Uwe Münzenberg  
Sachverständigenbüro Uwe Münzenberg  
Rechenberg 2  
D-97346 Iphofen

Vergabenummer: FKZ 3621S12220

Thema: Untersuchung der Abhängigkeit von Radoneintrittsrates und Luftwechsel  
von Witterungsparametern und Nutzerverhalten als Grundlage für die  
Beurteilung der Radondichtheit von Gebäuden

Berichtsdatum: 26.11.2024

Seitenanzahl: 84

Verfasser: Thomas Haumann, Uwe Münzenberg

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

## Inhalt

<b>1.</b>	<b>Motivation und Aufgabenstellung</b>	<b>4</b>
1.1	Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik	5
1.2	Planung einer Messstrategie	6
1.3	Auswahl von Gebäuden und Durchführung der Messungen	6
1.4	Auswertung der Zeitreihen, Bestimmung von Radoneintrittsrate und Luftwechsel	6
1.5	Zusammenfassende Auswertung und Modellentwicklung	7
<b>2.</b>	<b>Literaturstudie</b>	<b>7</b>
<b>3.</b>	<b>Objektvorstellungen</b>	<b>10</b>
3.1	Objekt 1: Bolsterlang	10
3.2	Objekt 2: Wittingen	11
3.3	Objekt 3: Deckersberg	11
3.4	Objekt 4: Essen	11
<b>4.</b>	<b>Untersuchungsstrategie und Durchführung</b>	<b>12</b>
4.1	Vorbemerkungen	12
4.2	Phase 1: Bestandsaufnahme und Erstmessungen	15
4.3	Phase 2: Saisonale Messungen	15
4.4	Phase 3: Jahresmessungen	16
4.5	Ablaufschema Phasen 1 bis 3	16
<b>5.</b>	<b>Darstellung der Untersuchungsergebnisse</b>	<b>18</b>
5.1	Erstbegehung und Bestandsaufnahme mit Quellensuche und Rn50-Test	18
5.2	Radon Langzeitmessungen (zeitauflösend)	20
5.3	Radon Langzeitmessungen (integrierend)	24
5.4	Klima Langzeitmessungen innen	24
5.5	Klima Langzeitmessungen außen (DWD)	25
5.6	CO <sub>2</sub> -Konzentration Langzeitmessungen (zur Luftwechselbestimmung)	26
5.7	Objektraum, Raumnutzung und Nutzerverhalten	28

<b>6.</b>	<b>Auswertung</b>	<b>29</b>
6.1	Berechnung der Luftwechselraten anhand der CO <sub>2</sub> -Konzentrationen	29
6.2	Berechnung der Radon-Eintrittsrates QR <sub>n</sub> (Radon und Luftwechsel)	30
6.3	Berechnung der Radonkonzentration (aus Quellstärke und Luftwechsel)	31
6.4	Berechnung des Differenzdruckes gem. DIN/TS 18117-2	32
6.5	Definition von Standardnutzungsbedingungen (Raumnutzung, Heizung und Lüftung)	33
6.6	Messergebnisse der saisonalen Messungen	35
6.7	Analysen von Abhängigkeiten	41
6.8	Analyse von Mittelwerten aus Temperatur-Wertebereichen	48
6.9	Analyse von Mittelwerten aus 14-Tages-Wertebereichen	53
6.10	Korrelationsanalyse für die Einflussfaktoren	56
6.11	Modellentwicklung mit Hilfe von KI-basierten Modellen	59
6.12	Beschreibung eines typischen Jahresverlaufs von Radoneintrittsrates und Luftwechsel (alle Objekte)	66
6.13	Schätzung der Jahresmittelwerte für die Radoneintrittsrates und den Luftwechsel	68
6.14	Anwendung der Erkenntnisse auf ein bestehendes Modell bzw. Entwicklung eines eigenen Modells und Praktikabilität der Vorgehensweise	69
6.15	Bedeutung der Erkenntnisse für die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Senkung der Radonkonzentration	73
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>76</b>
<b>8.</b>	<b>Literaturübersicht</b>	<b>79</b>
	<b>Danksagungen</b>	<b>84</b>

## 1. Motivation und Aufgabenstellung

Die Radonkonzentrationen in Innenräumen weisen in der Regel deutliche witterungs- und nutzungsbedingte tageszeitliche und saisonale Variationen auf. Bewertungen können daher nicht wie bei anderen Innenraumschadstoffen wie z.B. Formaldehyd oder VOC anhand der Ergebnisse von Kurzzeitmessungen über wenige Stunden vorgenommen werden. Bei Radon reichen sogar längere Messintervalle über Tage oder Wochen nicht für eine zuverlässige Beurteilung aus. Die typischen Innenraumschadstoffe entweichen z. B. aus Raumbooberflächen – Schadstoffquellen sind etwa der Bodenaufbau, Bauplatten, Beschichtungen, Kleber usw. Hier führen Raumluftmessungen in kurzer Zeit unter definierten Bedingungen (Raumlüftung, Temperatur, Feuchte) zu reproduzierbaren Luftkonzentrationen, da die Quellstärken bei gleichem Raumklima selbst bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen annähernd konstant sind. Bei Radonmessungen in der Raumluft wird weit entfernt von dem Ursprungsort (Erdreich) gemessen. Die Eintrittsrates (Quellstärke) reagiert daher sehr empfindlich auf Witterungseinflüsse wie Temperatur-, Druck- und Klimaschwankungen, was im Resultat zu sehr verschiedenen Tages-, Wochen- und auch Monatsmittelwerten im Innenraum führen kann. Selbst die Jahresmittelwerte von mehreren Jahren können signifikante Variationen zeigen.

Aus diesem Grund werden für die gesundheitliche Bewertung von Radon in Gebäuden Jahresmittelwerte herangezogen, da sich das radonbedingte Lungenkrebsrisiko aus langjähriger Exposition ergibt. Unter bestimmten Umständen steht für die Bewertung der Radon-Konzentration in Aufenthaltsräumen oder an Arbeitsplätzen die Zeit für eine einjährige Messung nicht zur Verfügung. Je kürzer der Messzeitraum ist, umso größer sind die witterungs- und nutzerbedingten Unsicherheiten der mit dieser Messdauer erzielten Messwerte in Bezug auf den Jahresmittelwert.

Das Forschungsvorhaben behandelt daher die Untersuchung der Abhängigkeit von Radoneintrittsrates und Luftwechsel von Witterungsparametern und Nutzerverhalten als Grundlage für die Beurteilung der Radondichtheit von Gebäuden. In diesem Vorhaben sollen diese beiden Zielgrößen für ausgewählte Gebäude kontinuierlich oder mittels typischer Wetterlagen abdeckenden Stichproben ermittelt werden. Dazu ist der aktuelle Stand von Forschung und Technik zu recherchieren. Geprüft werden soll dabei auch, welches in Innenräumen vorkommende, leicht messbare Gas anstelle einer Untersuchung mit Tracergas zur Bestimmung des Luftwechsels herangezogen werden kann. Auf der Basis der Ergebnisse sind die typischen Abhängigkeiten beider Größen von der Witterung zu untersuchen und der Einfluss des Nutzerverhaltens (manuelle Lüftung) zu ermitteln.

Ziel ist es, mit Hilfe der aus experimentellen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse und verfügbaren Modellen zu Innenraumnoxen, Methoden zur Schätzung der benötigten Jahresmittelwerte aus kürzeren Messzeiten als ein ganzes Jahr unter Einbezug von Witterungsparametern und Nutzerverhalten zu entwickeln. Das Forschungsvorhaben gliedert sich in 5 Arbeitspakete.

## **1.1 Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik**

Eine detaillierte Aufarbeitung und Dokumentation des für das Vorhaben relevanten Standes von Wissenschaft und Technik erfolgte als erster Arbeitsschritt in Arbeitspaket 1. Neben den in der Leistungsbeschreibung zitierten Publikationen wurden relevante Studien zu gebäudespezifischen Untersuchungen in Bezug auf die Radon-Eintrittsrate, Luftwechsel und Differenzdruck in einer Literaturstudie vorgestellt. Weiterhin wurde neben der Literaturstudie auch eine umfassende Evaluierung messtechnischer Anforderungen insbesondere von elektronischen Radonmessgeräten sowie Messgeräten und Messmethoden in Bezug auf den Luftwechsel, Radoneintrittsrate, Differenzdruck, in Frage kommender Tracergase sowie Quantifizierung, Differenzierung und Lokalisierung des konvektiven und diffusiven Radoneintritts inkl. Radon-Sniffing durchgeführt. In diesem ersten Bearbeitungsschritt wurde der vorliegende Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens ausführlich aufgearbeitet.

Neben der Literaturstudie sollte auch eine umfassende Evaluierung messtechnischer Anforderungen insbesondere von elektronischen Radonmessgeräten sowie Messgeräten und Messmethoden in Bezug auf den Luftwechsel, Radoneintrittsrate, Differenzdruck, in Frage kommender Tracergase sowie Quantifizierung, Differenzierung und Lokalisierung des konvektiven und diffusiven Radoneintritts inkl. Radon-Sniffing durchgeführt werden. In diesem ersten Bearbeitungsschritt wurde der vorliegende Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens ausführlich aufgearbeitet. Zur **Verifikation der geplanten Vorgehensweise** sollen folgende Punkte besonders berücksichtigt und dokumentiert werden:

- Evaluierung erforderlicher Eigenschaften von elektronischen Radonmessgeräten für die Messung von Zeitreihen der Radonkonzentration in Gebäuden;
- Unter Berücksichtigung der Aufgabenstellung sind Messbereich, Messintervall der Einzelmessung und die sich aus der zu gewährleistenden Unsicherheit der Einzelmessung ergebende Empfindlichkeit sowie weitere für den langfristigen Geräteeinsatz relevante Eigenschaften zu diskutieren;
- Übersicht über geeignete elektronische Radonmessgeräte, Gerätekosten, Aufwand für Betrieb und Wartung;
- Übersicht über geeignete Verfahren und Tracergase zur Bestimmung von Luftwechselzahlen in bewohnten Gebäuden und Bestandteile der Innenraumluft, die sich als Tracer zur Analyse des Luftwechsels und des Nutzerverhaltens eignen, sowie eine Bewertung der Praktikabilität;
- Übersicht über geeignete Methoden zur Bestimmung des Luftwechsels in Innenräumen für mehrwöchige Messdauer;
- Bewertung der Einflüsse von Wetter und Nutzerverhalten auf die Radonkonzentration und den/die ausgewählten Parameter;
- Für die Radonkonzentration in der Innenraumluft relevante Wetterparameter, Bezugsquelle, Qualität der Daten.

## **1.2 Planung einer Messstrategie**

Nach den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche wurde in Arbeitspaket 2 eine detaillierte Messstrategie festgelegt. In Bezug auf eine kontinuierliche Messung wichtiger Parameter (Radon-Aktivitätskonzentration in der Raumluft, Luftwechsel mit Tracergas, Klima) sollte auch die Messung und Aufzeichnung des Differenzdrucks eine wichtige Rolle spielen. Aus Voruntersuchungen und Erkenntnissen der Literaturrecherche ist deutlich geworden, dass die Radon-Eintrittsrate über den konvektiven Eintrag von Bodengas und auch die Radon-Aktivitätskonzentration in der Raumluft sehr empfindlich auf minimale Druckdifferenzen von wenigen Pascal reagiert. Somit ist zu erwarten, dass sich auch die für den Luftwechsel verantwortlichen Faktoren und Kräfte (Nutzerverhalten, Lüftungstechniken, Heizung, Klima) auf die Druckdifferenzen zwischen Bodenluft und Innenraum auswirken. Zudem kann auch der Druckausgleich zwischen der Bodenluft und der Atmosphäre bei deutlichen meteorologischen Luftdruckschwankungen eine wichtige Rolle spielen. Es wird angenommen, dass ein relevanter Radoneintritt durch den Volumenstrom von Bodenluft in das Gebäude zum Druckausgleich generiert werden kann.

## **1.3 Auswahl von Gebäuden und Durchführung der Messungen**

Nach den Erkenntnissen aus den Arbeitspaketen 1 und 2 wurden in Arbeitspaket 3 geeignete Objekte ausgesucht. Als Objekte (mindestens 3) sollten bevorzugt unterkellerte zweietagige Einfamilienhäuser oder nichtunterkellerte zweietagige Einfamilienhäuser mit durchgehender Grundplatte aus Beton und zwei Folgegeschossen zwischen Baujahr 1975 und 2010 ausgewählt werden. Mit dem Zeitraum kann gewährleistet werden, dass die Gebäude bereits mit Betonplatten konstruiert worden sind und keine extremen Undichtigkeiten zum Baugrund aufweisen. Für die Untersuchungen sollte deshalb je Objekt auch ein Raum mit messbarem Radoneintritt aus dem Boden ausgewählt werden. Weiterhin ist zu erwarten, dass bereits Maßnahmen zur Minimierung von Lüftungswärmeverlusten umgesetzt sind. Außerdem sollten die Gebäude in Gebieten mit erhöhtem Radonpotential liegen ( $RP > 30$ ). Die Radon-Aktivitätskonzentrationen sollen im Bereich des Jahresmittelwertes von  $150 \text{ Bq/m}^3$  -  $500 \text{ Bq/m}^3$  liegen. Es sollte je Objekt mindestens ein Raum mit begrenztem konvektiven Radoneintritt aus dem Baugrund untersucht werden.

## **1.4 Auswertung der Zeitreihen, Bestimmung von Radoneintrittsrate und Luftwechsel**

Mit dem Arbeitspaket 4 erfolgte die Analyse der Radonkonzentrationen im Zusammenhang mit den ausgewählten Wetterparametern (ggf. unter Berücksichtigung der Innenraumtemperatur); die Analyse der weiteren Parameter der Innenraumluft bzw. der Tracergasmessungen im Zusammenhang mit ausgewählten Wetterparametern und dem Nutzerverhalten; die Bestimmung von Radoneintrittsrate und Luftwechsel unter Berücksichtigung der Einflüsse ausgewählter Wetterparameter und Nutzeraktionen; die quantitative Untersuchung festgestellter Abhängigkeiten und die Auswertung des Nutzerverhaltens auf den Jahresmittelwert der Radonkonzentration (wiederkehrendes Verhalten, typisches Verhalten bei bestimmten Wettersituationen, singuläre Ereignisse wie z. B. Urlaub, möglichst quantitativ).

## 1.5 Zusammenfassende Auswertung und Modellentwicklung

Das letzte Arbeitspaket 5 beinhaltet die zusammenfassende Auswertung und Modellentwicklung auf Basis der Ergebnisse. Es ist darzustellen, wie die Jahresmittelwerte von Radoneintrittsrates und Luftwechsel unter Berücksichtigung der ausgewählten Parameter geschätzt werden können. Hierbei sollten insbesondere folgende Punkte beachtet werden:

- Definition von Standardnutzungsbedingungen (Raumnutzung, Heizung und Lüftung);
- Zusammenfassende Auswertung der erhaltenen Ergebnisse;
- Modellbildung zur Beschreibung eines typischen Jahresverlaufs von Radoneintrittsrates und Luftwechsel bei Bedarf für unterschiedliche Lüftungssituationen (ggf. Nutzung der Testreferenzwerte des DWD);
- Schätzung der Jahresmittelwerte beider Größen und Berechnung der daraus resultierenden Radonkonzentration;
- Plausibilitätsprüfung der Schätzung von den mit aktiven und passiven Geräten gemessenen Jahresmittelwerten der Radonkonzentration des untersuchten Raumes;
- Bewertung der Bedeutung von Radoneintrittsrates und Luftwechsel für die Radonkonzentration des untersuchten Raumes auch im Hinblick auf die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Senkung der Radonkonzentration;
- Bewertung der Praktikabilität der Vorgehensweise der Parameter;
- Anwendung der Erkenntnisse auf ein bestehendes Modell bzw. Entwicklung eines eigenen Modells.

## 2. Literaturstudie

In einem ersten Bearbeitungsschritt ist der Stand von Wissenschaft und Technik für die Zwecke des Vorhabens im Rahmen einer Literaturstudie aufzuarbeiten und eine Literaturrecherche zum Thema **parallele Bestimmung von Radoneintrittsrates und Luftwechselzahl** unter Berücksichtigung von Zusammenhängen mit Wetterparametern durchzuführen.

Es kann festgestellt werden, dass sich bereits eine Vielzahl von Autoren seit Ende der 1980er Jahre mit dem Thema Radon in Innenräumen und auch insbesondere mit den Ursachen und dem Mechanismus des Radoneintrags in Innenräume beschäftigen. Als zentrale treibende Kraft, mit welcher das Radon in die Innenräume gelangt, wird bereits vielfach die Druckdifferenz in Gebäuden durch Winddruck und Temperaturdifferenz genannt. Bereits 1993 beschrieben Porstendörfer et al. den Einfluss von meteorologischen Parametern auf die Radonkonzentrationen im Innenraum [41].

Im konkreten Zusammenhang mit der **Radonkonzentration** im Innenraum und der Radon-Eintrittsrates wurden die Literaturstellen [1] bis [48] als besonders relevant herausgestellt. Es werden in den meisten Fällen einzelne Wetterparameter (Temperatur, Wind, Druck) im Zusammenhang mit der Radon-Raumluftkonzentration, der Radoneintrittsrates und der Luftwechselzahl untersucht und anhand von Beispielobjekten dokumentiert.

Im Zusammenhang mit **Luftwechselsmessungen** stehen 21 Publikationen. Als Tracergase kommen im Zusammenhang mit Radon  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , und  $\text{SF}_6$  zum Einsatz. Sogar der Einsatz von Kohlenmonoxid wurde in einer Studie beschrieben [15]. Hervorzuheben ist eine Studie von Kokotti et al., in der gezeigt werden konnte, dass eine Erhöhung der Lüftungsrate die Radonbelastung im Innenraum auch

erhöhen kann [30]. Erhöhte Belüftung verursachte hier eine erhöhte Außen-Innen-Druckdifferenz, was wiederum die Eintragsrate von Radon erhöhte und der Verdünnungswirkung der Belüftung entgegenwirkte.

Im Zusammenhang mit dem **Temperaturverlauf** stehen 16 Publikationen. Hier werden u.a. Zusammenhänge mit der Radon-Eintrittsrates deutlich, welche zu einer verbesserten Abschätzung des Jahresmittelwertes anhand von deutlich kürzeren Messzeiten beitragen [8, 37, 38].

Im Zusammenhang mit **Druckmessungen** und **Differenzdruckmessungen** stehen 27 Publikationen. Davon wurde in 7 Veröffentlichungen auch die Differenzdruckmethode mittels Blower-Door genutzt [7, 9, 17, 21, 32, 36, 42]. Insbesondere die Beobachtung der Differenz zwischen Erdreich und Innenraum liefert deutliche Zusammenhänge mit den beobachteten Radon-Raumluftkonzentration und der jeweiligen Radoneintrittsrates in den untersuchten Objekten. Besonders deutlich werden die Zusammenhänge unter provozierten Bedingungen mit Hilfe des Blower-Door Verfahrens im Unterdruck. Hierbei werden die konvektiven Eintrittsstellen aktiviert und unter definierten Bedingungen Luftströmungen aus der Bodenluft generiert und somit gebäudespezifische Radoneintrittsrates quantifiziert. Diese Methode wird im Zusammenhang mit Radon als „erweiterte“ Blower-Door Methode beschrieben und ermöglicht als gebäuediagnostisches Werkzeug in erster Linie die Beurteilung der Radondichtheit der Gebäudehülle ohne Berücksichtigung des Nutzerverhaltens (Heizen, Lüften). Ableitungen von Jahresmittelwerten für Radon zur gesundheitlichen Bewertung werden aus den in kurzer Zeit vor Ort ermittelten Messdaten ebenfalls diskutiert. Unter Berücksichtigung besonderer Messbedingungen und des Nutzerverhaltens liefern die Daten der erweiterten Blower-Door Methode insbesondere in Bestandsgebäuden bereits gute Übereinstimmungen mit Messungen der Radonkonzentrationen über ein Jahr. Zudem können während der Messungen vor Ort im Unterdruck Radon-Eintrittsstellen zur Quellensuche nach der „Radon-Sniffing“ Methode erkannt und quantifiziert werden.

Im Zusammenhang mit **Wind** und **Windrichtung** stehen 6 Publikationen [10, 13, 20, 28, 40 und 41]. Durch den auf eine Gebäudefassade anstehenden Winddruck entsteht auf der windabgewandten Seite ein Unterdruck im Gebäude, welcher einen signifikanten Einfluss auf die Druckdifferenzen und somit auf die Radon-Eintrittsrates hat. Zudem wird der Infiltrationsluftwechsel von Gebäuden durch Wind- und Windrichtung beeinflusst.

Es wurden zudem 2 Studien zum **Luftwechsel in Gebäuden** im Zusammenhang mit Schadstoffbelastungen im Innenraum [49, 50] vorgestellt. Es zeigen sich bei Schadstoffen wie Formaldehyd oder anderen organischen Schadstoffen Senkeneffekte und Sekundäreffekte, welche durch die Pufferwirkung von Materialoberflächen im Raum verursacht werden und die Quellstärkenberechnungen erschweren. Diese Senken- und Sekundäreffekte werden bisher für Radon nicht beobachtet. Viele Berechnungen und Modelle lassen sich jedoch auf Radon hinsichtlich der Quellstärke und gut übertragen.

Zur Bestimmung der **Luftwechselzahl in Gebäuden** wurden 6 Publikationen [51] bis [56] vorgestellt. Eine umfassende Studie vom Umweltbundesamt aus dem Jahr 2019 beleuchtet die wichtigsten Aspekte der Luftwechselbestimmung inkl. Messunsicherheiten und Fehler für die Methoden und Tracergase [53]. Eine Studie von Weithaas zeigt die Korrelation zwischen dem aus Blower-Door- und Tracergasmessungen erhaltenen „natürlichen“ Luftwechsel“ [51, 54].

Drei Studien befassen sich mit der **Bestimmung der Druckdifferenzen** im Zusammenhang mit Schadstoffbelastungen [57] bis [60]. Hier geht es zumeist um Kontaminationen durch Schadstoffe und die

Verteilung im Erdreich. Der Eintrag in Gebäude richtet sich – wie bei Radon – nach der Konzentration in der verfügbaren Bodenluft, der Permeabilität des Untergrundes sowie nach dem durch den Unterdruck erzeugten konvektiven (Boden)-Luftvolumenstrom. Weiterhin werden zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten von Blower-Door Messungen zur Untersuchung von Luftströmungen in Gebäuden und deren Auswirkungen beschrieben.

Grundsätzlich muss auch davon ausgegangen werden, dass der witterungsbedingte **Feuchtegehalt** des **Bodens** durch Niederschlag und Verschiebungen des Grundwasserspiegels oder längere Trockenperioden sich auf die verfügbare Radonmengen aus dem Erdreich bzw. das Radonpotential an einem Standort auswirken. Weitere Studien des zeitlichen Verlaufes der Radonkonzentration in der Bodenluft sind bereits angelaufen (*Forschungsvorhaben Bfs 3621S12240 - Untersuchung der Abhängigkeit der Radonkonzentration in der Bodenluft in rund 1 Meter Tiefe von Wetterparametern für Böden mit verschiedenen Permeabilitäten und Nutzungshistorien*). Die Ergebnisse dieser Studie sind voraussichtlich ab 2025 verfügbar.

Aus der Literaturstudie ist erkennbar, dass der Luftwechsel und die im Zusammenhang stehende Radonkonzentration in Innenräumen aufgrund von vielfältigen möglichen Parametern in Bezug auf eine Bestandaufnahme der einzelnen Faktoren komplex ist (Leckagen, Lage des Gebäudes, Temperaturdifferenz, Nutzungsgewohnheiten, Radonpotenzial etc.). In Bezug auf ein mögliches Vorhersagemodell reduziert sich die Anzahl der signifikanten Parameter im Wesentlichen auf den Parameter **Druckdifferenz** (generiert durch Klimaschwankungen und Winddruck) im Verhältnis zu der Summe der **Leckagefläche** eines Gebäudes.

Der für das Forschungsvorhaben relevante **Stand der Technik** in Bezug auf Normen, Richtlinien und Regelwerke zu den beschriebenen Verfahren und Methoden wird in den Literaturstellen [61] bis [70] abgebildet.

Für **Radon** bietet die Normenreihe DIN (EN) ISO 11665 und weiteren Leitfäden und Richtlinien eine gute Basis für fundierte messtechnische Überprüfungen der Parameter und Messgrößen. Es stehen geeignete Messgeräte mit ausreichender Grundempfindlichkeit, Messgenauigkeit und ausreichendem Messbereich auf dem Markt zur Verfügung (siehe Kapitel 4). Viele Messgeräte bieten zudem eine integrierte Datenspeicherung und in manchen Fällen auch eine einfache Anbindung in digitale Netzwerke über Bluetooth, WLAN und Mobilfunk.

Die Bestimmung des **Luftwechsels** und die Vorgehensweise bei **Differenzdruckmessungen** mittels Blower-Door richtet sich nach den Normen DIN EN ISO 12569 und DIN EN ISO 9972 [68, 69].

### 3. Objektvorstellungen

Es konnten für die Untersuchungen 4 Objekte in verschiedenen Bundesländern und unterschiedlichen geologischen und geografischen Lagen gefunden werden, die über das gesamte Bundesgebiet verteilt sind. Alle Objekte weisen einen jeweils gut zu untersuchenden Objektraum auf, bei dem eine direkte Anbindung zum Erdreich über Böden und Wände vorliegt. Voruntersuchungen bestätigten einen relevanten und gut messbaren Radoneintritt aus dem Baugrund. Abbildung 3.1 liefert eine Übersicht über die geografische Lage der Objekte auf der Deutschlandkarte (Geoportal Bfs) mit Angaben zu der prognostizierten Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft.

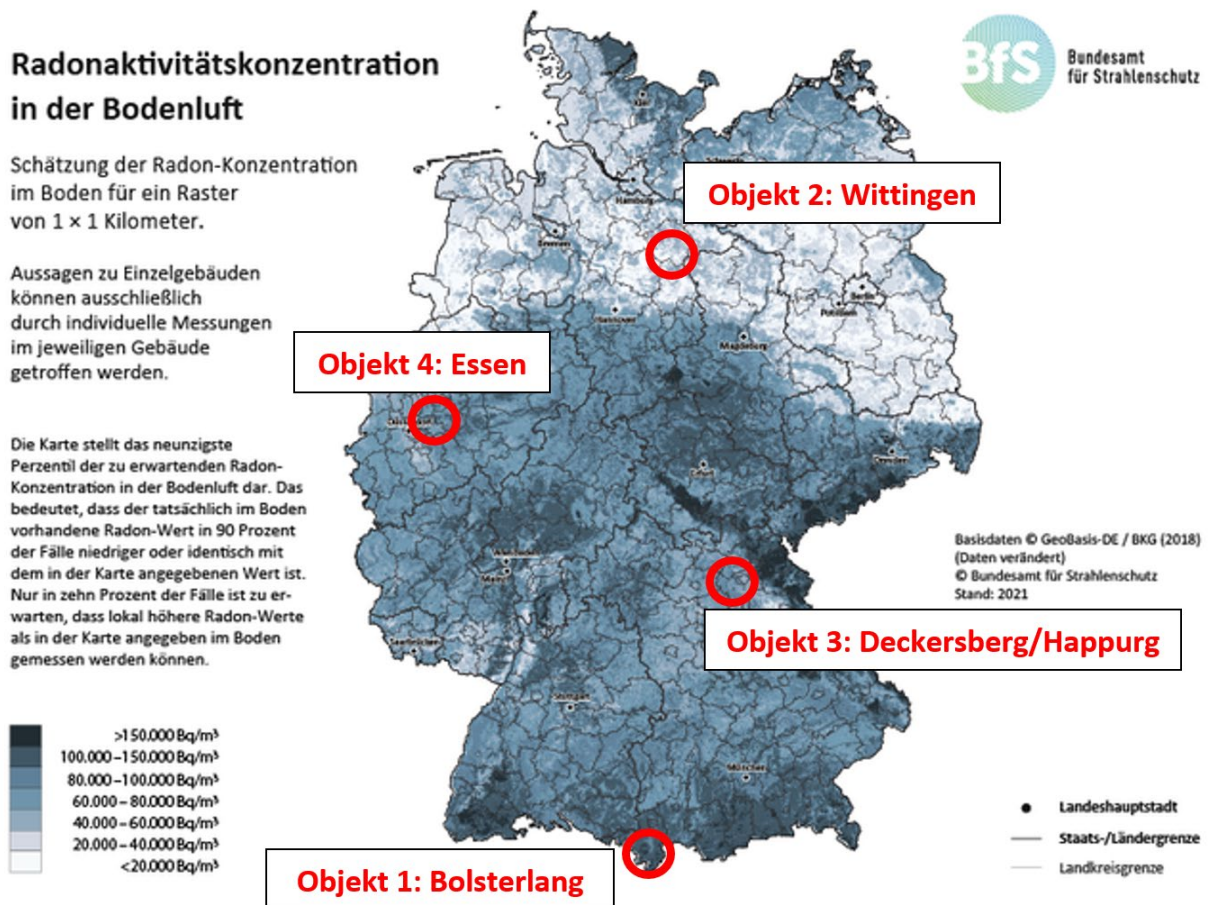


Abb 3.1: Übersicht über die geografische Lage der Objekte auf der Deutschlandkarte mit Angaben zu der prognostizierten Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft (Karte Bfs).

#### 3.1 Objekt 1: Bolsterlang

Bei dem Gebäude handelt es sich um ein freistehendes Mehrfamilienhaus in Hanglage aus dem Baujahr 1978 in Massivbauweise mit Unterkellerung sowie EG, OG und DG in Bolsterlang in der Nähe von Oberstdorf in Bayern. Der für die Radonmessungen verwendete Objektraum befindet sich im UG/Gartengeschoss. Das Radonpotential liegt nach Geoportal Bfs bei ca. 30. In dem Raum im UG wurden in der Vergangenheit über mehrere Wochen Radonkonzentration um **100 bis 200 Bq/m³** festgestellt. Der zu untersuchende Raum im UG wird regelmäßig genutzt und über die Fenster belüftet. Es ist von einem relevanten Radoneintritt in den Raum über die erdberührende Gebäudehülle auszugehen.

### **3.2 Objekt 2: Wittingen**

Bei dem Gebäude handelt es sich um ein freistehendes Einfamilienhaus aus dem Baujahr ca. 1975 in Massivbauweise mit Unterkellerung/Gartengeschoss sowie EG und DG in Wittingen in Niedersachsen. Der für die Radonmessungen verwendete Objektraum befindet sich im UG/Gartengeschoss. Das Radonpotential liegt nach Geoportal BfS bei ca. 8,3. Durch Voruntersuchungen konnte am Standort ein Radonpotential von 25 ermittelt werden ( $42 \text{ kBq/m}^3$  in der Bodenluft bei hoher Gaspermeabilität). In dem Raum im UG wurden in der Vergangenheit über mehrere Monate Radonkonzentration um **400 Bq/m<sup>3</sup>** festgestellt. Der zu untersuchende Raum im UG befindet sich in der Einliegerwohnung wird regelmäßig von meist einer Person als Büro genutzt und über die Fenster belüftet. Es ist von einem relevanten Radoneintritt in den Raum über die erdberührende Gebäudehülle auszugehen. Das Radonpotential liegt nach Messungen vor Ort bei nur 25. Trotzdem zeigt sich ein deutlicher Radoneintritt in den Büroraum UG. Aufgrund der passenden Gebäudeparameter und des regelmäßigen und gut zu dokumentierenden Nutzungsprofils sollten jedoch gute Voraussetzungen für eine erfolgsversprechende Datenerfassung gegeben sein.

### **3.3 Objekt 3: Deckersberg**

Bei dem Gebäude handelt es sich um ein freistehendes Einfamilienhaus aus dem Baujahr 1778 in Massivbauweise ohne Unterkellerung mit Wohnbereichen im EG und DG in Deckersberg/Mittelfranken in Bayern. Das Haus wurde im Jahr 2015 umfassend kernsaniert. Eine durchgehende Bodenplatte liegt jedoch nicht vor. Aufgrund einer Auflage des Denkmalschutzes wurde der Bodenaufbau jedoch mit Foamglasschotter gedämmt. Der für die Radonmessungen verwendete Objektraum befindet sich im Erdgeschoss. Das Radonpotential liegt nach Geoportal BfS bei ca. 16. In dem zu untersuchenden Raum wurden in der Vergangenheit über mehrere Monate Radonkonzentration um **400 - 600 Bq/m<sup>3</sup>** festgestellt. Der Raum wird regelmäßig als Wohnraum genutzt und über die Fenster belüftet. Es ist von einem relevanten Radoneintritt in den Raum über die erdberührende Gebäudehülle auszugehen. Das Gebäude wurde bereits 1778 errichtet und wurde umfassend kernsaniert. Das Radonpotential liegt bei 16. Der Radoneintritt findet über den gesamten Bodenaufbau direkt in den zu untersuchenden Wohnraum statt. Aufgrund der recht hohen Radon-Eintrittsrate und des regelmäßigen und gut zu dokumentierenden Nutzungsprofils sollten jedoch gute Voraussetzungen für eine erfolgsversprechende Datenerfassung gegeben sein.

### **3.4 Objekt 4: Essen**

Bei dem Gebäude handelt es sich um ein freistehendes Einfamilienhaus aus dem Baujahr 1951 in Massivbauweise mit Unterkellerung sowie EG, OG und DG in Essen in NRW. Das Haus verfügt über eine durchgehende Beton-Bodenplatte, und wurde in den Jahren 1998 und 2008 umfangreich modernisiert. Der für die Radonmessungen verwendete Objektraum befindet sich im UG. Das Radonpotential liegt nach Geoportal BfS bei ca. 37. In dem zu untersuchenden Raum im UG wurden in der Vergangenheit über mehrere Jahre Radonkonzentration um **250 Bq/m<sup>3</sup>** festgestellt. Der Raum im EG wird regelmäßig als Hobbyraum genutzt und über die Fenster belüftet. Es ist von einem relevanten Radoneintritt in den Raum über die erdberührende Gebäudehülle auszugehen. Das Gebäude wurde bereits 1951 errichtet und verfügt jedoch schon über eine durchgehende Beton-Bodenplatte. Aufgrund des regelmäßigen und sehr gut zu dokumentierenden Nutzungsprofils (Privathaus des Auftragnehmers) sollten jedoch gute Voraussetzungen für eine erfolgsversprechende Datenerfassung gegeben sein.

## 4. Untersuchungsstrategie und Durchführung

### 4.1 Vorbemerkungen

#### Radonmessungen in der Raumluft (Langzeit)

Bei dem Forschungsprojekt ist der Einsatz von **zeitauflösenden elektronischen Radonmessgeräten** nach DIN ISO 11665-5 [61] für die Langzeitmessungen von besonderer Bedeutung. Die Messgeräte müssen eine ausreichende Grundempfindlichkeit, Messgenauigkeit, einen ausreichenden Messbereich und eine ausreichende Impulsausbeute gewährleisten. Als Detektoren kommen insbesondere Messgeräte mit Ionisationskammer oder Lucas-Zelle in Frage. Es sollten für die zeitauflösenden Radon-Langzeitmessungen in der Raumluft auch Stundenwerte mit ausreichender Aussagekraft und statistischem Fehler abgebildet werden können.

Für die Aufgabenstellung wurden Geräte des Typs **Radon-Eye plus2 (FLT, Korea)** eingesetzt. Die Geräte können in ein WLAN-Netzwerk eingebunden werden, Datensätze regelmäßig ausgelesen werden und somit eine Funktionskontrolle erfolgen. Die Anforderungen der Grundempfindlichkeit, Messgenauigkeit, Messbereich und Impulsausbeute werden erfüllt. Mit einer Impulsausbeute von 13 cts/min bei 1000 Bq/m<sup>3</sup> können in einem 1h-Intervall noch Radon-Aktivitätskonzentrationen von 100 Bq/m<sup>3</sup> in der Raumluft mit einer statistischen Genauigkeit von 11 % (1s) abgebildet werden.

#### Radonmessungen in der Raumluft und an Eintrittsstellen (Kurzzeit)

Für die Bestimmung des **Rn<sub>50</sub>-Wertes** im Rahmen der Kurzzeitmessungen während der Ersterkundung und Bestandsaufnahme wurde das Gerät **FRD 400 (FLT, Korea)** ausgewählt. Die Anforderungen der Grundempfindlichkeit, Messbereich und Impulsausbeute werden erfüllt. Mit Impulsausbeuten von 22 cts/min @ 1000 Bq/m<sup>3</sup> können in einem 1h-Intervall noch Radon-Aktivitätskonzentrationen von 100 Bq/m<sup>3</sup> in der Raumluft mit einer statistischen Genauigkeit von < 9 % (1s) abgebildet werden.

Für die **Radon-Sniffing-Messungen** bei der Ersterkundung und Bestandsaufnahme sowie Langzeitmessungen an Radon-Eintrittsstellen wurden Geräte mit Lucaszellen-Detektor Radon **Scout Professional (Sarad, D)** und **Alpha-Sniffer (Radontec, D)** eingesetzt. Die Anforderungen der Grundempfindlichkeit, Messgenauigkeit, Messbereich und Impulsausbeute werden vom **Radon Scout Professional** gut erfüllt. Mit einer Impulsausbeute von 2,5 cts/min bei 1000 Bq/m<sup>3</sup> können in einem Intervall von einer Stunde noch Radon-Aktivitätskonzentrationen von 100 Bq/m<sup>3</sup> an Eintrittsstellen mit einer statistischen Genauigkeit von 26 % (1s) abgebildet werden. Bei der Quellensuche in Bezug auf die Radon-Eintrittsstellen während der Ersterkundung und Bestandsaufnahme sind Geräte des Typs **Alpha-Sniffer** im Vorteil. Die Anforderungen der Grundempfindlichkeit, Messgenauigkeit, Messbereich und Impulsausbeute werden erfüllt. Mit einer Impulsausbeute von 35,7 cts/min @ 1000 Bq/m<sup>3</sup> können in einem Intervall von 15 Minuten noch Radon-Aktivitätskonzentrationen von 1000 Bq/m<sup>3</sup> in der Luft an möglichen Eintrittsstellen mit einer statistischen Genauigkeit von 4 % (1s) abgebildet werden.

#### Radonmessungen in der Bodenluft (Kurzzeit)

In der unmittelbaren Umgebung des Objektgebäudes (Abstand ca. 10 - 20 Meter) wurden zur Bestimmung der Radonaktivitätskonzentration und der Gaspermeabilität in der Bodenluft stichprobenweise bei der Erstmessung aktive Probenahme nach DIN ISO 11665-11 mit Packer-Sonden (Typ Honold) durchgeführt. Hierzu wurde für die kontinuierlichen Messungen ein Radon-Thoron-Monitor RTM1688-2 (Sarad) mit Hochspannungsmesskammer und elektrostatischer Abscheidung auf einem

Halbleiterdetektor mit anschließender Alphaspektrometrie eingesetzt. Zunächst wurde bis zur Messtiefe mit einem Handbohrer Typ Edelmann (40 mm) vorgebohrt. Anschließend wurde eine Packer-sonde (Typ Honold, 40 mm, wie Bonner Sonde gem. DIN EN ISO 11665-11) eingeführt und der Packer mit einer Handpumpe verdichtet. Vor jeder Messung wurde die Dichtheit des Systems und der Anschlüsse sichergestellt und mit einer Handpumpe die Verfügbarkeit der Bodenluft überprüft.

Die Messung der Gaspermeabilität in der Bodenluft wurde unmittelbar nach der Radonmessung durchgeführt. Hierzu wurde an die Sonde eine elektronische Laborpumpe mit integriertem Volumenstromsensor (BiVOC-2, Holbach) und einem digitalen Differenzdruck-Messgerät (G1113, Greisinger) angeschlossen. Der hierbei im Überdruck ins Erdreich wirksame Volumenstrom wurde stufenweise erhöht und der zugehörige Druck (Differenzdruck) gemessen. Zuvor wurde der Differenzdruck der Sonde im Leerbetrieb vor Einführung in das Bohrloch mit Schlauchverbindungen in Abhängigkeit des Volumenstroms für das System bestimmt. Aus den Messdaten Volumenstrom und Differenzdruck wurde die Gaspermeabilität je Messpunkt nach Kemski & Partner [71] berechnet.

Unter Einbezug der Messwerte für die Radonaktivitätskonzentration und der Gaspermeabilität in der Bodenluft wurde die Berechnung des Radonpotenzials nach den Vorgaben von Bossew und Hoffmann (BfS) durchgeführt [72].

### **Radoneintrittsrates**

Die Radoneintrittsrates bzw. Radon-Quellstärke  $Q(Rn)$  beschreibt die Menge des in einen Raum eingebrachten Gehaltes an Radon aufgrund einer Quelle (zumeist Bodengas). Die Radoneintrittsrates wird in Aktivität pro Zeiteinheit ( $Bq/s$ ,  $Bq/h$ ), Aktivität pro Fläche und Zeiteinheit ( $Bq/m^2s$ ,  $Bq/m^2h$ ) oder Aktivität pro Zeiteinheit und Volumen ( $Bq/m^3s$ ,  $Bq/m^3h$ ) ausgedrückt. Nachfolgend wird die Einheit Aktivität pro Zeiteinheit und Volumen in  $Bq/m^3h$  verwendet. Die Radoneintrittsrates wurde aus den gemessenen Daten der Radonkonzentration und dem wirksamen Luftwechsel berechnet.

### **Bestimmung des Luftwechsels**

In der Bauphysik beschreibt der Luftwechsel das Verhältnis des Luftvolumenstroms, also des Volumens der beim Lüften ausgetauschten Luft, zum Volumen des belüfteten Raumes. Als Luftwechselrate bzw. Luftwechselzahl wird der Luftwechsel pro Zeiteinheit bezeichnet. Eine Luftwechselrate von  $1/h$  bedeutet, dass der Volumenstrom der Zuluft gerade ein Raumvolumen pro Stunde beträgt. Aufgrund der Vermischung der Frischluft bzw. Außenluft mit der vorhandenen Raumluft wird jedoch bei einem Luftwechsel von 1 die Raumluft nicht vollständig erneuert. Bei idealer Vermischung verbleiben z.B. noch 37 % der Ausgangskonzentration eines einmalig eingebrachten gasförmigen Schadstoffes (z.B. Radon, Formaldehyd, VOC) bei einem Luftwechsel von  $1/h$  im Raum. Im zeitlichen Verlauf erhält man eine abklingende Exponentialfunktion. Nach einem 5fachen Luftwechsel verbleiben nur noch unter 1 % der Ausgangskonzentration im Raum [74].

Für die langfristige Bestimmung von Luftwechselzahlen ist der Einsatz von Tracergasen nach DIN EN ISO 12569 [67] von besonderer Bedeutung. Es kommen grundsätzlich die Konzentrationsabkling-Methode, die Konstant-Injektions-Methode und die Konstant-Konzentrations-Methode in Frage. Für eine kurzzeitige Überprüfung des Luftwechsels hat sich die Konzentrationsabkling-Methode als robuste und praktische Lösung bewährt [53]. Bei der langfristigen Überprüfung kommt zudem die Konstant-Injektions-Methode in Frage. Die Konstant-Konzentrations-Methode erfordert zusätzlichen messtechnischen Aufwand und wäre in der Praxis schwieriger umsetzbar. Als Tracergase kommen Kohlendioxid ( $CO_2$ ), Schwefelhexafluorid ( $SF_6$ ) als auch Dimethylether (DME) mit hierzu geeigneten zeitauflösenden Detektorgeräten mit Datenlog-Funktion in Frage.

Die Luftwechselbestimmungen wurden nach der Konzentrationsabkling-Methode vorgenommen. Hierzu wurden die Konzentrationen von CO<sub>2</sub> können über die gesamte Messzeit kontinuierlich aufgezeichnet und über das Abklingverhalten in den jeweiligen Intervallen der Nichtnutzung (fehlende Quellstärke Mensch) ausgewertet. Zusätzlich wurden durch Messungen der Raumklimadaten (Temperatur, relative Luftfeuchte) mit Klimaloggern das nutzerbedingte Lüftungsverhalten und die Lüftungsintensitäten bestimmt.

### Bestimmung von Witterungsparametern

Zur Bewertung der Einflüsse von **Wetter und Nutzerverhalten** auf die Radonkonzentrationen und Radon-Eintrittsrates wurden nachfolgende Messgrößen je Objekt ermittelt und ausgewertet:

- Temperatur Innen und Außen in °C (Intervall 1 h)
- Temperaturdifferenz Innen-Außen in °C (Intervall 1 h)
- Absolutdruck in hPa (Intervall 1 h)
- Gradient Absolutdruck in Pa/h (Intervall 1 h)
- Druckdifferenz Innen-Außen in Pa (Intervall 1 h)
- Windstärke in m/s und Windrichtung in Grad (Intervall 1 h)
- Bodenfeuchte/Niederschlagsmenge in mm (Intervall 1 h)
- Niederschlagsmenge in mm (Summe 72 h)
- Lüftungsverhalten - Luftwechsel pro Stunde (Intervall 1 h)
- CO<sub>2</sub>-Konzentration zur Verifizierung des Nutzungs- und Lüftungsverhaltens (Intervall 1 h)

Temperatur (Außen und Boden), relative Luftfeuchtigkeit (Außen), Luftdruck, Niederschlagsmenge, Windstärke und Windrichtung wurden von der nächstgelegenen Messstation des Deutschen Wetterdienstes DWD (CDC – Climate Data Center) über den Link <https://cdc.dwd.de/portal/> und stündliche/tägliche Stationswerte bezogen. Die nachfolgenden Tabellen 4.1 und 4.2 zeigen die zugehörigen Parameter und Produktnamen sowie die nächstgelegenen Stationen für die zum Download zu Verfügung stehenden Messdaten des DWD.

**Tabelle 4.1: Übersicht der verwendeten Parameter und Produkte des DWD (jeweils Stundenwerte)**

Produkt (Titel)	Einheit	Produkt (Code)
Lufttemperatur in 2 m über Grund	°C	OBS_DEU_PT1H_T2M
Relative Luftfeuchtigkeit	%	OBS_DEU_PT1H_RF
Luftdruck Stationshöhe in hPa	hPa	OBS_DEU_PT1H_P0
Luftdruck Meereshöhe in hPa	hPa	OBS_DEU_PT1H_P
Windrichtung ca. 10 m über Grund	degree	OBS_DEU_PT1H_DD
Windstärke ca. 10 m über Grund	m/s	OBS_DEU_PT1H_FF
Niederschlagsmenge	mm	OBS_DEU_PT1H_RR
Bodentemperatur in 100 cm Tiefe	°C	OBS_DEU_PT1H_TE100CM

**Tabelle 4.2: Übersicht über die nächstgelegene Station des DWD je Objekt**

Objekt	Nächstgelegene Station des DWD	SDO_ID
Objekt 1 Bolsterlang	Oberstdorf (Kempten)	3730 (2559)
Objekt 2 Wittingen	Wittingen-Vorhop (Braunschweig)	7432 (662)
Objekt 3 Deckersberg	Nürnberg	3668
Objekt 4 Essen	Essen-Bredeney	1303

#### **4.2 Phase 1: Bestandsaufnahme und Erstmessungen**

Bei der Erstmessung wurde eine umfassende Bestandsaufnahme des Gebäudes je Objekt durchgeführt. Im Mittelpunkt standen hierbei Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration in der Raumluft im definierten Unterdruck (50 Pascal) nach der erweiterten Blower-Door Methode (Rn<sub>50</sub>-Test) bis zur Ausgleichskonzentration [9, 73]. Weiterhin erfolgte die Bestimmung der Radon-Eintrittsrate sowie die Lokalisierung und Quantifizierung von Radon-Eintrittsstellen durch Radon-Sniffing im Unterdruck. Weiterhin wurde der n<sub>50</sub>-Wert gemessen und der Infiltrationsluftwechsel nach DIN EN ISO 9972 bestimmt. Zusätzlich wurden Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft inkl. Permeabilitätsmessungen und Bestimmungen der Radonpotentials (RP) je Standort durchgeführt. Nach der Erstmessung startete das erste Messintervall der saisonalen Messungen je Objekt.

- Bestimmung des Luftwechsels bei 50 Pa Unterdruck (n<sub>50</sub>-Wert)
- Messung der Radon-Konzentration bei 50 Pa Unterdruck (Rn<sub>50</sub>-Wert)
- Berechnung der Radon-Eintrittsrate bei 50 Pa Unterdruck
- Radon-Sniffing, Lokalisierung von Eintrittsstellen
- Messungen der Radon-Konzentration und Permeabilität in der Bodenluft

#### **4.3 Phase 2: Saisonale Messungen**

Die saisonalen Messungen wurden in jedem Objekt mindestens 1mal pro Jahreszeit über 2 bis 4 Wochen durchgeführt. Es wurden zeitauflösende Messungen von Differenzdruck, Luftdruck, Innen- und Außenklima, Radon-Aktivitätskonzentration in der Raumluft nach DIN EN ISO 11665-5 und an erkannten Eintrittsstellen (Radon-Sniffing) durchgeführt. Weiterhin wurde der Luftwechsel mit Tracergas nach der Konzentrations-Abklingmethode mit der Tracergasen CO<sub>2</sub> und SF<sub>6</sub> (in Objekt 4) nach DIN EN ISO 12569 bestimmt.

- Messung der Radon-Konzentration mit Radonmessgerät und Datenlogger im Zeitverlauf (Stundenwerte), Messung im Objektraum und in Nebenräumen
- Klima Langzeitmessungen innen, Messung der Raumklimadaten mit Klima- und Differenzdruck-Datenlogger im Zeitverlauf (Stundenwerte)
- Klima Langzeitmessungen außen (DWD), Messdatensätze des DWD im Zeitverlauf (Stundenwerte) der nächstliegenden Wetterstation je Objekt
- CO<sub>2</sub>-Konzentration Langzeitmessungen (zur Luftwechselbestimmung), Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration mit Datenlogger im Zeitverlauf (Stundenwerte)
- Messung der SF<sub>6</sub>-Konzentration mit Datenlogger im Zeitverlauf (Stundenwerte), nur in Objekt 4

#### **4.4 Phase 3: Jahresmessungen**

Die Langzeitmessungen wurden in jedem Objekt über mindestens 12 Monate durchgeführt. Es wurden hierbei zeitauflösende Messungen von Differenzdruck, Luftdruck, Innen- und Außenklima, Radon-Aktivitätskonzentration in der Raumluft während der normalen Nutzung durchgeführt. Zusätzlich wurden integrierende Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration in der Raumluft nach DIN EN ISO 11665-4 durchgeführt. Weiterhin wurde der Luftwechsel mit Tracergas CO<sub>2</sub> nach der Konzentrations-Abklingmethode und der Konstant-Injektionsmethode jeweils abhängig von der Raumnutzung (Quellstärke Mensch) nach DIN EN ISO 12569 bestimmt.

- Messung der Radon-Konzentration mit Radonmessgerät und Datenlogger im Zeitverlauf (Stundenwerte), Messung im Objektraum
- Radon Langzeitmessungen (integrierend)
- Messung der Radon-Konzentration mit Festkörperspurdetektor FKSD (Jahresmittelwerte), Messung im Objektraum und in Nebenräumen
- Klima Langzeitmessungen innen, Messung der Raumklimadaten mit Klima- und Differenzdruck-Datenlogger im Zeitverlauf (Stundenwerte)
- Klima Langzeitmessungen außen (DWD), Messdatensätze des DWD im Zeitverlauf (Stundenwerte) der nächstliegenden Wetterstation je Objekt
- CO<sub>2</sub>-Konzentration Langzeitmessungen (zur Luftwechselbestimmung), Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration mit Datenlogger im Zeitverlauf (Stundenwerte)

#### **4.5 Ablaufschema Phasen 1 bis 3**

Die zeitlichen Zuordnungen sind in dem nachfolgenden Untersuchungsplan je Objekt in einem grafischen Zeitstrahl in Abbildung 4.1 dargestellt. Die saisonalen Intensivauswertungen wurden in den Zeitreihen markiert (S = Sommer, H = Herbst, F = Frühling und W = Winter). Zusätzlich wurden im Objekt 4 in Essen Vergleichsmessungen mit dem Tracergas SF<sub>6</sub> zur Verifizierung der CO<sub>2</sub>-Messungen für die Luftwechselbestimmungen durchgeführt.



## 5. Darstellung der Untersuchungsergebnisse

### 5.1 Erstbegehung und Bestandsaufnahme mit Quellensuche und $Rn_{50}$ -Test

Die Ergebnisse der Erstbegehung und Bestandsaufnahme mit Quellensuche und  $Rn_{50}$ -Test sind in Tabelle 5.1 in einer Übersicht dargestellt.

**Tabelle 5.1: Messergebnisse Erstbegehung und Bestandsaufnahme mit  $Rn_{50}$ -Test, Quellensuche und Bodengasmessungen**

	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3	Objekt 4
Datum	07.07.2022	24.04.2022	08.07.2022	24.09.2022
Objektraum	Wohnraum UG	Büro UG	Büro EG ( <i>Haus</i> )	Hobbyraum UG
$n_{50}$ -Wert [1/h], nur Objektraum	3,6	2,1	-- ( <i>4,0</i> )	3,1
$n_4$ -Wert [1/h], nur Objektraum	0,72	0,38	-- ( <i>0,75</i> )	0,65
Luftwechsel [1/h], vor Ort gemessen	0,18	0,20	<i>0,30</i>	0,04
$Rn_{50}$ -Wert [Bq/m <sup>3</sup> ]	510	460	-- ( <i>3300</i> )	530
Rn-Quellstärke bei 50 Pa [Bq/m <sup>3</sup> h]	1836	966	-- ( <i>13200</i> )	1643
Rn-Quellstärke bei 4 Pa [Bq/m <sup>3</sup> h]	147	77	-- ( <i>1056</i> )	131
Rn-Quellensuche [kBq/m <sup>3</sup> ]	20	10	45	26
Rn-Bodenluftkonzentration* Rn [kBq/m <sup>3</sup> ]	85	42	11	42
Bodenluft Permeabilität* [m <sup>2</sup> ]	1,6E-12	1,8E-12	3,8E-12	2,0E-13
Radonpotenzial* [RP]	47	24	8	16
Rn-Bodenluftkonzentration** [kBq/m <sup>3</sup> ] 90.P	103	60	70	79
Radonpotenzial** [RP]	28	8,3	12	37

\* bezogen auf 1 Meter Probenahmetiefe, \*\* nach Geoportal BfS

Die Luftwechselzahlen im Unterdruck bei 50 Pascal ( $\sim n_{50}$ ) liegen in den Objekträumen (Objekte 1, 2 und 4 - jeweils im Unterschoss) im Normalbereich von Bestandsgebäuden zwischen 2,1/h und 4,0/h. Die im Unterdruck gemessenen maximalen Radonkonzentrationen ( $Rn_{50}$ -Werte) liegen bei 460 bis 530 Bq/m<sup>3</sup> und zeigen einen signifikanten Radoneintritt mit auffällig hohen Radon-Eintrittsraten. In Objekt 3 konnte aus technischen Gründen nur das gesamte Raumvolumen des Gebäudes (ohne Keller) mittel Blower-Door ( $Rn_{50}$ -Test) untersucht werden. Die Messdaten sind in der Tabelle 5.1 kursiv und in Klammern dargestellt. Es zeigt sich auch hier eine sehr hohe Radon-Eintrittsrate mit einem  $Rn_{50}$ -Wert von 3300 Bq/m<sup>3</sup> für das gesamte Gebäude und hohe Werte beim Radon-Sniffing, welche mit 45 kBq/m<sup>3</sup> deutlich über den im Boden neben dem Gebäude gemessenen Radon-Bodenluftkonzentrationen in 1 Meter Tiefe (11 kBq/m<sup>3</sup>) liegen.

Die in den Objekträumen vor Ort gemessenen Luftwechselraten durch Infiltration des Gebäudes liegen zwischen 0,04 /h und 0,30 /h. Nach den im Differenzdruckverfahren ermittelten Volumenströmen ergeben sich für einen Differenzdruck von durchschnittlich 4 Pascal etwas höhere

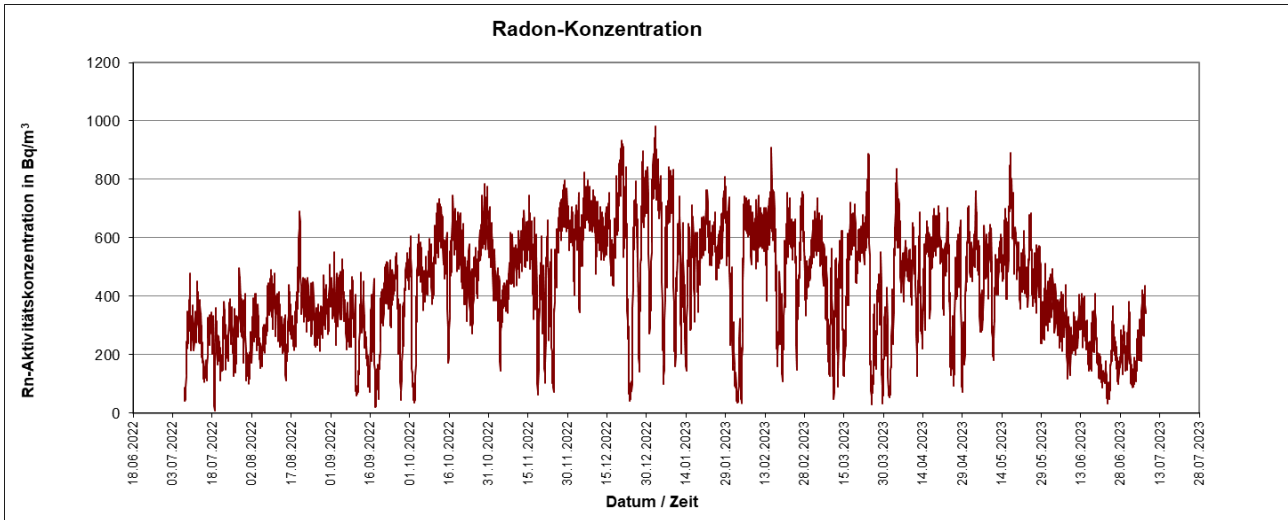
Luftwechselraten mit  $n_4$ -Werten zwischen 0,38/h und 0,72/h. Die Differenz zwischen den  $n_4$ -Werten und den gemessenen Luftwechselraten lassen sich dadurch erklären, dass bei der messtechnischen Betrachtung eines Raumes auch ein Teil der beim Blower-Door-Verfahren ausgetauschten Luft aus angrenzenden Räumen innerhalb des Gebäudes stammen kann. Dieser Effekt wird in Objekt 4 besonders deutlich, da der untersuchte Objektraum aus Schallschutzgründen besonders gut gegen die Außenluft abgedichtet wurde.

Die Messungen in der Bodenluft liefern an den Objektstandorten Radonpotentialwerte im Bereich von 8 bis 47. Die gemessenen Werte liegen für die Objekte 1 und 2 etwas über und für die Objekte 3 und 4 etwas unter den für die Regionen prognostizierten Radonpotentialwerte nach BfS-Geoportal. Der höchste Potentialwert von 47 wurde für Objekt 1 in der Nähe von Oberstdorf bestimmt.

## 5.2 Radon Langzeitmessungen (zeitauflösend)

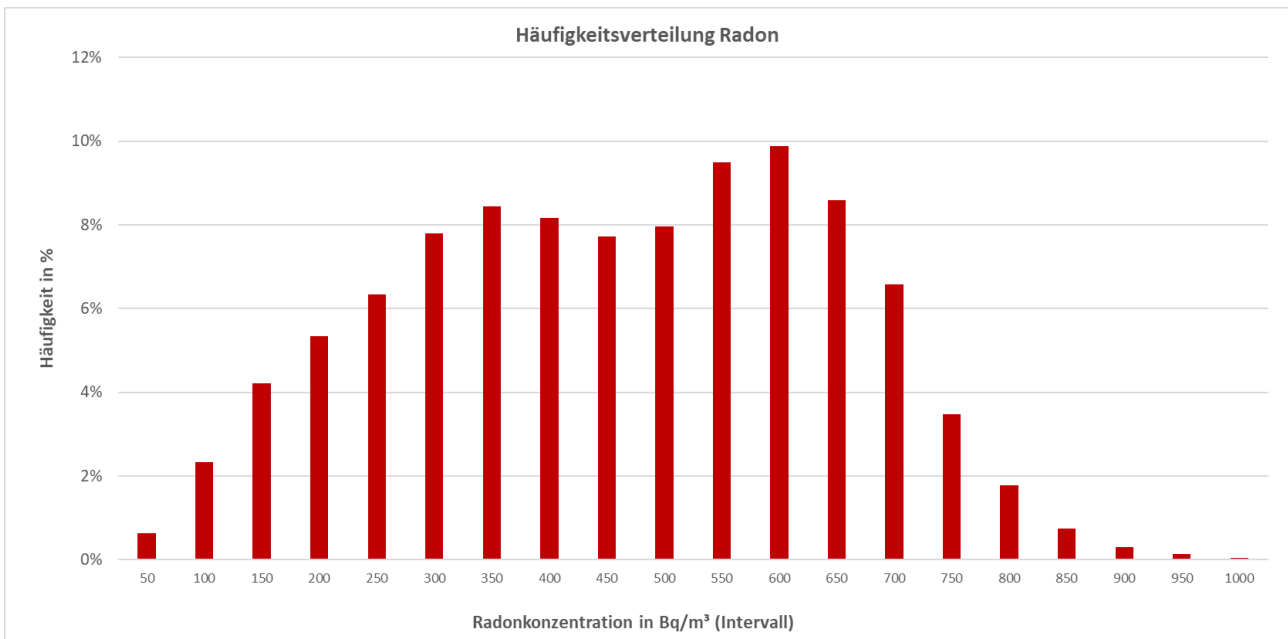
Die Ergebnisse der zeitauflösenden Radonmessungen sind in den Abbildungen 5.1 bis 5.8 jeweils in grafischer Übersicht und die Mittelwerte in Tabelle 5.2 dargestellt.

Abb. 5.1: Radonmessungen Objekt 1 in Bolsterlang / Nähe Oberstdorf in Bayern, Stundenwerte



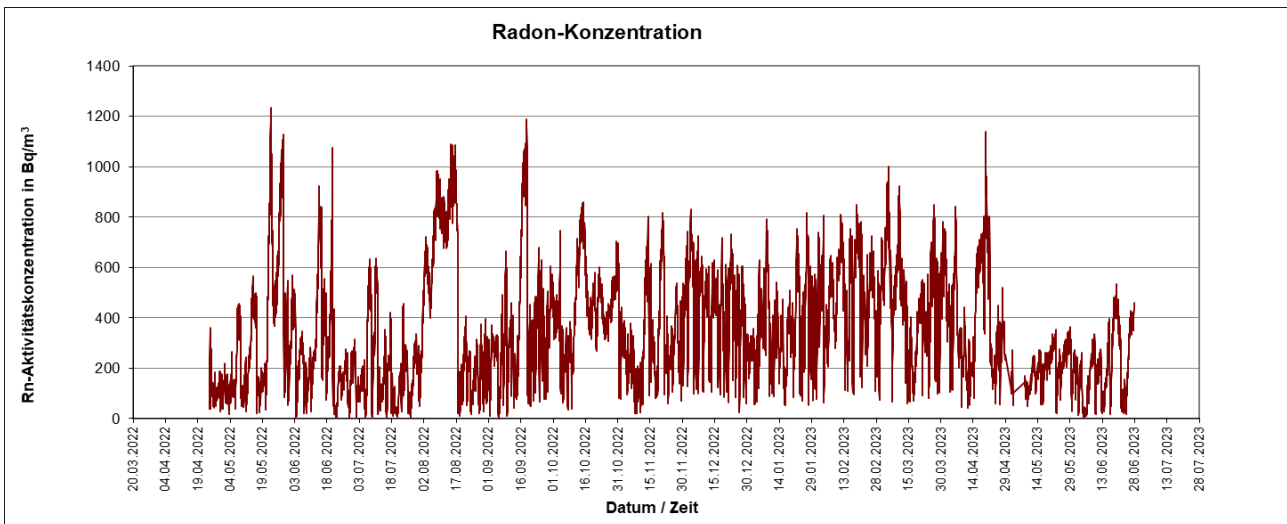
Die zeitauflösenden Messungen der Radonaktivitätskonzentrationen im Objektraum in Objekt 1 in Bolsterlang zeigen einen deutlichen Jahresgang mit niedrigeren Werten im Sommer bei einem Jahresmittelwert von 435 Bq/m³. Die Messwerte der Stundenauswertungen liegen zwischen 10 Bq/m³ (MIN) und 983 Bq/m³ (MAX).

Abb. 5.2: Radonmessungen Objekt 1 in Bolsterlang / Nähe Oberstdorf in Bayern, Verteilung der Messwerte



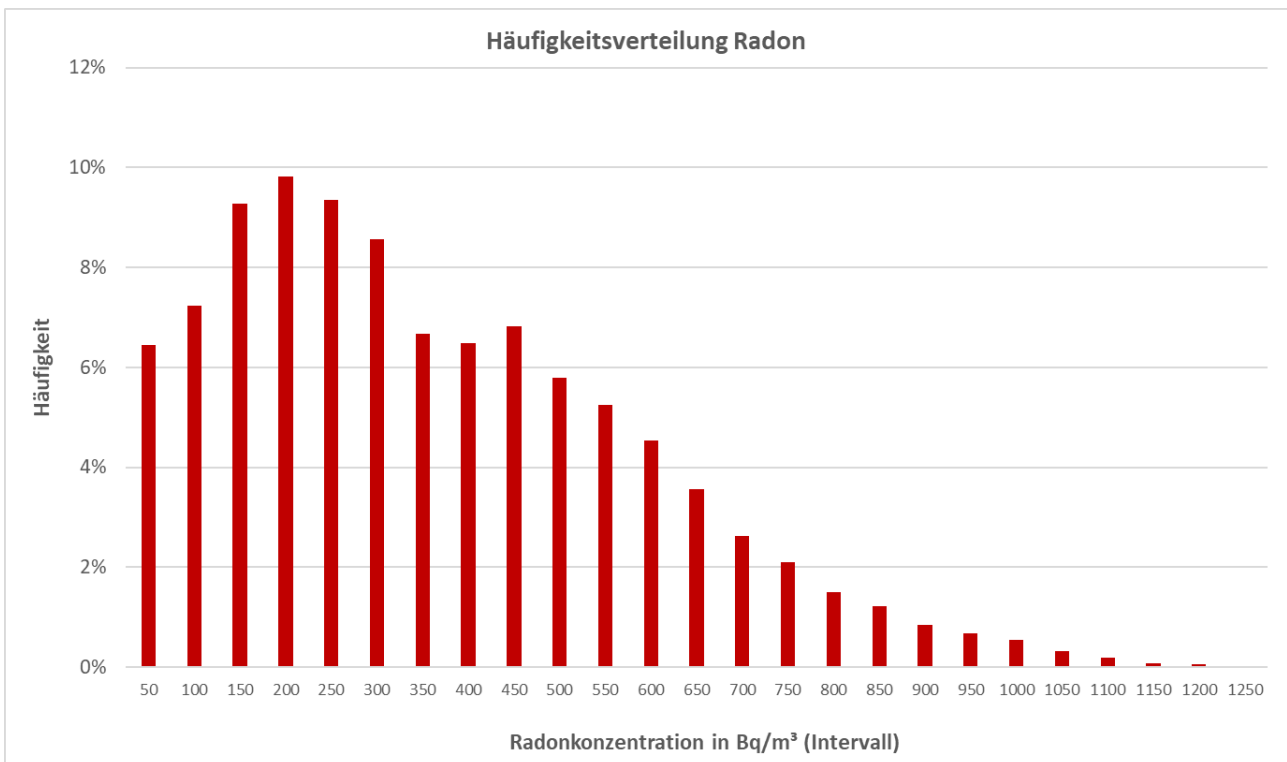
Die Verteilung der Messwerte zeigt in Abbildung 5.2 eine annähernd gaußsche Verteilung um den Mittelwert von 435 Bq/m³ mit zwei Häufungen im Bereich von 350 Bq/m³ und 600 Bq/m³.

**Abb. 5.3: Radonmessungen Objekt 2 in Wittingen / Niedersachsen, Stundenwerte**



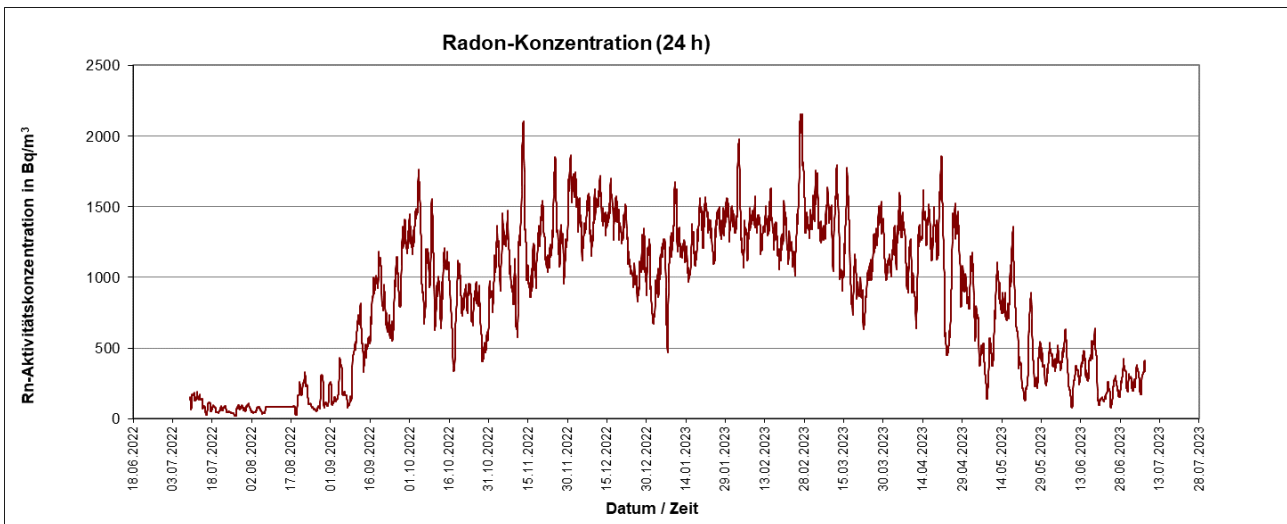
Die zeitauflösenden Messungen der Radonaktivitätskonzentrationen im Objektraum in Objekt 2 in Wittingen zeigen in Abbildung 5.3 einen weniger ausgeprägten Jahresgang mit geringfügig niedrigeren Werten im Sommer bei einem Jahresmittelwert von 346 Bq/m<sup>3</sup>. Die Messwerte der Stundenauswertungen liegen zwischen 0 Bq/m<sup>3</sup> (MIN) und 1233 Bq/m<sup>3</sup> (MAX).

**Abb. 5.4: Radonmessungen Objekt 2 in Wittingen / Niedersachsen, Verteilung der Messwerte**



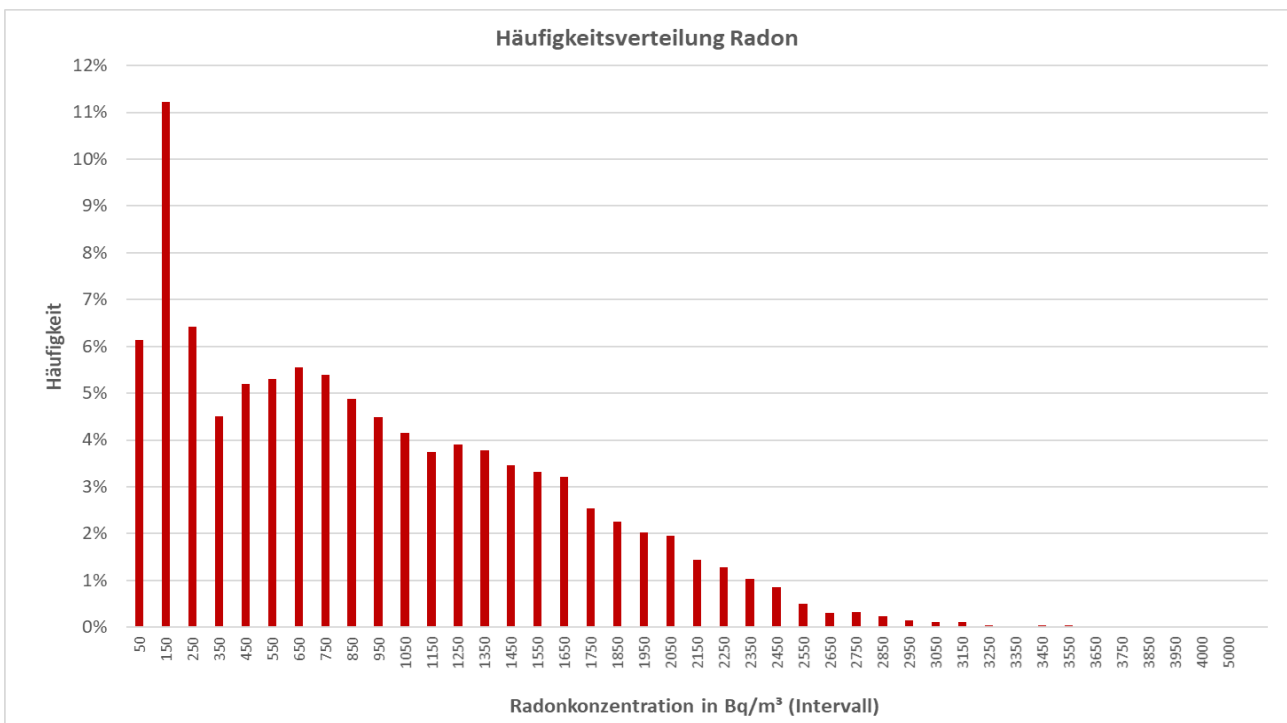
Die Verteilung der Messwerte zeigt in Abbildung 5.4 einen Maximalwert um 200 Bq/m<sup>3</sup> und einen breiteren exponentiell abfallenden Verlauf bis zu Maximalwerten um 1200 Bq/m<sup>3</sup>.

**Abb. 5.5: Radonmessungen Objekt 3 in Deckersberg / Mittelfranken in Bayern, Tageswerte**



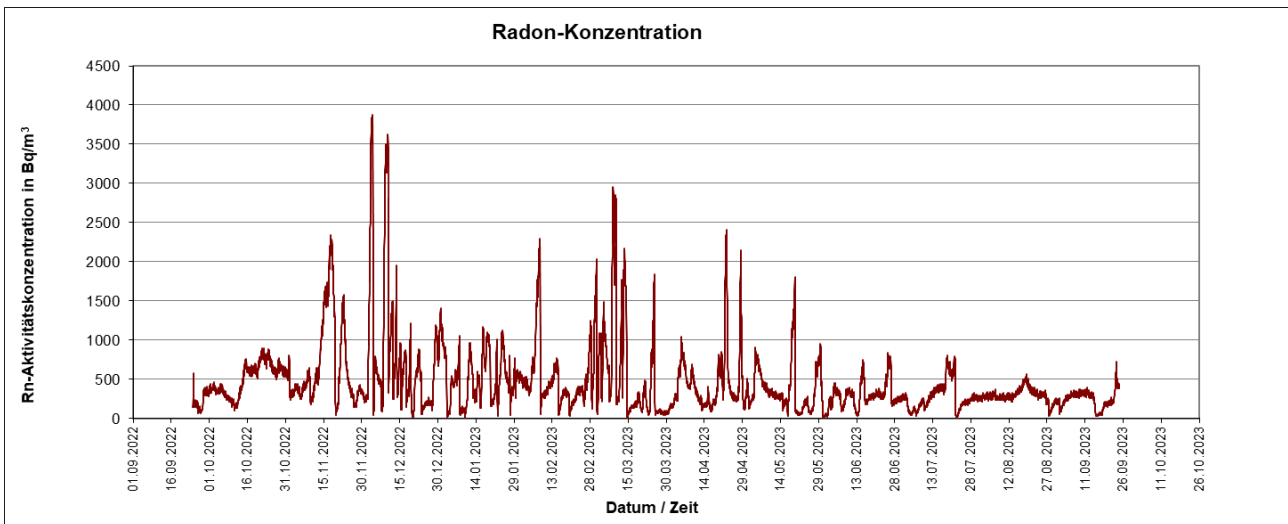
Die zeitauflösenden Messungen der Radonaktivitätskonzentrationen im Objektraum in Objekt 3 in Deckersberg zeigen in Abbildung 5.5 einen sehr deutlichen Jahresgang mit niedrigeren Werten im Sommer bei einem Jahresmittelwert von 881 Bq/m<sup>3</sup>. Die Messwerte der Stundenauswertungen liegen zwischen 2 Bq/m<sup>3</sup> (MIN) und 4022 Bq/m<sup>3</sup> (MAX). Zusätzlich liegen im Objekt 3 sehr deutliche Tagesgänge vor, daher wurden in der grafischen Darstellung von Abbildung 5.5 die gleitenden 24 h Mittelwerte abgebildet.

**Abb. 5.6: Radonmessungen Objekt 3 in Deckersberg / Mittelfranken in Bayern, Verteilung der Messwerte**



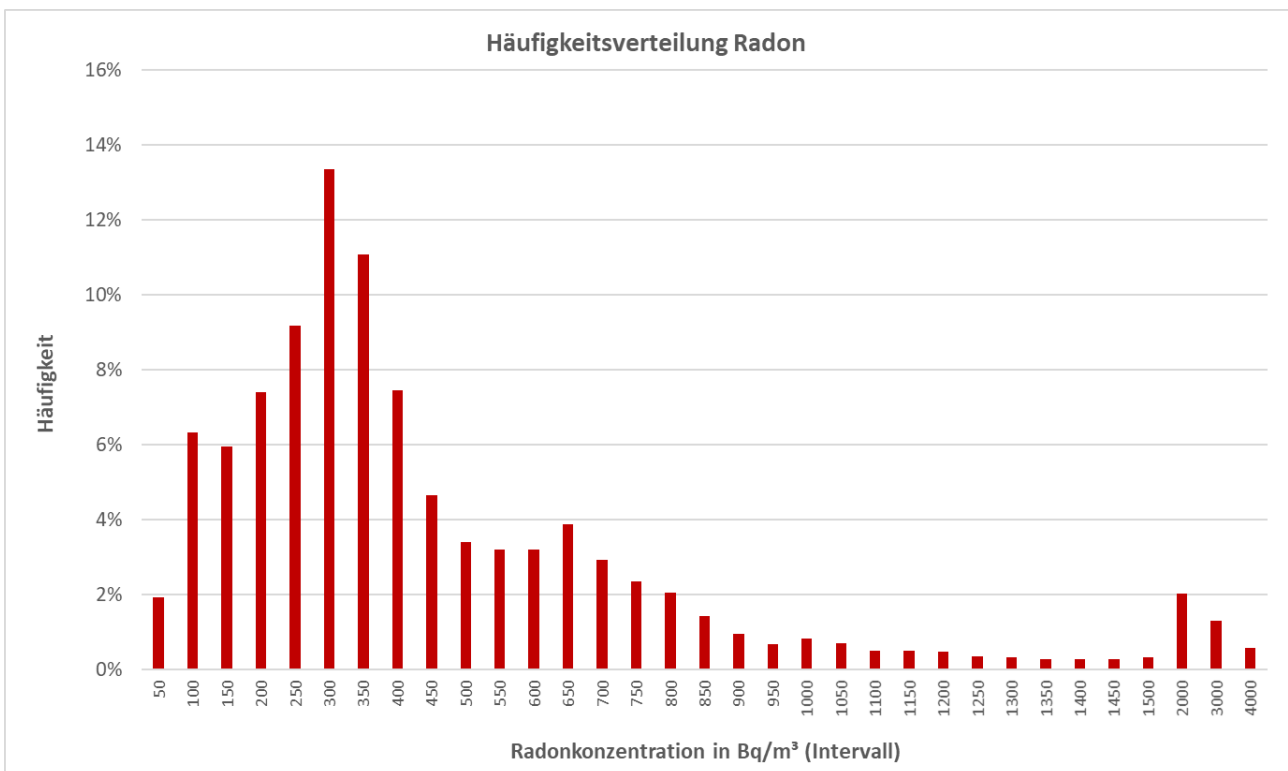
Die Verteilung der Messwerte zeigt in Abbildung 5.6 Maximalwerte um 150 Bq/m<sup>3</sup> und um 700 Bq/m<sup>3</sup> und einen breiteren linear/exponentiell abfallenden Verlauf bis zu Maximalwerten um 4000 Bq/m<sup>3</sup>.

**Abb. 5.7: Radonmessungen Objekt 4 in Essen / NRW, Stundenwerte**



Die zeitauflösenden Messungen der Radonaktivitätskonzentrationen im Objektraum in Objekt 4 in Essen zeigen in Abbildung 5.7 einen weniger deutlichen Jahrgang mit niedrigeren Werten im Sommer bei einem Jahresmittelwert von 462 Bq/m<sup>3</sup>. Die Messwerte der Stundenauswertungen liegen zwischen 7 Bq/m<sup>3</sup> (MIN) und 3880 Bq/m<sup>3</sup> (MAX). Zusätzlich liegen im Objekt 4 sehr deutliche kurzzeitige Spitzenwerte vor, die insbesondere in der Heizperiode (Dezember 2022 und Februar 2023) in Erscheinung treten.

**Abb. 5.8: Radonmessungen Objekt 4 in Essen / NRW, Verteilung der Messwerte**



Die Verteilung der Messwerte zeigt in Abbildung 5.8 einen Maximalwert um 300 Bq/m<sup>3</sup> mit leichten Häufungen um 650 Bq/m<sup>3</sup> und einen breiteren linear/exponentiell abfallenden Verlauf bis zu 1500 Bq/m<sup>3</sup> und eine weitere leichte Häufung bis zu dem Maximalwert um 4000 Bq/m<sup>3</sup>.

### 5.3 Radon Langzeitmessungen (integrierend)

Neben den zeitauflösenden Messungen der Radon-Konzentrationen wurden in den Objekträumen auch integrierende Messungen mit Festkörperspurdetektoren (FKSD) über die gesamte Messzeit als Jahresmittelwerte durchgeführt. Zusätzlich wurden auch in 2 Nebenräumen Messungen mit Festkörperspurdetektoren durchgeführt. Die Ergebnisse der integrierenden Messungen sind in Tabelle 5.2 in der Übersicht in Vergleich zu den Mittelwerten der zeitauflösenden Messungen dargestellt.

**Tabelle 5.2: Messergebnisse Radonkonzentration (zeitauflösende und integrierende Messungen)**

	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3	Objekt 4
Messzeit (zeitauflösend)	07.07.2022 bis 07.07.2023	24.04.2022 bis 05.07.2023	08.07.2022 bis 07.07.2023	24.09.2022 bis 24.09.2023
Messzeit (integrierend)	07.07.2022 bis 07.07.2023	17.08.2022 bis 05.07.2023	08.07.2022 bis 07.07.2023	24.09.2022 bis 24.09.2023
Radonkonzentration Objektraum (zeitauflösend) in Bq/m <sup>3</sup>	435	346	881	462
Radonkonzentration Objektraum (integrierend) in Bq/m <sup>3</sup>	400	310	650	460
Radonkonzentration Nebenraum 1 (integrierend) in Bq/m <sup>3</sup>	230	320	590	77
Radonkonzentration Nebenraum 2 (integrierend) in Bq/m <sup>3</sup>	180	260	630	68

Die Ergebnisse der integrierenden Messungen zeigen für die Objekte 1, 2 und 4 gute Übereinstimmungen mit den Mittelwerten aus den zeitauflösenden Messungen mit Abweichungen unter 10 %. Im Objekt 3 zeigt die integrierende Messung mit 650 Bq/m<sup>3</sup> eine etwas niedrigere Radonkonzentration mit einer Abweichung von ca. 25 % zu dem Mittelwert aus den zeitauflösenden Messungen mit 881 Bq/m<sup>3</sup>.

Die Ergebnisse der integrierenden Messungen in den Nebenräumen zeigen für die Objekte 2 und 3 Radonkonzentrationen in sehr ähnlichen Größenordnungen in Vergleich zum Objektraum. In Objekt 1 liegen in den Nebenräumen um ca. 50 % niedrigere Konzentrationen in Vergleich zum Objektraum vor. In Objekt 4 liegen in den Nebenräumen um ca. 85 % deutlich niedrigere Konzentrationen in Vergleich zum Objektraum vor.

### 5.4 Klima Langzeitmessungen innen

Die zeitauflösenden Messungen der Klimaparameter wurden in den Objekträumen mit Klima-Datenloggern durchgeführt. Die Ergebnisse der Mittelwerte sind in Tabelle 5.3 in der Übersicht dargestellt.

**Tabelle 5.3: Messergebnisse Raumklimamessungen (zeitauflösende Messungen, Mittelwerte)**

	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3	Objekt 4
Messzeit (zeitauflösend)	07.07.2022 bis 07.07.2023	24.04.2022 bis 05.07.2023	08.07.2022 bis 07.07.2023	24.09.2022 bis 24.09.2023
Raumtemperatur in °C	19,1	19,3	20,5	18,4
Raumluftfeuchte in % r.F.	45,5	53,2	55,5	67,0

Die zeitauflösenden Messungen der Klimaparameter zeigen in den Objekträumen im Jahresmittel typische Raumklimawerte mit Lufttemperaturen zwischen 18,4 und 20,5 °C und Luftfeuchtwerte zwischen 45,5 und 67,0 % r.F. Alle Objekträume werden im Winter beheizt und über die Fenster und Türen manuell belüftet. Zusätzlich wurden zeitauflösende Messungen des Differenzdruckes mit Datenloggern zwischen Objektraum und Außenluft durchgeführt und in Tabelle 5.4 dargestellt.

**Tabelle 5.4: Messergebnisse Differenzdruckmessungen (zeitauflösende Messungen, Mittelwerte)**

	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3	Objekt 4
Messzeit (zeitauflösend)	07.11.2022 bis 07.07.2023	01.12.2022 bis 01.05.2023	--	01.11.2022 bis 24.09.2023
Differenzdruck in - Pa (Unterdruck)	2,9	3,1	--	2,4

Die zeitauflösenden Differenzdruckmessungen konnten als Stundenwerte aus technischen Gründen nicht für die gesamte Messzeit erhoben werden. Für die Objekte 1, 2 und 4 liegen Datensätze über 5 bis 10 Monate vor. Für Objekt 3 liegen keine Messdaten vor.

Die Ergebnisse der Differenzdruckmessungen zeigen Mittelwerte von 2,4 bis 3,1 Pascal Unterdruck und liegen hiermit im normalen Wertebereich von Wohnhäusern mit 1 bis 2 Wohnetagen von 2 bis 4 Pascal im Jahresmittel.

### 5.5 Klima Langzeitmessungen außen (DWD)

Die zeitauflösenden Messdaten der nächstliegenden Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurden als Stundenwerte für die Objekte zusammengestellt und in Tabelle 5.5 in der Übersicht dargestellt.

**Tabelle 5.5: Messergebnisse Außenklimadaten des DWD (zeitauflösende Messungen, Mittelwerte)**

	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3	Objekt 4
Messzeit (zeitauflösend)	07.07.2022 bis 07.07.2023	24.04.2022 bis 05.07.2023	08.07.2022 bis 07.07.2023	24.09.2022 bis 24.09.2023
Außenlufttemperatur in °C	8,5	11,4	10,9	11,8
Außenluftfeuchte in % r.F.	80,1	74	73,2	75,8
Niederschlag in mm	0,19	0,06	0,07	0,13
Luftdruck in hPa	925	1007	980	998
Windstärke in m/s	2,0	3,3	3,1	3,2

Zusätzlich wurden nachfolgende zeitauflösende Messdaten erhoben:

- Windrichtung (Grad)
- Bodenlufttemperatur in 1 Meter Tiefe (°C)
- Luftdruck bezogen auf Meeresspiegel nN (hPa)

## 5.6 CO<sub>2</sub>-Konzentration Langzeitmessungen (zur Luftwechselbestimmung)

Die Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen wurde in den Objekträumen mit Datenlogger im Zeitverlauf (Stundenwerte) aufgezeichnet und als Mittelwerte und Maximalwerte in Tabelle 5.6 dargestellt.

**Tabelle 5.6: Messergebnisse CO<sub>2</sub>-Konzentration (zeitauflösende Messungen, Mittelwerte)**

	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3	Objekt 4
Messzeit (zeitauflösend)	07.07.2022 bis 07.07.2023	24.04.2022 bis 05.07.2023	08.07.2022 bis 07.07.2023	24.09.2022 bis 24.09.2023
CO <sub>2</sub> -Konzentration in ppm (Mittelwert)	508	691	942	1129
CO <sub>2</sub> -Konzentration in ppm (Maximalwert)	3454	2069	2383	5757

Für die Auswertung sind insbesondere die kurzzeitlichen Änderungen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen über den Zeitverlauf wichtig, welche zur Bestimmung des Luftwechsels genutzt werden können. Die Mittelwerte aus der Tabelle 5.6 können für die Objekte 2, 3 und 4 als Maß für die Art und Intensität der Raumnutzung verwendet werden. Als Hintergrundkonzentrationen in den Außenluft werden näherungsweise 400 ppm angenommen.

Der Objektraum im Objekt 1 wurde während der Messdauer nicht genutzt. Es handelt sich um eine Ferienwohnung. Aufgrund der fehlenden CO<sub>2</sub>-haltigen Atemluft wurde zu den saisonalen Messungen jeweils ausreichende und nutzungstypische Luftkonzentrationen von CO<sub>2</sub> über eine Gasflasche (CO<sub>2</sub>-Löscher) in den Raum eingebracht.

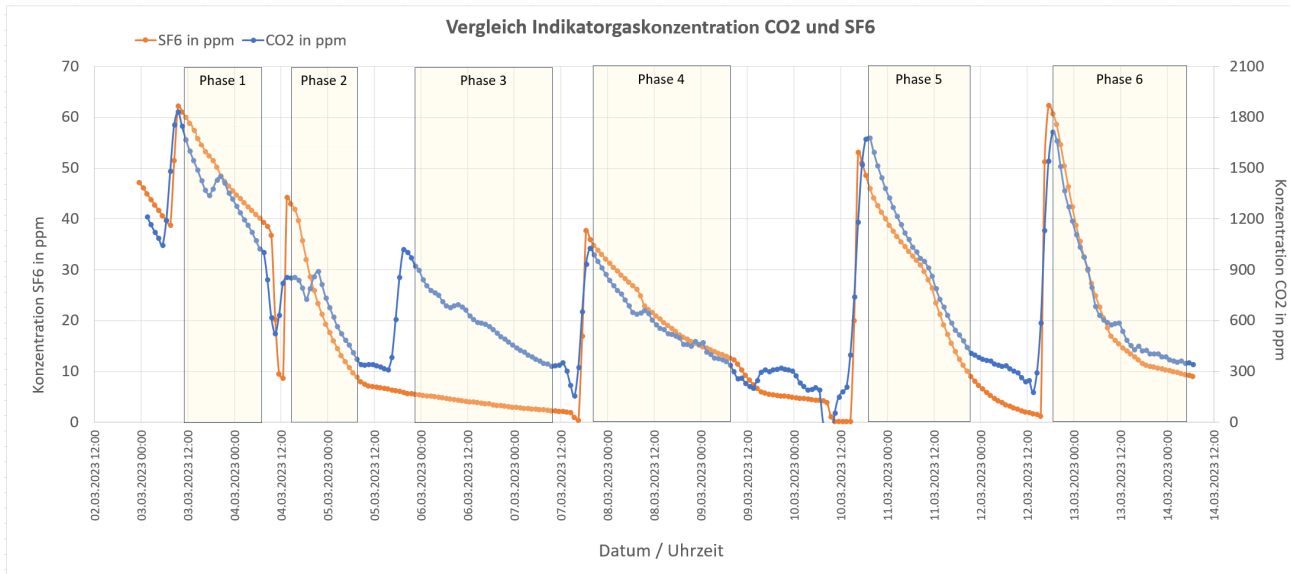
### Verifizierung von CO<sub>2</sub> als Indikatorgas für die Luftwechselbestimmungen

Zusätzlich wurden über einen Zeitraum von 11 Tagen Messungen der SF<sub>6</sub>-Konzentration mit Datenlogger im Zeitverlauf (Stundenwerte) in Objekt 4 im März 2023 zur Verifizierung der CO<sub>2</sub>-Messungen für die Luftwechselbestimmungen durchgeführt.

Während der Vergleichsmessungen wurde der Raum fünfmal mit einer Anfangskonzentration von Indikatorgas SF<sub>6</sub> und sechsmal mit Indikatorgas CO<sub>2</sub> dotiert (Phase 3 nur CO<sub>2</sub>). Die Konzentrationsverläufe wurden aufgezeichnet und der Luftwechsel über die Konzentrations-Abklingmethode nach DIN EN ISO 12569 über die Exponentialfunktion für 6 ausgewählte Zeitintervalle (Phasen 1 bis 6) bestimmt (siehe Abbildung 5.9). Die Ergebnisse der Luftwechselbestimmungen sind in Tabelle 5.7 aufgeführt. Insgesamt zeigen sich in den einzelnen Auswertungsphasen gute Übereinstimmungen im Vergleich beider Indikatorgase. Die Mittelwerte der Phasen 1 bis 6 liegen bei CO<sub>2</sub> bei 0,049/h und bei SF<sub>6</sub> bei 0,045/h. Die Mittelwerte über die gesamte Aufzeichnungsdauer (inkl. 3 Intensivlüftungen) liegen bei CO<sub>2</sub> bei 0,071/h und bei SF<sub>6</sub> bei 0,068/h.

Aufgrund der Vergleichsmessungen kann davon ausgegangen werden, dass unter Berücksichtigung von Randbedingungen (Außenluft, Störungen durch Bodenluft) die Auswertung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverläufe zur Luftwechselbestimmung in den Objekträumen gut geeignet ist.

**Abb. 5.9: Konzentrationsverläufe der Indikatorngase CO<sub>2</sub> und SF<sub>2</sub> (zeitauflösende Messungen)**



**Tabelle 5.7: Luftwechselraten der Indikatorngase CO<sub>2</sub> und SF<sub>2</sub>**

	Indikatorngas SF <sub>6</sub> Luftwechsel in 1/h	Indikatorngas CO <sub>2</sub> Luftwechsel in 1/h
Phase 1	0,04	0,02
Phase 2	0,06	0,09
Phase 3	0,04	0,03
Phase 4	0,05	0,03
Phase 5	0,04	0,05
Phase 6	0,06	0,06
Mittelwert Phasen 1 - 6	0,049	0,045
Mittelwert gesamt	0,071	0,068

## 5.7 Objektraum, Raumnutzung und Nutzerverhalten

Die Art und Intensität der Raumnutzung und des Nutzerverhaltens ist in Tabelle 5.8 in einer Übersicht dargestellt.

**Tabelle 5.8: Objektraum, Raumnutzung und Nutzerverhalten**

	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3	Objekt 4
Messzeit	07.07.2022 bis 07.07.2023	24.04.2022 bis 05.07.2023	08.07.2022 bis 07.07.2023	24.09.2022 bis 24.09.2023
Objektraum	Wohnraum UG	Büro UG	Büro EG	Hobbyraum UG
Objektraum [m <sup>2</sup> ]	27	24	13	20
Objektraum [m <sup>3</sup> ]	60	60	33	45
Anzahl Fenster	1	2	1	1
Anzahl Innentüren	1	1	1	1
Anzahl Außentüren	1	1	0	0
Anzahl Außenwände	2	1	1	2
Anzahl Außenwände erdberührend	0	0	0	2
Anzahl Raumnutzer	0	1	1	0 - 4
Nutzungsart	Ferienwohnung	Büro	Büro	Musikstudio
Nutzungsdauer (Stunden pro Tag)	0	5	5	0,5
Lüftungsvorgänge pro Tag	0	1	1	0,5
Längere Phasen der Nichtnutzung (Urlaub)	durchgehend	01.08.2022 bis 17.08.2023 und 10.10.2023 bis 01.11.2023	19.12.2022 bis 09.01.2023	06.07.2023 bis 23.07.2023

Die Untersuchungen wurden in Objekt 1 in einem Wohnraum einer Ferienwohnung durchgeführt. Die Wohnung liegt im Gartengeschoss eines größeren Mehrfamilienhauses mit 3 Wohnetagen und 5 Wohneinheiten in Hanglage. Während der Messzeit wurde die Wohnung nicht genutzt und nur in unregelmäßigen Zeitintervallen über die Fenster bzw. die Terrassentür belüftet.

Die untersuchten Objekträume in Objekt 2 und 3 werden regelmäßig von 1 Person als Büro genutzt mit einer durchschnittlichen Nutzungsdauer - auch über die Wochenenden - von ca. 5 Stunden pro Tag und einem täglichen Lüftungsvorgang über die Fenster.

Beim untersuchten Objektraum in Objekt 4 handelt es sich um einen Hobbyraum im Keller eines Mehrfamilienhauses mit 3 Wohnetagen, der unregelmäßig von 1 bis maximal 4 Personen als Musikstudio genutzt wird. Die durchschnittliche Nutzungsdauer - auch über die Wochenenden - beträgt ca. 0,5 Stunden pro Tag. Die Raumlüftung erfolgt durchschnittlich jeden 2. Tag über das Fenster und die Innentür zum gut belüfteten Kellerflur.

## 6. Auswertung

### 6.1 Berechnung der Luftwechselraten anhand der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

Die Berechnung der Luftwechselraten  $n$  (in 1/h) durch Infiltration erfolgte anhand der von den Raumnutzern über die Atmung gebildeten und gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Zeitverlauf mit der Konzentrations-Abklingmethode nach DIN EN ISO 12569 über die Exponentialfunktion während der Zeitintervalle der Nicht-Nutzung gem. Gleichung 1 bzw. Gleichung 2.

Gleichung 1

$$\sigma_t = \sigma_{t=t_0} \cdot e^{-nt}$$

Gleichung 2

$$n = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \frac{\sigma_{t=t_1}}{\sigma_{t=t_2}}$$

mit

$\sigma_t$  = Indikatorgaskonzentration Ende Zeitintervall (z.B. ppm oder Bq/m<sup>3</sup>)

$\sigma_{t=t_0}$  = Indikatorgaskonzentration Anfang Zeitintervall (z.B. ppm oder Bq/m<sup>3</sup>)

$\sigma_{t=t_1}$  = Indikatorgaskonzentration Anfang Zeitintervall (z.B. ppm oder Bq/m<sup>3</sup>)

$\sigma_{t=t_2}$  = Indikatorgaskonzentration Ende Zeitintervall (z.B. ppm oder Bq/m<sup>3</sup>)

$t_1$  = Anfangszeitpunkt 1 in h

$t_2$  = Zeitpunkt 2 in h

$n$  = Luftwechsel im Zeitintervall in 1/h

Die Berechnung der mittleren Luftwechselraten erfolgte gem. DIN/TS 18117-2 (Entwurf 03/24) aus dem harmonischen Mittel (nicht arithmetisch) nach Gleichung 3.

Gleichung 3

$$\bar{n}_{\text{harm}} = \frac{t_1 + t_2 + \dots}{t_1/n_1 + t_2/n_2 + \dots}$$

mit

$\bar{n}_{\text{harm}}$  = maßgeblicher Luftwechsel (gewichtetes harmonisches Mittel) in 1/h

$t_1, t_2$  = Dauer des (Luftwechsel-)Zustandes 1 bzw. 2 in h

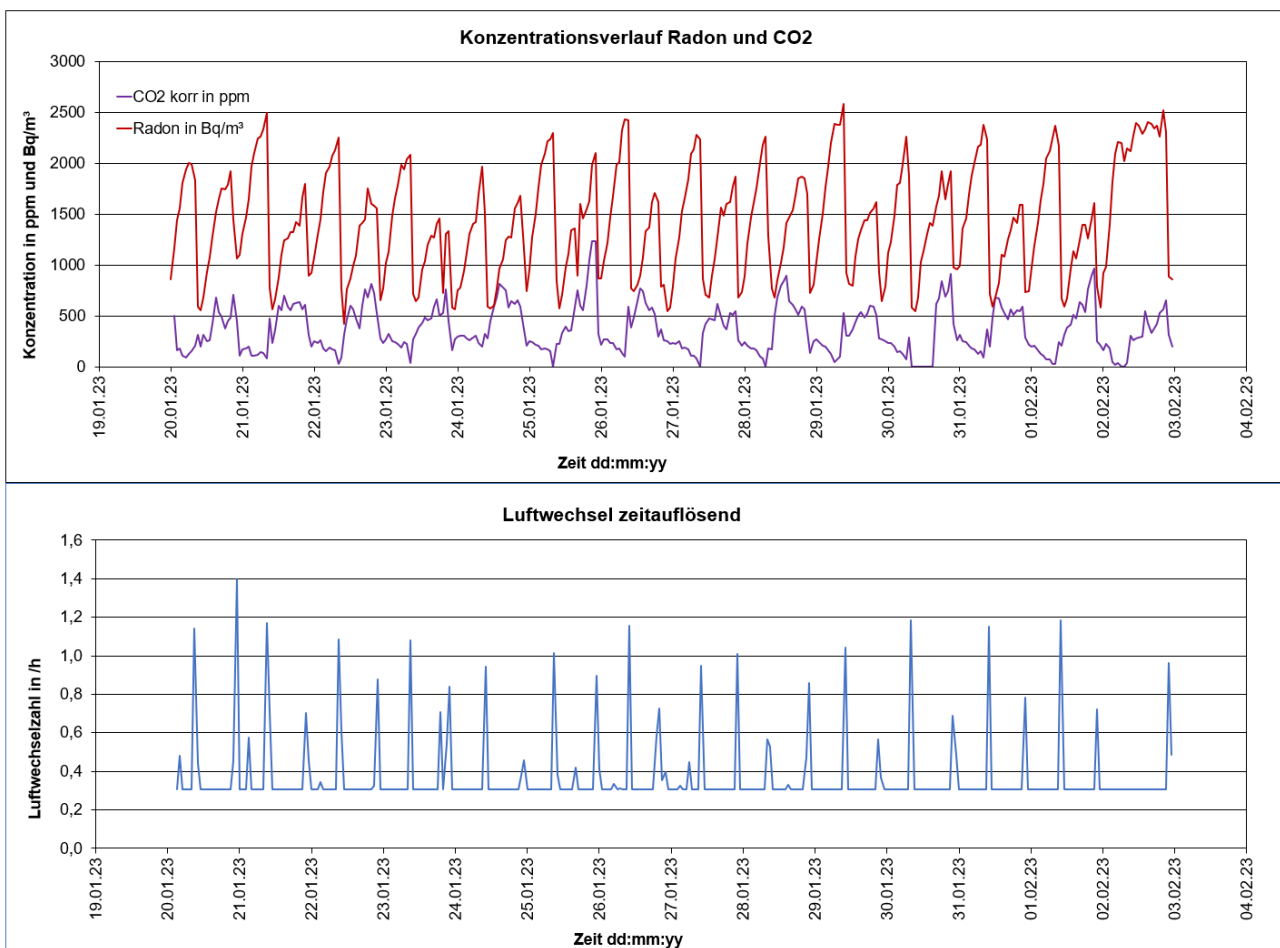
$n_1, n_2$  = Luftwechsel im Zustand 1 bzw. 2 in 1/h

Bei der Auswertung und Darstellung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverläufe wurde die Hintergrundkonzentration (Außenluft) von 400 ppm und die CO<sub>2</sub>-Einträge über die Bodenluft subtrahiert.

In den Zwischenzeiten der Nutzung konnten die durch die Personen im Raum gebildeten und meist ansteigenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nicht für die Bestimmung des Luftwechsels genutzt werden. Ebenso wurden sehr niedrige CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (unter 500 ppm) nicht für die Bestimmung des Luftwechsels genutzt. In diesen Phasen wurden die durch manuelle Lüftung bedingten stark abfallenden Radonkonzentrationen identifiziert und als Bezug zur Berechnung des durch die Nutzer bewirkten zusätzlichen Luftwechsels gem. Gleichung 2 herangezogen. Ohne wesentliche Änderung der Radonkonzentration wurde der ermittelte Infiltrationswechsel für den Beobachtungszeitraum angenommen. Zusätzlich wurde der Hintergrund der Außenluft (bei CO<sub>2</sub> ca. 400 ppm) und der Anteil durch den Eintrag über die Bodenluft bei hohen Radonkonzentrationen berücksichtigt (ca. 30 - 100 ppm je 100 Bq/m<sup>3</sup>).

In Abbildung 6.1 sind beispielhaft die Konzentrationsverläufe Radon und CO<sub>2</sub> und abgeleitete Werte für den Luftwechsel für die Wintermessung in Objekt 3 dargestellt. Es zeigen sich sehr periodische Konzentrationsverläufe mit Spitzenwerten der Radonkonzentrationen in den frühen Morgenstunden bis ca. 2500 Bq/m<sup>3</sup> und Spitzenwerten der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (korrigierte Werte abzüglich Anteile Außenluft und Bodenluft) in den späteren Abendstunden. Es konnten insgesamt 28 relevante Lüftungsvorgänge durch manuelle Lüftung beobachtet werden, bei denen Luftwechselraten von 0,6 /h bis 1,4 /h erreicht wurden. So können durchschnittlich 2 Lüftungsvorgänge pro Tag zugeordnet werden, welche auch zu dem angegebenen Lüftungsgewohnheiten passen. Es wurde in dem als Büro genutzten Raum jeweils morgens und abends intensiv über die Fenster gelüftet. Die Luftwechselbestimmungen der Intensivlüftung in den Morgenstunden konnten gut aus den Radonkonzentrationsverläufen und in den Abendstunden gut aus den CO<sub>2</sub>-Konzentrationsverläufen abgeleitet werden. Die Infiltrationslüftung konnte aus den noch verbleibenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nach der Nutzung der Räume über die Konzentrations-Abklingmethode bestimmt werden.

**Abb. 6.1: Konzentrationsverläufe Radon und CO<sub>2</sub> und abgeleitete Werte für den Luftwechsel in Objekt 3 (Wintermessung)**



Bemerkenswert ist der über das zeitliche Mittel betrachtet wenig wirksame Anteil der manuellen Fensterlüftung. Der Mittelwert der minimal wirksamen Infiltrationslüftung liegt in diesem Messintervall von 14 Tagen bei 0,3 /h und der gesamte wirksame Luftwechsel inkl. Fensterlüftung bei nur 0,34 /h (siehe auch Kapitel 6.5).

## 6.2 Berechnung der Radon-Eintrittsraten $Q_{Rn}$

Die Berechnung der Radon-Eintrittsraten  $Q_{Rn}$  erfolgte über die gemessenen Radonkonzentrationen und Luftwechselraten im Zeitverlauf nach Gleichung 4.

Gleichung 4

$$Q_{Rnt2} = \frac{-C_{Rnt1} \cdot (n + \lambda) + C_{Rnt2} \cdot (n + \lambda) \cdot e^{(n + \lambda) \cdot (t2 - t1)}}{e^{(n + \lambda) \cdot (t2 - t1)} - 1}$$

mit

$Q_{Rnt2}$  = Radon-Eintrittsraten zum Zeitpunkt  $t_2$  in  $Bq/m^3h$

$C_{Rnt1}$  = Anfangskonzentration zum Zeitpunkt  $t_1$  in  $Bq/m^3$

$C_{Rnt2}$  = Konzentration zum Zeitpunkt  $t_2$  in  $Bq/m^3$

$n$  = Luftwechselzahl zum Zeitpunkt  $t_2$  in  $/h$

$t_1$  = Anfangszeitpunkt 1 in  $h$

$t_2$  = Zeitpunkt 2 in  $h$

$\lambda$  = Zerfallskonstante von Radon (Rn-222) in  $1/h$  ( $\lambda = 0,0076/h$ )  
(Außenluft ohne Berücksichtigung)

## 6.3 Berechnung der Radonkonzentration (aus Quellstärke und Luftwechsel)

Die Berechnung der gemittelten Radonkonzentrationen  $C_{Rn}$  für ein Zeitintervall erfolgte aus der mittleren Quellstärke  $Q_{Rn}$  und der mittleren Luftwechselrate  $n$  nach Gleichung 5:

Gleichung 5

$$C_{Rn} = \frac{Q_{Rn}}{(n + \lambda)}$$

mit

$C_{Rn}$  = mittlere Radonkonzentration in  $Bq/m^3$

$Q_{Rn}$  = mittlere Radon-Eintrittsraten in  $Bq/m^3h$

$n$  = mittlere Luftwechselzahl in  $/h$

$\lambda$  = Zerfallskonstante von Radon (Rn-222) in  $1/h$  ( $\lambda = 0,0076/h$ )  
(Außenluft ohne Berücksichtigung)

Die Berechnung der Radonkonzentrationen  $C_{Rn}$  im Zeitverlauf (Stundenwerte) erfolgte aus der wirksamen Quellstärke  $Q_{Rn}$  und der wirksamen Luftwechselrate  $n$  nach Gleichung 6:

Gleichung 6

$$C_{Rnt2} = e^{-(n + \lambda) \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \left( C_{Rnt1} - \frac{Q_{Rnt2}}{n + \lambda} \right) + \frac{Q_{Rnt2}}{n + \lambda}$$

mit

$C_{Rnt1}$  = Anfangskonzentration zum Zeitpunkt  $t_1$  in  $Bq/m^3$

$C_{Rnt2}$  = Konzentration zum Zeitpunkt  $t_2$  in  $Bq/m^3$

$Q_{Rnt2}$  = Radon-Eintrittsrate zum Zeitpunkt  $t_2$  in  $Bq/m^3h$

$n$  = Luftwechselzahl zum Zeitpunkt  $t_2$  in /h

$t_1$  = Anfangszeitpunkt 1 in h

$t_2$  = Zeitpunkt 2 in h

$\lambda$  = Zerfallskonstante von Radon (Rn-222) in 1/h ( $\lambda = 0,0076/h$ )

(Außenluft ohne Berücksichtigung)

#### 6.4 Berechnung des Differenzdruckes gem. DIN/TS 18117-2

Die Berechnung des Differenzdruckes erfolgte als Summe der Einflussfaktoren aus Thermik nach Gleichung 7 (Temperaturdifferenz) und dem Windeinfluss (Windstärke) gem. DIN/TS 18117-2 nach Gleichung 8.

a) Thermik (Temperaturdifferenz)

Gleichung 7

$$\Delta p = \Delta T \times h \times 0,04 \text{ Pa}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

mit

$\Delta p$  = Druckdifferenz in Pa

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz zwischen außen und innen in K

$h$  = Höhe bis zur „druckneutralen Zone“ in m

b) Windeinfluss (Windstärke)

Gleichung 8

$$\Delta p = \rho/2 \times v^2 \times C_p$$

mit

$\Delta p$  = Druckdifferenz in Pa

$\rho$  = Dichte der Luft in  $kg/m^3$  (ca.  $1,2 \text{ kg/m}^3$ )

$v$  = Windgeschwindigkeit in m/s

$C_p$  = mittlerer Winddruckbeiwert (ohne Einheit)

## 6.5 Definition von Standardnutzungsbedingungen (Raumnutzung, Heizung und Lüftung)

Für die Raumnutzung, Heizung und Lüftung wurden unter Berücksichtigung der tatsächlich untersuchten Objekte und üblichen nutzungstypischen Verhältnisse Bedingungen aufgestellt und in den Tabellen 6.1 bis 6.3 aufgeführt. Hierbei wurde zwischen den Nutzungsarten Arbeiten (inkl. Home-Office) und Wohnen unterschieden.

**Tabelle 6.1: Nutzungsdauer von Räumen unter Standardnutzungsbedingungen**

Nutzungsart	Arbeiten (Büro)	Wohnen (Schlaf)	Wohnen (Wohnen)	Wohnen (Sonstiges)
Nutzungsdauer * (h pro Tag)	5,5	8	8,5	2
in %	23	33	35	8

\* Durchschnittswerte bei Dauernutzung

**Tabelle 6.2: Heizverhalten von Räumen unter Standardnutzungsbedingungen**

Nutzungsart	Arbeiten (Büro)	Wohnen (Schlaf)	Wohnen (Wohnen)	Wohnen (Sonstiges)
Heizbetrieb * (Tage/Jahr)	212	106	212	106
in %	58	29	58	29

\* ca. Mitte Oktober bis Mitte Mai

**Tabelle 6.3: Luftwechsel von Räumen unter Standardnutzungsbedingungen**

Lüftungsart	Arbeiten (Büro)	Wohnen (Schlaf)	Wohnen (Wohnen)	Wohnen (Sonstiges)
Infiltration * (Luftwechsel pro h)	0,2	0,2	0,2	0,2
Fensterlüftung * (Luftwechsel pro h)	0,1	0,1	0,1	0,1

In der Tabelle 6.4 wurden die zu erwartenden Radonkonzentrationen bei gegebenen Luftwechselzahlen bei konstanter Radon-Quellstärke (hier 100 Bq/m<sup>3</sup>h) unter Standardnutzungsbedingungen für unterschiedliche Lüftungsarten aufgeführt. Der wesentliche Unterschied besteht in dem in Lüftungsart B deutlich höheren Infiltrationsluftwechsel von 0,5/h gegenüber 0,2/h bei Lüftungsart A. Hier zeigt sich der stärkere Reduzierungseffekt bei zusätzlicher manueller Fensterlüftung bei dichteren Gebäuden sehr deutlich. Bei Lüftungsart A kann die Radonkonzentration bei gleichbleibender Quellstärke von 482 Bq/m<sup>3</sup> auf 339 Bq/m<sup>3</sup> gesenkt werden, was eine Reduzierung auf 30% vom Ausgangswert entspricht. Bei Lüftungsart B kann die Radonkonzentration bei gleichbleibender Quellstärke von 197 Bq/m<sup>3</sup> nur auf 178 Bq/m<sup>3</sup> gesenkt werden, was eine Reduzierung auf 10% vom Ausgangswert entspricht.

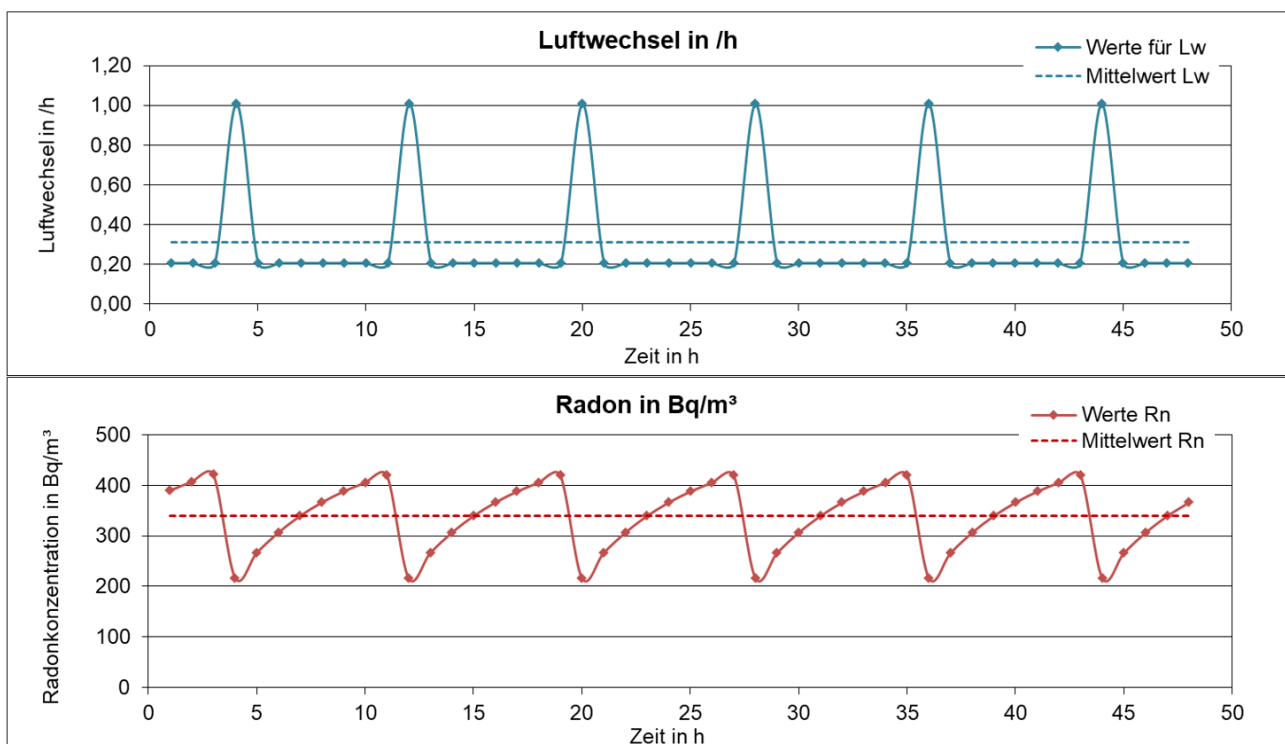
**Tabelle 6.4: Radonkonzentration und Luftwechsel bei konstanter Radon-Quellstärke unter Standardnutzungsbedingungen**

	Luftwechsel pro h	Radon-Quellstärke in Bq/m <sup>3</sup> h	Radonkonzentration in Bq/m <sup>3</sup>
<b>Lüftungsart A *</b>			
nur Infiltration	0,20	100	482
mit Fensterlüftung	0,30	100	339 (-30 %)
<b>Lüftungsart B *</b>			
nur Infiltration	0,50	100	197
mit Fensterlüftung	0,56	100	178 (-10 %)

\* Mittelwerte über 24 h, bei Fensterlüftung 3 x pro Tag kompletter Luftwechsel

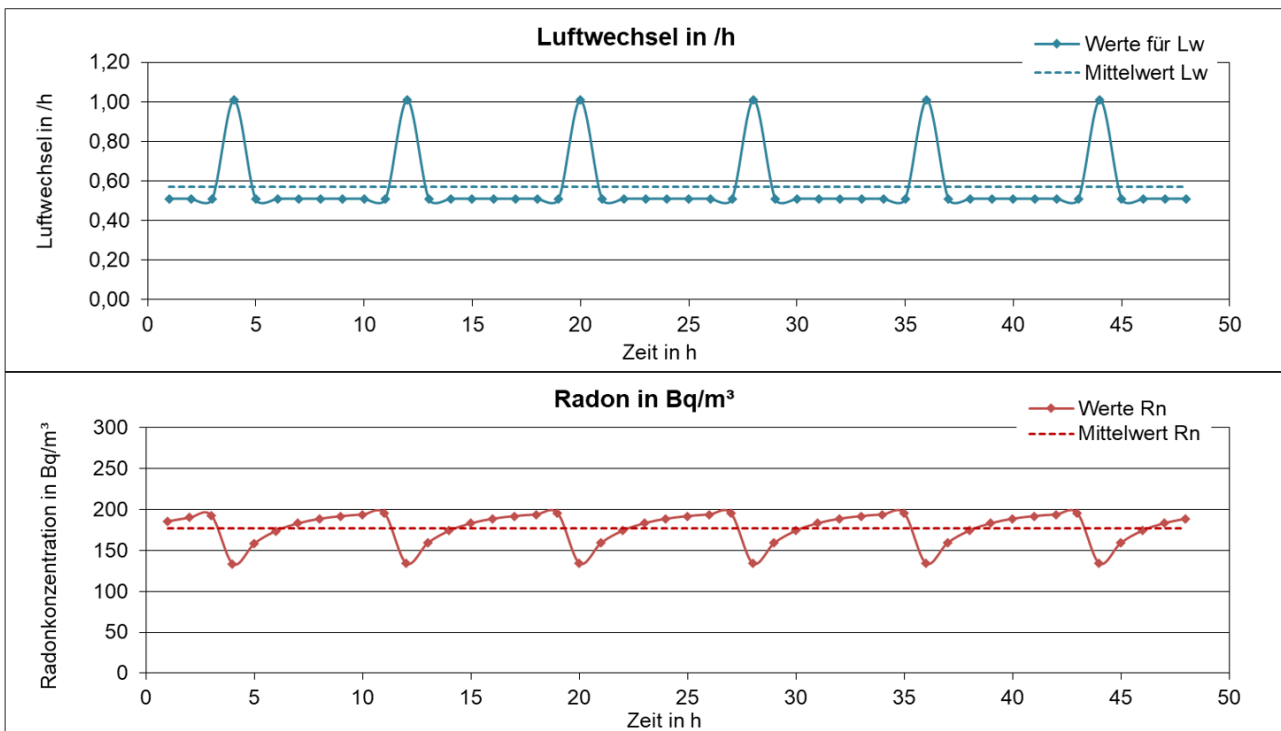
Hierbei wird deutlich, dass in bereits recht undichten Bestandsgebäuden der Radonwert in der Raumluft über zusätzlich manuelle Fensterlüftung nicht effektiv gesenkt werden kann, da das hierbei zusätzlich ausgetauschte Raumvolumen prozentual immer kleiner wird (gegenüber dem durch Leckagen in der Gebäudehülle ausgetauschte Raumvolumen). Das nachfolgende Beispiel in Abbildung 6.2 verdeutlicht die Auswirkungen der Lüftungsart A auf die Radonkonzentrationen im zeitlichen Verlauf mit einem konstanten relativ niedrigen Infiltrationsluftwechsel von 0,2/h und 3 manuellen Lüftungsvorgängen pro Tag mit 1/h. Nach jedem Lüftungsvorgang wird eine schnelle Reduzierung der Radonkonzentration vom Maximalwert auf den Minimalwert erreicht. In den Zwischenzeiten ist ein kontinuierlicher Anstieg der Raumluftkonzentration bis zum Maximalwert zu beobachten. Durch die manuelle Fensterlüftung kann in diesem Fall eine Reduzierung der mittleren Radonkonzentration im Raum von ca. 30 % erreicht werden.

**Abb. 6.2: Verlauf von Luftwechsel und Radonkonzentration für konstante Quellstärke und 3 Lüftungsvorgänge pro Tag - niedriger Infiltrationsluftwechsel (0,2/h) Lüftungsart A**



Das nachfolgende Beispiel verdeutlicht in Abbildung 6.3 die Auswirkungen der Lüftungsart B auf die Radonkonzentrationen im zeitlichen Verlauf mit einem konstanten hohen Infiltrationsluftwechsel von 0,5/h und 3 manuellen Lüftungsvorgängen pro Tag mit einem vereinfacht angenommen Luftwechsel von 1/h. Nach jedem Lüftungsvorgang wird eine deutlich schwächere Reduzierung der Radonkonzentration vom Maximalwert auf den Minimalwert erreicht. Durch die manuelle Fensterlüftung kann in diesem Fall nur eine Reduzierung der mittleren Radonkonzentration im Raum von ca. 10 % erreicht werden.

**Abb. 6.3: Verlauf von Luftwechsel und Radonkonzentration für konstante Quellstärke und 3 Lüftungsvorgänge pro Tag - hoher Infiltrationsluftwechsel (0,5/h) Lüftungsart B**



## 6.6 Messergebnisse der saisonalen Messungen

Für die Auswertung der Zeitreihen, der Bestimmung von Radoneintrittsrates und des Luftwechsels wurden für die ausgewählten Gebäude Zeitabschnitte zur Intensivauswertung ausgewählt, welche die typischen Wetterlagen als Stichproben abdecken. Es wurden jeweils Zeitintervalle über 2 bis maximal 4 Wochen in den Jahreszeiten Frühjahr, Sommer, Herbst und Winter ausgewählt und in der Tabelle 6.5 in der Übersicht dargestellt.

**Tabelle 6.5: Saisonale Messintervalle für die Intensivauswertungen mit typischen Wetterlagen**

			<b>Objekt 1</b>	<b>Objekt 2</b>	<b>Objekt 3</b>	<b>Objekt 4</b>
			<b>Bolsterlang</b>	<b>Wittingen</b>	<b>Deckersberg</b>	<b>Essen</b>
Zeitintervall	1	Herbst	04.11.22 - 05.12.22	05.11.22 - 25.11.22	10.10.22 - 23.10.22	26.09.22 - 10.10.22
Zeitintervall	2	Winter	15.02.23 - 07.03.23	20.01.23 - 03.02.23	20.01.23 - 02.02.23	09.12.23 - 23.12.23
Zeitintervall	3	Frühling	29.04.23 - 15.05.23	25.04.22 - 11.05.22	20.04.23 - 03.05.23	21.04.23 - 07.05.23
Zeitintervall	4	Sommer	08.07.22 - 10.08.22	18.08.22 - 06.09.22	09.07.22 - 22.07.22	09.06.23 - 23.06.23

Die Ergebnisse der Radonmessungen aus den ausgewählten Zeitreihen der saisonalen Messungen sind in Tabelle 6.6 zusammengefasst und den Ergebnissen der Gesamtauswertungen (Mittelwerte integrierende und zeitauflösende Messungen) sowie den bei der Erstuntersuchung ermittelten  $Rn_{50}$ -Werten gegenübergestellt.

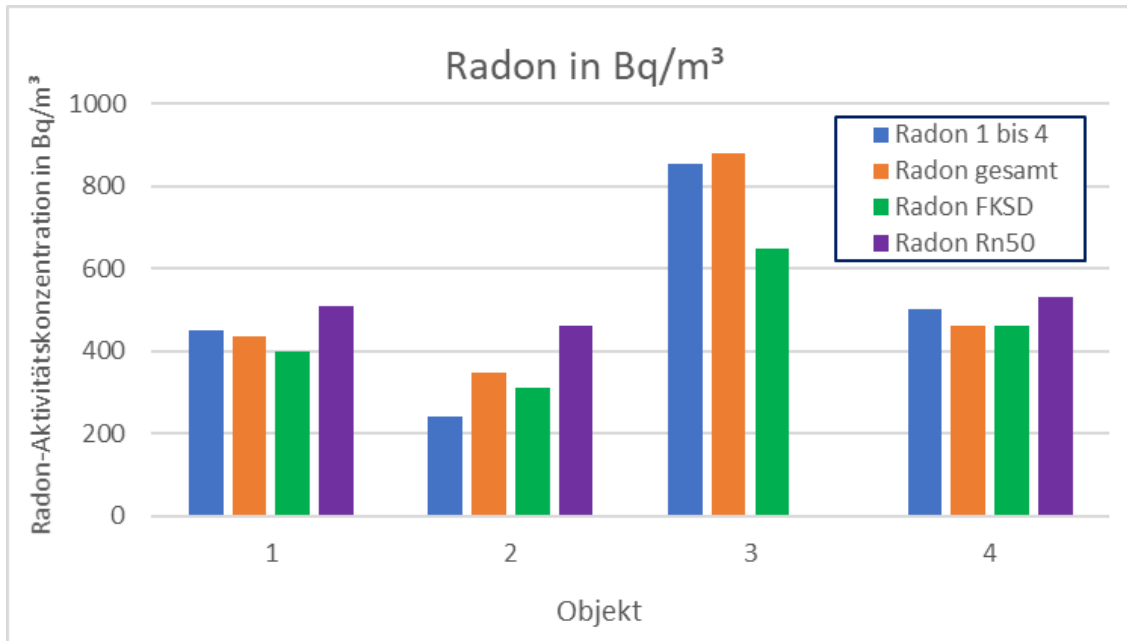
**Tabelle 6.6: Ergebnisse der Radonmessungen (saisonale Messintervalle, Gesamtzeit, Erstmessung  $Rn_{50}$ )**

			<b>Objekt 1</b>	<b>Objekt 2</b>	<b>Objekt 3</b>	<b>Objekt 4</b>
			<b>Bolsterlang</b>	<b>Wittingen</b>	<b>Deckersberg</b>	<b>Essen</b>
Radon gesamt (Bq/m <sup>3</sup> )			435	346	881	462
Radon FKSD (Bq/m <sup>3</sup> )			400	310	650	460
Radon $Rn_{50}$ (Bq/m <sup>3</sup> )			510	460		530
Radon (Bq/m <sup>3</sup> )	1	Herbst	510	305	868	297
Radon (Bq/m <sup>3</sup> )	2	Winter	525	339	1424	810
Radon (Bq/m <sup>3</sup> )	3	Frühling	503	148	1024	558
Radon (Bq/m <sup>3</sup> )	4	Sommer	268	179	96	339
<b>Radon (Bq/m<sup>3</sup>)</b>		<b>1 bis 4</b>	<b>452</b>	<b>243</b>	<b>853</b>	<b>501</b>

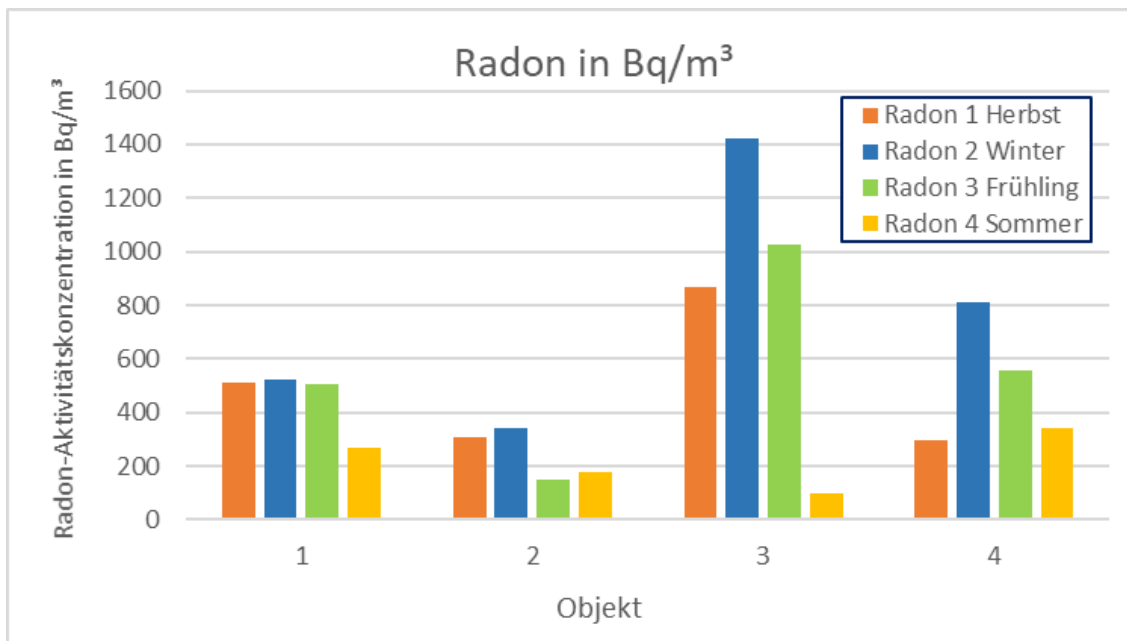
Bei den Radonmessungen zeigen sich für die Mittelwerte der saisonalen Messungen (1 bis 4) gute Übereinstimmungen mit den Gesamtauswertungen im Jahresmittel aus den integrierenden und zeitauflösenden Messungen und auch für den bei der Erstmessung vor Ort ermittelten  $Rn_{50}$ -Wert in Unterdruck (siehe Abbildung 6.4). Die Ergebnisse der  $Rn_{50}$ -Messungen zeigen tendenziell leicht höhere Werte.

Für die saisonalen Messungen zeigen sich für Radon in den Objekträumen tendenziell im Winter die höchsten und Sommer die niedrigsten Aktivitätskonzentrationen (siehe Abbildung 6.5). Bei Objekt 1 liegen die Werte für Herbst, Winter und Frühling sehr nahe zusammen. Im Objekt 2 liegt der Wert für den Frühling leicht unter dem Wert für den Sommer. In Objekt 3 zeigt sich das klassische Bild mit ähnlichen Werten für Herbst und Frühling zwischen den Werten für Sommer und Winter. In Objekt 4 liegt der Wert für den Herbst minimal unter dem Sommerwert.

**Abb. 6.4:** Vergleich der Radonkonzentrationen (saisonale Messungen, Gesamtauswertung, integrierende Messung und Rn<sub>50</sub>-Wert) je Objekt



**Abb. 6.5:** Vergleich der Radonkonzentrationen (nur saisonale Messungen) je Objekt



Aus den Zeitreihen der saisonalen Messungen wurden die Werte für die Luftwechselraten, die Radon-Quellstärken und die Temperaturdifferenzen berechnet und in der Übersicht in Tabelle 6.7 mit den gemessenen Daten für die Druckdifferenzen dargestellt.

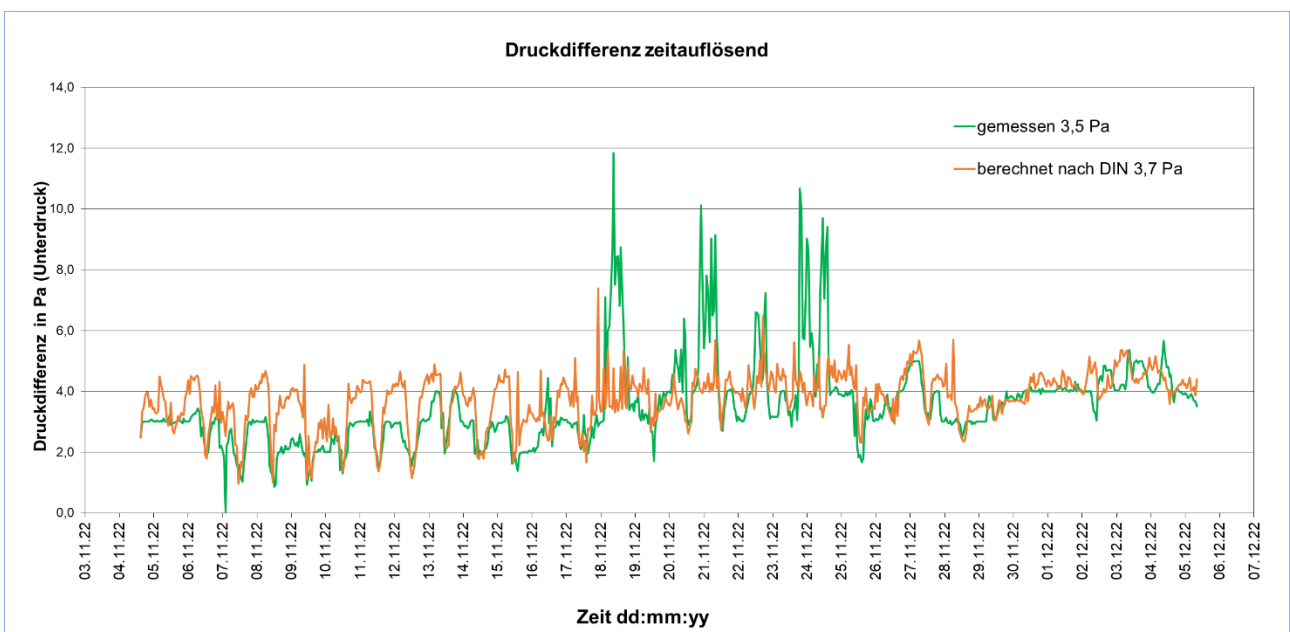
**Tabelle 6.7: Vergleich Luftwechsel, Radon-Quellstärke, Temperaturdifferenz und Druckdifferenz (saisonale Messungen, Gesamtauswertung)**

			Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3	Objekt 4
			Bolsterlang	Wittingen	Deckersberg	Essen
Luftwechsel (1/h)	1	Herbst	0,19	0,10	0,37	0,04
Luftwechsel (1/h)	2	Winter	0,19	0,16	0,34	0,07
Luftwechsel (1/h)	3	Frühling	0,19	0,09	0,34	0,07
Luftwechsel (1/h)	4	Sommer	0,19	0,09	0,38	0,05
Luftwechsel (1/h)		1 bis 4	0,19	0,12	0,35	0,06
Luftwechsel (1/h)		gesamt	0,19	0,09	0,36	0,06
Rn-Quellstärke (Bq/m <sup>3</sup> h)	1	Herbst	98,0	30,4	321	12,3
Rn-Quellstärke (Bq/m <sup>3</sup> h)	2	Winter	98,5	54,1	481	54,6
Rn-Quellstärke (Bq/m <sup>3</sup> h)	3	Frühling	96,6	13,2	348	39,2
Rn-Quellstärke (Bq/m <sup>3</sup> h)	4	Sommer	51,7	17,0	36	16,6
Rn-Quellstärke (Bq/m <sup>3</sup> h)		1 bis 4	86,2	28,7	296	30,7
Rn-Quellstärke (Bq/m <sup>3</sup> h)		gesamt	82,4	31,6	314	27,0
Temperaturdifferenz (K)	1	Herbst	15,3	12,7	7,5	7,6
Temperaturdifferenz (K)	2	Winter	15,4	14,8	18,6	16,0
Temperaturdifferenz (K)	3	Frühling	7,6	7,7	8,9	6,1
Temperaturdifferenz (K)	4	Sommer	4,3	4,3	0,7	-2,1
Temperaturdifferenz (K)		1 bis 4	10,7	9,9	8,9	6,9
Temperaturdifferenz (K)		gesamt	10,4	7,9	8,9	7,2
Druckdifferenz (-Pa)	1	Herbst	3,5	--	--	--
Druckdifferenz (-Pa)	2	Winter	3,3	4,8	--	2,9
Druckdifferenz (-Pa)	3	Frühling	1,6	--	--	2,5
Druckdifferenz (-Pa)	4	Sommer	--	--	--	2,0
Druckdifferenz (-Pa)		1 bis 4	2,8	4,8	--	2,5
Druckdifferenz (-Pa)		gesamt	2,9	3,1	--	2,4

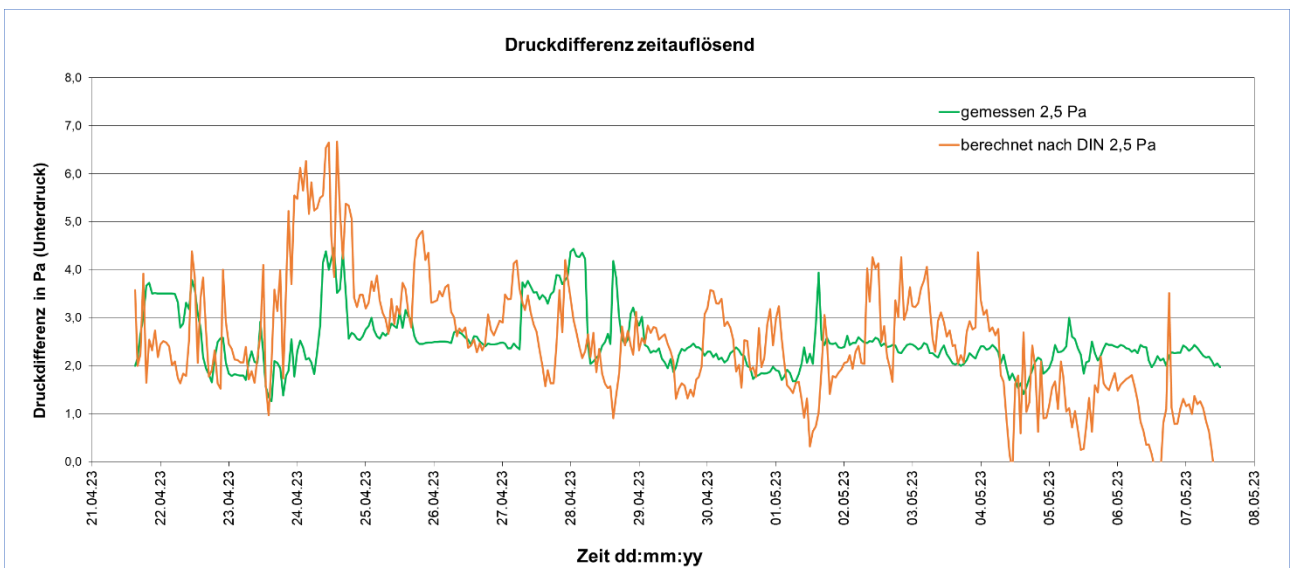
Für die gemessenen Druckdifferenzen konnten nicht für alle Objekte und alle saisonalen Messungen Daten erhoben werden. Aus diesem Grund wurden die zu erwartenden Druckdifferenzen aus den Messgrößen für die Temperaturdifferenzen und den Windstärken (Stundenwerte) gem. Gleichungen nach DIN/TS 18117-2 (Entwurf 03/2024) ermittelt und den verfügbaren Daten aus den gemessenen Druckdifferenzen gegenübergestellt.

Die nachfolgenden Abbildungen 6.6 und 6.7 verdeutlichen die guten Übereinstimmungen den gemessenen und den nach DIN/TS 18117 berechneten Werten für den Differenzdruck im zeitlichen Mittel. Kurzzeitige Abweichungen resultieren aufgrund der zusätzlichen temporär wirksamen Einflussfaktoren, die bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden wie z.B. Nutzerverhalten (Art und Intensität der Lüftung, Raumnutzung).

**Abb. 6.6: Objekt 1 - Herbstmessung (Vergleich Messung und Berechnung nach DIN/TS 18117-2)**



**Abb. 6.7: Objekt 4 - Frühlingsmessung (Vergleich Messung und Berechnung nach DIN/TS 18117-2)**



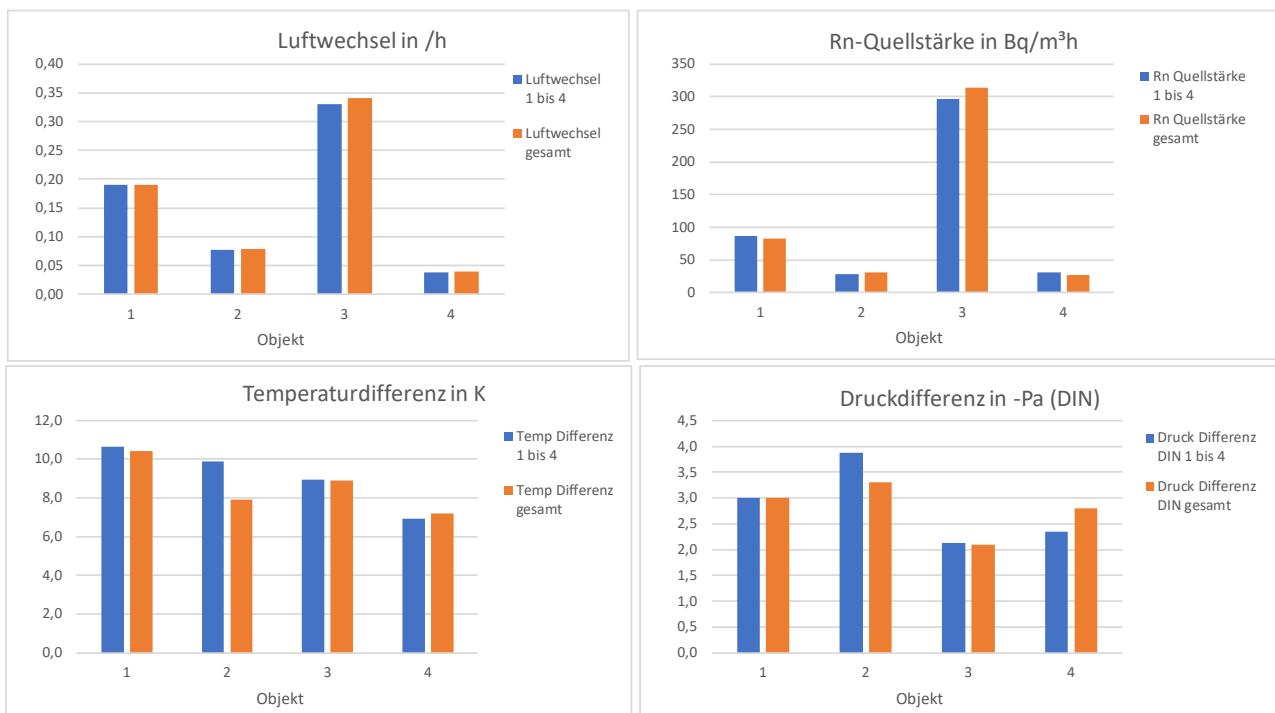
Aufgrund der guten Übereinstimmungen wurden für die weiteren Auswertungen die nach DIN/TS 18117-2 berechneten Werte für die Druckdifferenzen herangezogen. In der Tabelle 6.8 sind die berechneten Werte für die Druckdifferenzen in der Übersicht zusammengefasst.

**Tabelle 6.8: Berechnung der Druckdifferenzen nach DIN/TS 18117-2 (saisonale Messungen, Gesamtauswertung)**

			Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3	Objekt 4
			Bolsterlang	Wittingen	Deckersberg	Essen
Druckdifferenz DIN (-Pa)	1	Herbst	3,7	4,5	1,6	2,2
Druckdifferenz DIN (-Pa)	2	Winter	4,1	6,2	4,0	4,0
Druckdifferenz DIN (-Pa)	3	Frühling	2,4	2,5	2,2	2,5
Druckdifferenz DIN (-Pa)	4	Sommer	1,8	2,3	0,7	0,7
Druckdifferenz DIN (-Pa)		1 bis 4	3,0	3,9	2,1	2,4
Druckdifferenz DIN (-Pa)		gesamt	3,0	3,3	2,1	2,8

Die berechneten Werte für die saisonalen Messungen als Stichproben für die Luftwechselraten, die Radon-Quellstärken, die Temperaturdifferenzen und die Druckdifferenzen (nach DIN) sind über die Darstellungen in Abbildung 6.8 als Mittelwerte der (Jahreszeiten 1 bis 4) den Gesamtauswertungen (gesamt) gegenübergestellt. Es zeigen sich gute Übereinstimmungen für alle Parameter für alle Objekte. Leichte Abweichungen liegen für die Temperatur- und Druckdifferenzen für Objekt 2 vor. Hier liegen die Mittelwerte über das gesamte Jahr etwas niedriger als bei dem Mittelwert aus den saisonalen Messungen.

**Abb. 6.8: Vergleich saisonale Messungen und Gesamtauswertung (12 Monate)**



### 6.7 Analysen von Abhängigkeiten

Bei den Analysen von Abhängigkeiten wurden zunächst die Temperaturen bzw. die Temperaturdifferenzen und die Differenzdruckwerte als Einflussgrößen auf die Radon-Eintrittsraten genauer untersucht. Bei der Auftragung der Werte für die Radon-Eintrittsraten (Rn-Quellstärke) und Temperaturdifferenzen aus den saisonalen Messungen je Objekt zeigen sich näherungsweise lineare Abhängigkeiten mit höheren Werten für die Eintrittsraten bei höheren Werten für die Temperaturdifferenzen (siehe Abbildung 6.9). Erwartungsgemäß zeigen sich sehr ähnliche Abhängigkeiten bei der Gegenüberstellung der Werte für die Radon-Eintrittsraten und Druckdifferenzen durch den hier integrierten kombinierten Einfluss der Temperatur und der Windstärke (siehe Abbildung 6.10).

Abb. 6.9: Auswertung Temperaturdifferenz und Rn-Eintrittsrates

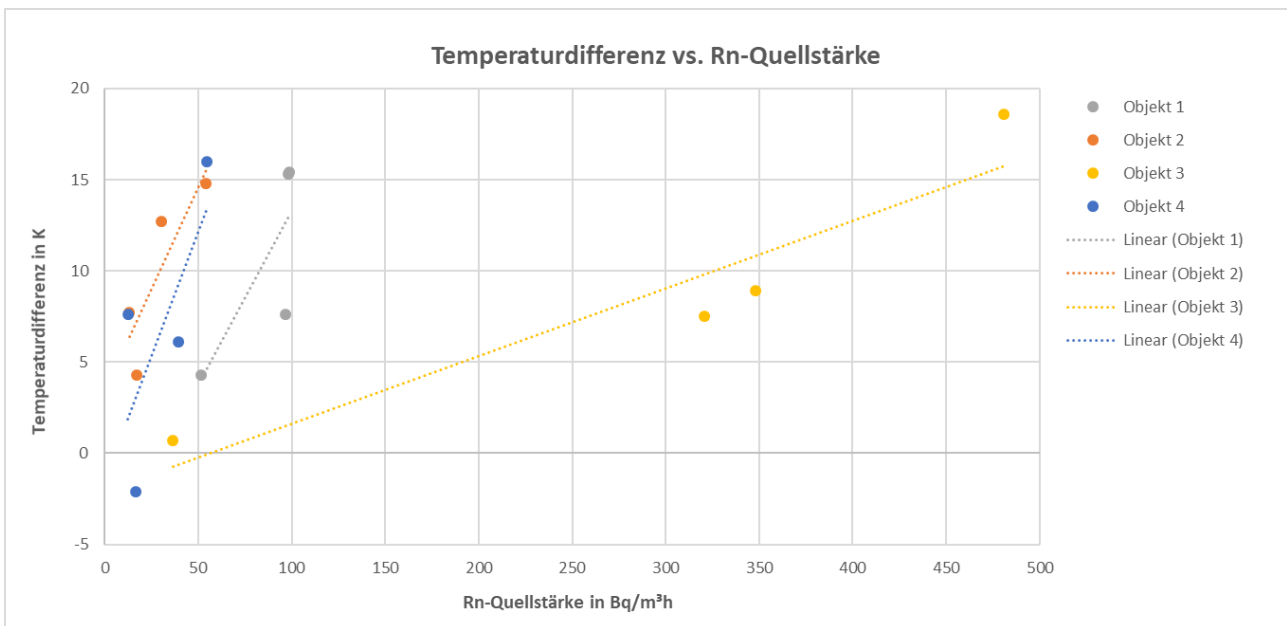
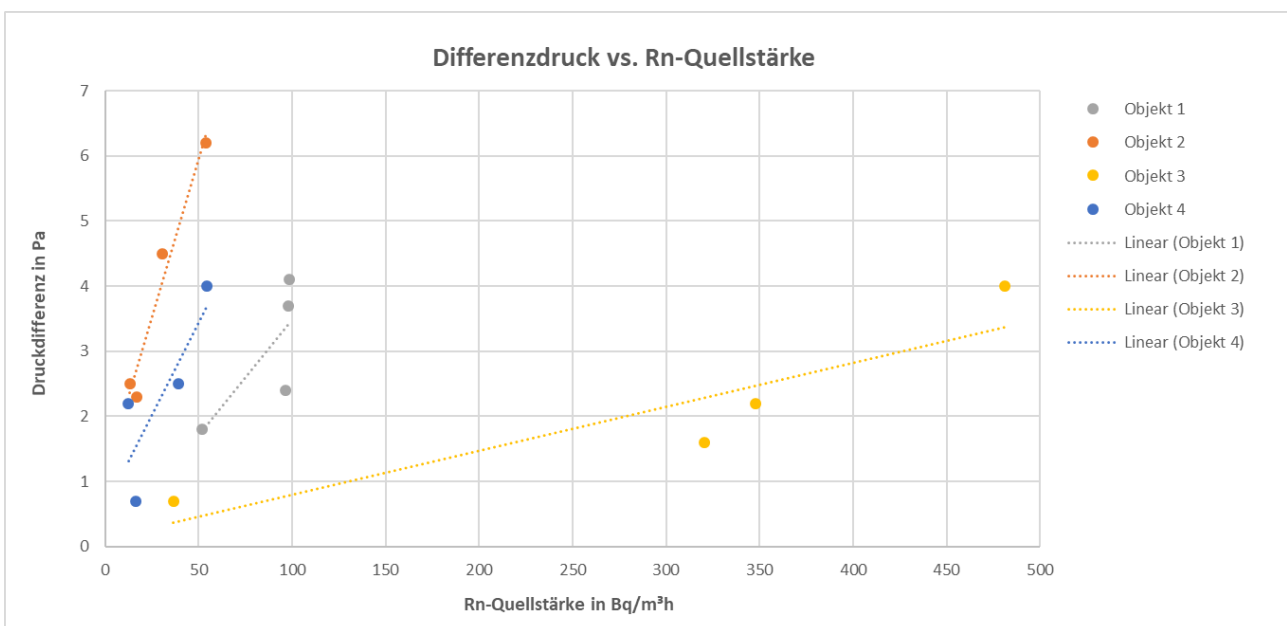


Abb. 6.10: Auswertung Differenzdruck und Rn-Eintrittsrates



Zur besseren Vergleichbarkeit der Abhängigkeiten aufgrund der unterschiedlichen Radon-Eintrittsrates wurden für im Sinne einer Normierung Faktoren die Quellstärken berechnet, welche die Abweichungen zu den jeweiligen Mittelwerten je Objekt darstellen. Ein Faktor von 1 entspricht dann exakt dem Mittelwert. Ein Faktor von 0,63 beschreibt eine niedrigere Eintrittsrates (z.B. im Sommer bei Objekt 1) mit nur 63 % vom Jahresmittel. Für die Temperaturdifferenzen und Druckdifferenzen wurden Mittelwerte je Objekt gebildet und die Differenzen zu den Mittelwerten je saisonales Messintervall berechnet. Die Faktoren und Differenzwerte sind in Tabelle 6.9 zusammengefasst.

**Tabelle 6.9: Auswertung Differenzenanalyse - Ableitung von Faktoren für die Rn-Quellstärke**

			<b>Objekt 1</b>	<b>Objekt 2</b>	<b>Objekt 3</b>	<b>Objekt 4</b>
			<b>Bolsterlang</b>	<b>Wittingen</b>	<b>Deckersberg</b>	<b>Essen</b>
<b>Faktor zu Mittelwert</b>			Faktor	Faktor	Faktor	Faktor
Faktor Rn-Quellstärke	1	Herbst	1,19	0,96	1,02	0,46
Faktor Rn-Quellstärke	2	Winter	1,20	1,71	1,53	2,02
Faktor Rn-Quellstärke	3	Frühling	1,17	0,42	1,11	1,45
Faktor Rn-Quellstärke	4	Sommer	0,63	0,54	0,12	0,61
<b>Differenz zu Mittelwert</b>			Differenz	Differenz	Differenz	Differenz
Temperaturdifferenz (K)	1	Herbst	4,90	4,80	-1,40	0,40
Temperaturdifferenz (K)	2	Winter	5,00	6,90	9,70	8,80
Temperaturdifferenz (K)	3	Frühling	-2,80	-0,20	0,00	-1,10
Temperaturdifferenz (K)	4	Sommer	-6,10	-3,60	-8,20	-9,30
Druckdifferenz DIN (Pa)	1	Herbst	0,70	1,20	-0,50	-0,60
Druckdifferenz DIN (Pa)	2	Winter	1,10	2,90	1,90	1,20
Druckdifferenz DIN (Pa)	3	Frühling	-0,60	-0,80	0,10	-0,30
Druckdifferenz DIN (Pa)	4	Sommer	-1,20	-1,00	-1,40	-2,10

Für die weiteren Auswertungen wurden die Werte der Druckdifferenzen mit den Faktoren der Rn-Quellstärken für alle Objekte betrachtet und in einem x/y-Diagramm inklusive der linearen Regressionen in Abbildung 6.11 dargestellt. Es zeigen sich nach dieser Art der Normierung sehr ähnliche lineare Abhängigkeiten für die unterschiedlichen Objekte.

Werden die Ergebnisse der saisonalen Messungen aller Objekte zusammengefasst, ergibt sich bei der linearen Regression eine Gerade mit der Steigung 0,3263 und einem Nulldurchgang bei 0,9908 bei einem Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) von 0,701 (siehe Abbildung 6.12):

$$y = 0,3263 x + 0,9908$$

mit  $y$  = Faktor Rn-Quellstärke

$x$  = Differenz zur mittleren Druckdifferenz in Pa, mit  $x > 0$  für höhere Druckdifferenz (Unterdruck) gegenüber Mittelwert

Abb. 6.11: Ableitung eines Faktors für die Rn-Quellstärke (Objekte differenziert)

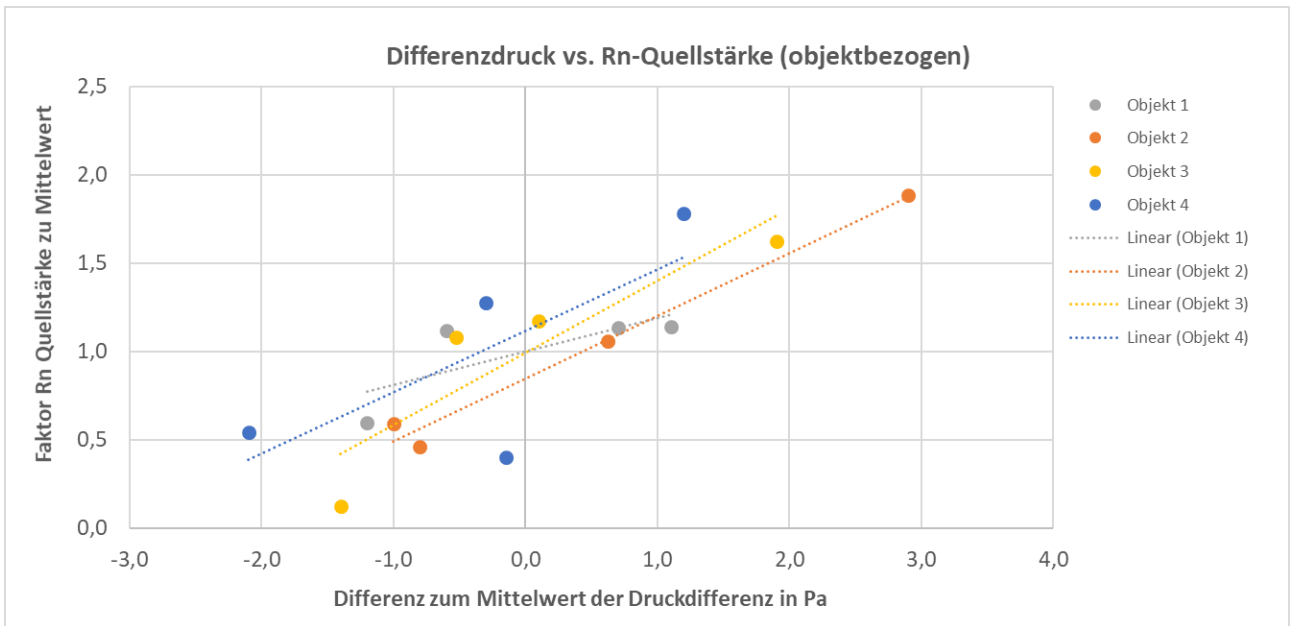
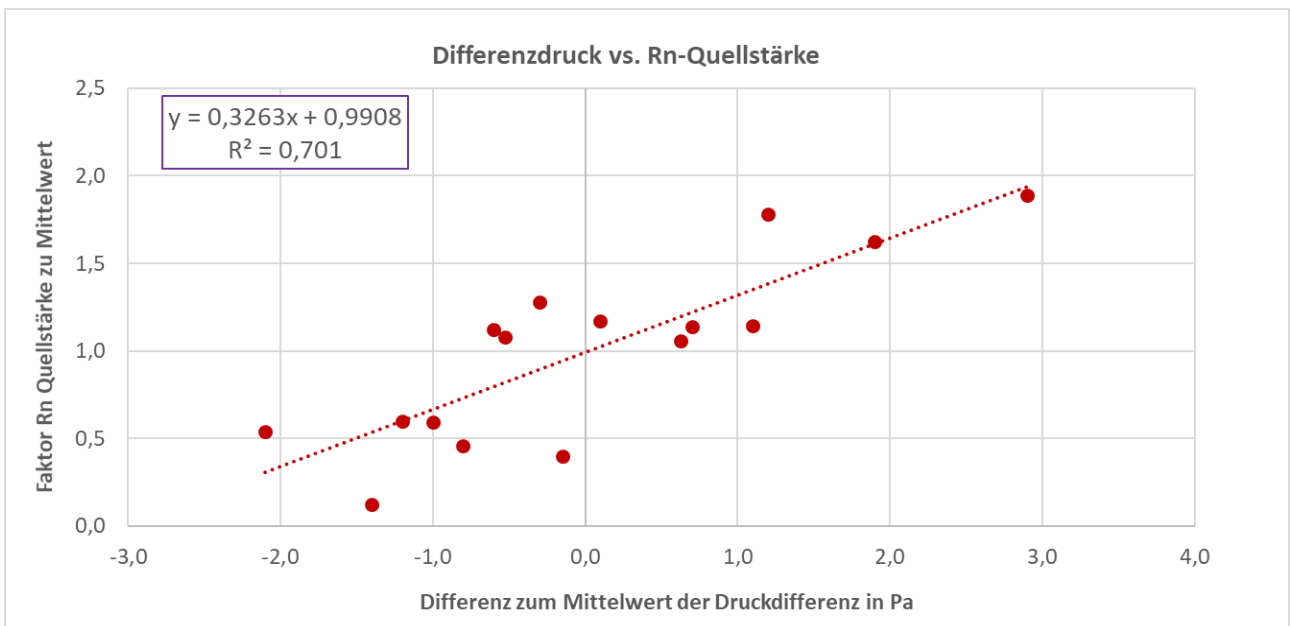


Abb. 6.12: Ableitung eines Faktors für die Rn-Quellstärke (Objekte zusammengefasst)

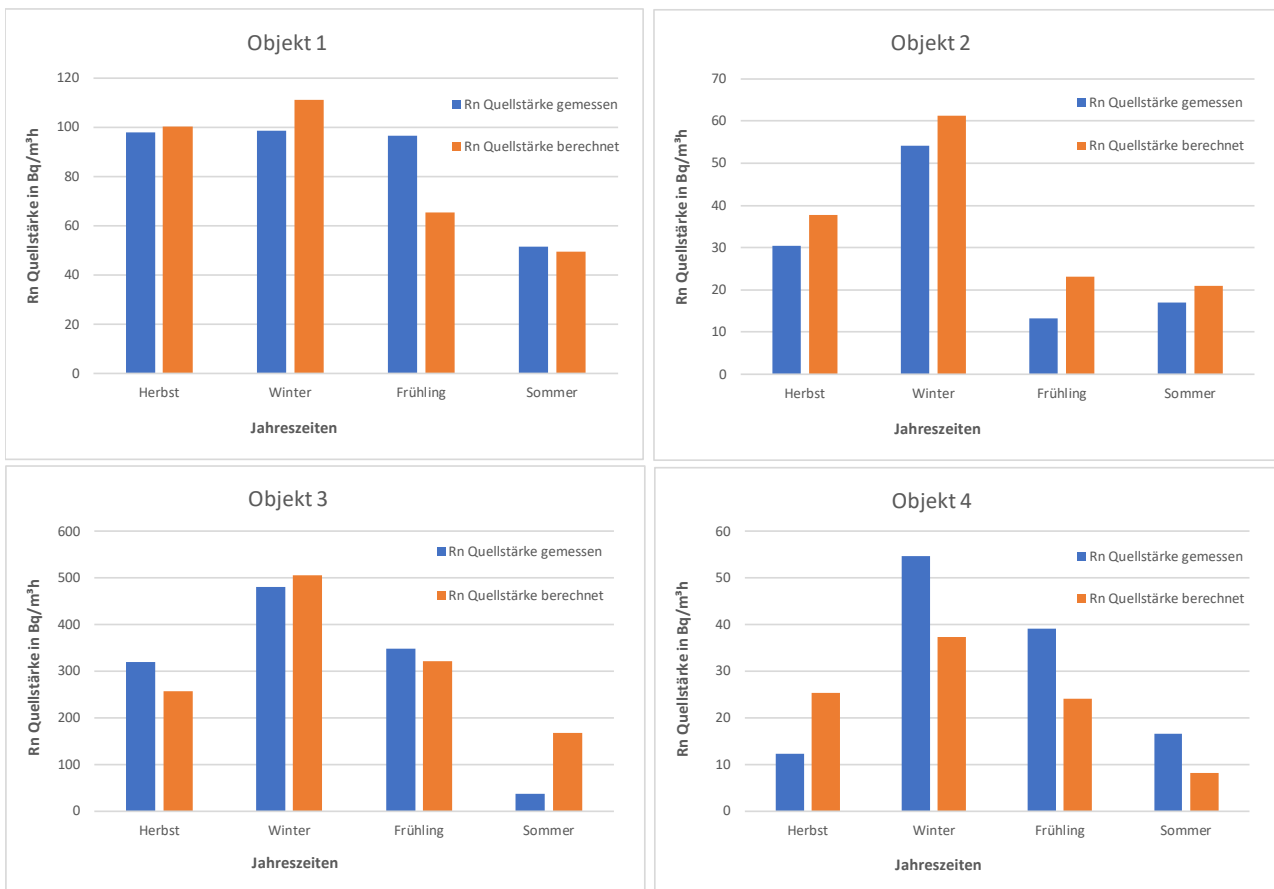


Bei der weiteren Auswertung wurden nach dieser Formel für die lineare Abhängigkeit von Druckdifferenz und Rn-Quellstärke die vereinheitlichten Faktoren für die Rn-Quellstärken für alle Objekte und saisonale Zeitintervalle berechnet (siehe Tabelle 6.10) und die berechneten Rn-Quellstärken den gemessenen Daten gegenübergestellt (siehe Abbildung 6.13).

**Tabelle 6.10: Nach Regressionsformal berechnete Faktoren für die Rn-Quellstärken (saisonale Messungen)**

			Objekt 1	Objekt 2	Objekt 3	Objekt 4
			Bolsterlang	Wittingen	Deckersberg	Essen
Faktor Rn-Quellstärke	1	Herbst	1,22	1,19	0,82	0,94
Faktor Rn-Quellstärke	2	Winter	1,35	1,94	1,61	1,38
Faktor Rn-Quellstärke	3	Frühling	0,80	0,73	1,02	0,89
Faktor Rn-Quellstärke	4	Sommer	0,60	0,66	0,53	0,31

**Abb. 6.13: Berechnung der Rn-Quellstärke mit Faktor Quellstärke (alle Objekte)**



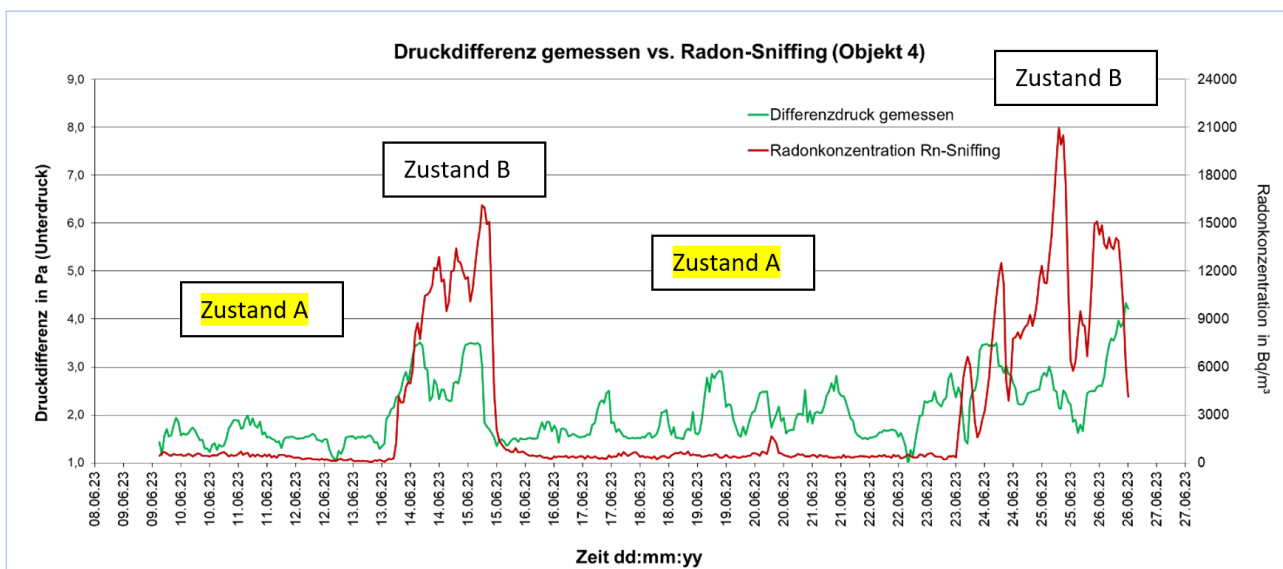
Die über alle Objekte gemittelte Korrekturformel für die Rn-Quellstärke zeigt für zirka die Hälfte der saisonalen Messungen in den Jahreszeiten gute Übereinstimmungen zwischen den gemessenen und berechneten Werten. Die mittlere Abweichung liegt bei 34 %. Von den 16 saisonalen Messungen liegen in 8 Fällen die Abweichungen unter 20 %. In 4 Fällen die Abweichungen zwischen 20 % und 50 % und in 4 Fällen zwischen 50 bis maximal 101 %. Für die Objekte liegen die schlechtesten Übereinstimmungen mit 65 % in Objekt 4 vor. Für die Jahreszeiten zeigen für die saisonalen Messungen die schlechtesten Übereinstimmungen im Sommer mit 51 %.

### Untersuchung des Nutzerverhaltens auf die Radon-Eintrittsrate

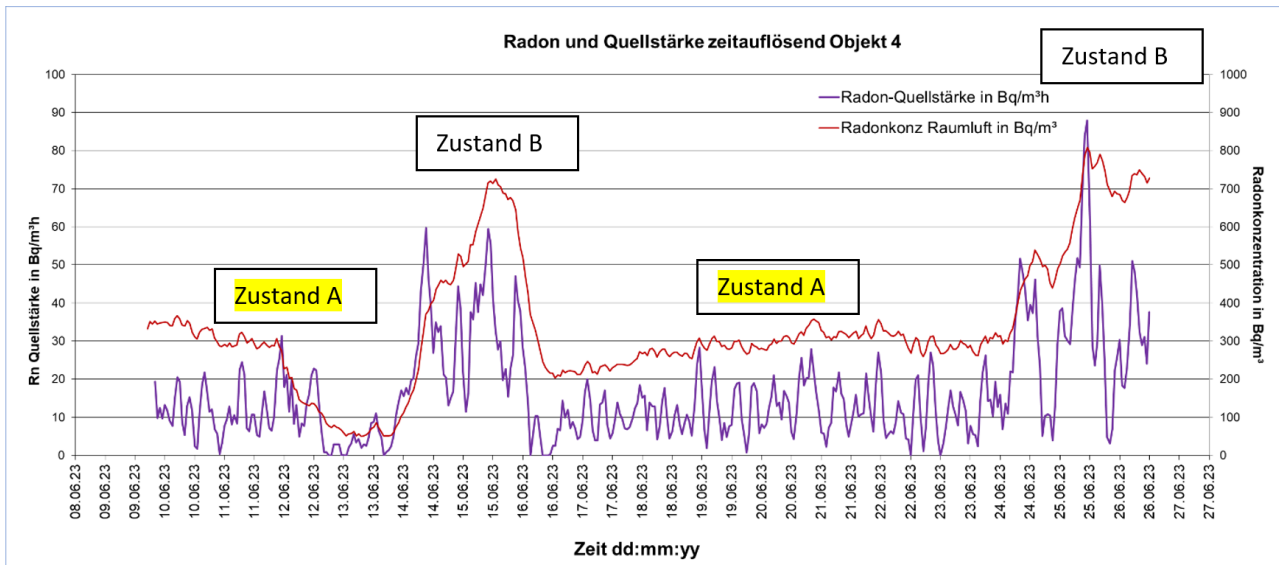
Zur Untersuchung des Nutzerverhaltens auf die Radon-Eintrittsrate und somit auch auf den Jahresmittelwert der Radonkonzentration wurden in Objekt 4 während der saisonalen Messungen zu den Jahreszeiten auch Messungen der Radonkonzentrationen (zeitauflösendes Radon-Sniffing) direkt an einer bei der Erstuntersuchung festgestellten Eintrittsstelle durchgeführt. Es zeigen sich deutliche Auswirkungen unterschiedlicher nutzerabhängiger Zustände der Lüftungs- und Nutzungsarten auf den Radon-Eintritt, die Quellstärke und die Radonkonzentration im Raum. Besonders deutlich wird der Zusammenhang in den Darstellungen in Abbildung 16. Während der Zustandes A ist ein Abluftventilator in einem Keller-Nebenraum (Bad) als unterdruckerzeugendes Element ausgeschaltet und die Kellerfenster in Kellerflur sind auf Kippstellung geöffnet. Während der Zustandes B ist der Kellerlüfter in einem Keller-Nebenraum (Bad) eingeschaltet und die Kellerfenster im Kellerflur geschlossen. Durch die Änderung von Zustand A auf Zustand B erhöht sich die gemessene Druckdifferenz um 1 bis 2 Pascal Unterdruck und an der Sniffingstelle erhöht sich die Radonkonzentration sprunghaft auf 15.000 bis 21.000 Bq/m<sup>3</sup> (Abbildung 6.14), was auch eine Erhöhung der Radon-Eintrittsrate und der Radonkonzentration im Raum zur Folge hat (Abbildung 6.15).

Durch diese Messung wird der äußerst empfindliche Mechanismus des konvektiven Radoneintritts in Abhängigkeit der Druckverhältnisse deutlich. Zudem wird ebenso deutlich, wie der Erfolg bei dem Aufspüren von Radon-Eintrittsstellen bei der Radon-Diagnostik von dem wirksamen Unterdruck abhängig sein kann. Erst bei einem Unterdruck von 3 Pascal wird die Eintrittsstelle in diesem Beispiel aktiviert. Während der Zeiten mit Zustand A (Sommermessung) ist ein Radoneintritt an dieser die Eintrittsstelle messtechnisch nicht erkennbar.

**Abb. 6.14: Abhängigkeiten Differenzdruck und Radon-Sniffing von Nutzungszuständen (Zustand A: Badlüfter aus, Kellerfenster auf Kippstellung, Zustand B: Badlüfter an, Kellerfenster zu)**



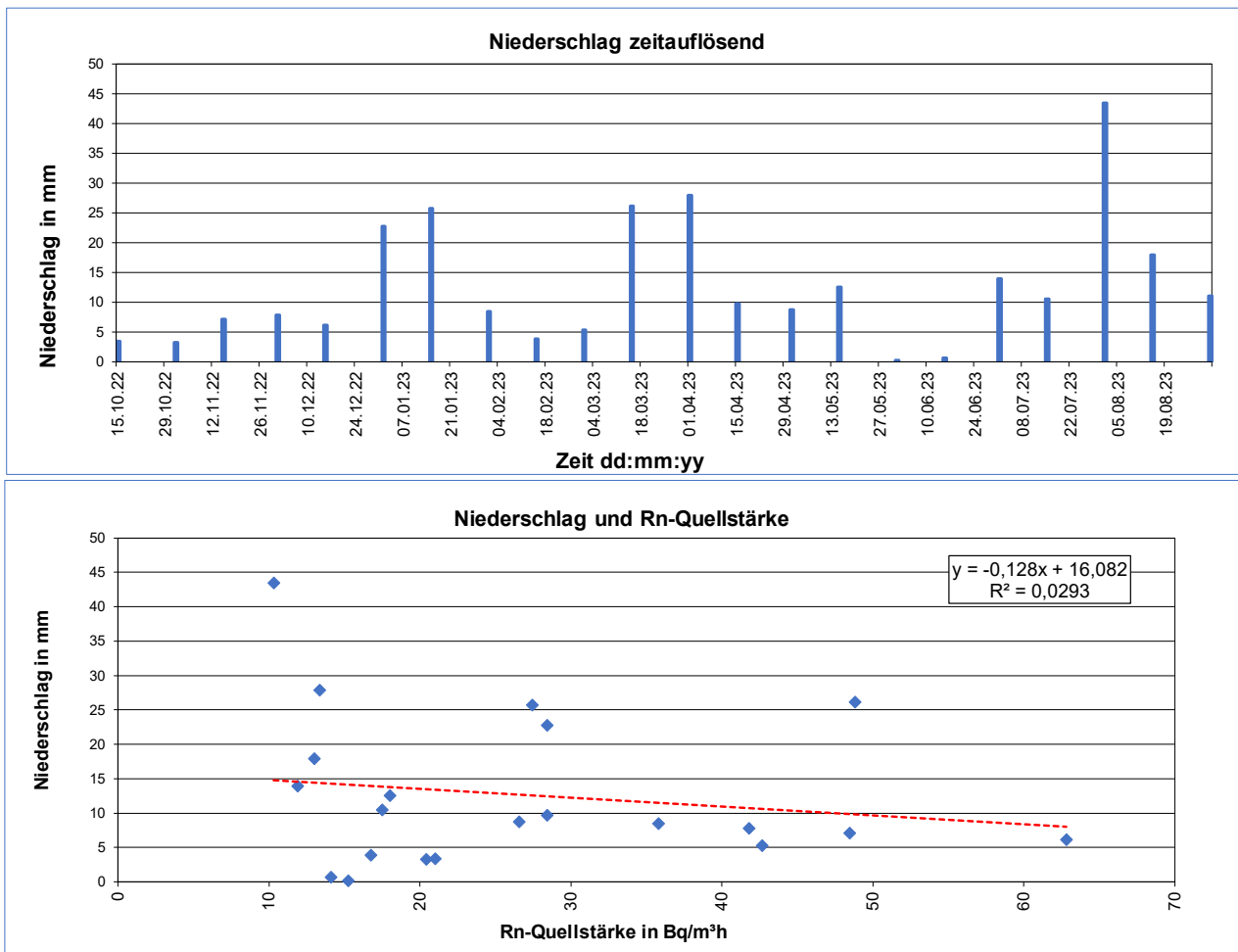
**Abb. 6.15: Abhängigkeiten Radonkonzentration und Quellstärke von Nutzungszuständen (Zustand A: Badlüfter aus, Kellerfenster auf Kippstellung, Zustand B: Badlüfter an, Kellerfenster zu)**



In der Regel handelt es sich um kurzfristige - meist vom Nutzer unbemerkte - Ereignisse, die einen derartigen Einfluss auf den Radoneintritt haben und auch objektbezogen zu bewerten sind. Die Auswirkungen auf den Jahresmittelwert sind eher gering und werden maßgeblich von den dauerhaft wirksamen Faktoren Infiltrationsluftwechsel (Gebäudedichtheit zur Außenluft) und der mittleren Radon-Eintrittsrate (Gebäudedichtheit zum Erdreich und Radonpotenzial) bestimmt.

Für die weiterführenden Analysen werden die Einflussfaktoren Niederschlag (Bodenfeuchte), Druck und der Druckgradient betrachtet. Für beide Parameter können im Rahmen der statistischen Auswertung keine deutlichen Zusammenhänge und Abhängigkeiten dargestellt werden. Die nachfolgende Abbildung 17 zeigt das Niederschlagsprofil (Summenwerte über 96 h) über 14-Tage im gleitenden Mittel beispielhaft aus Objekt 4. Die Verteilung der Niederschlagsmengen erfolgt im Beobachtungszeitraum Oktober 2022 bis August 2023 unregelmäßig über das Jahr verteilt mit Spitzenwerten im Januar, Ende März und Anfang August. Ein direkter Zusammenhang mit der Rn-Quellstärke wird auch über die Regression nicht sehr deutlich. Tendenziell liegen etwas höhere Werte für die Rn-Quellstärke bei höheren Niederschlagsmengen vor. Eine statistische Absicherung ist jedoch nicht darstellbar.

Abb. 6.16: Abhängigkeit Niederschlag (Objekt 4: Jahresmessung 14-Tage Mittelwerte)

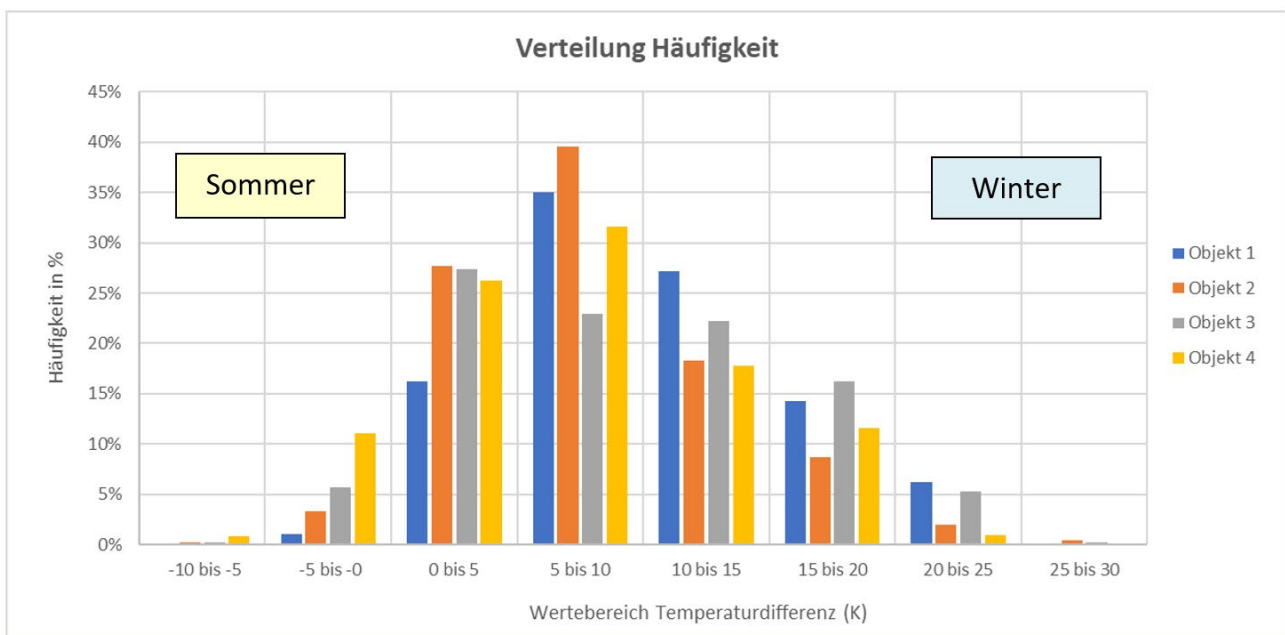


Die Abhängigkeiten und Einflussgrößen für die Parameter Niederschlag und Druck bzw. Druckgradient werden über Modellberechnungen unter Nutzung von KI-Modellen berücksichtigt (siehe Kapitel 6.11).

### 6.8 Analyse von Mittelwerten aus Temperatur-Wertebereichen

Zur weiteren Analyse wurden mit Hilfe einer Filterfunktion Wertebereiche für den gesamten Datensatz je Objekt für den Parameter Temperaturdifferenz ( $T_{\text{innen}} - T_{\text{außen}}$ ) in 5 K-Schritten abgeleitet und Mittelwerte für die jeweilige Wertebereiche dargestellt. Abbildung 6.17 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Messwerte der Radonkonzentration in diesen Wertebereichen der Temperaturdifferenzen (innen/außen). Es kann eine nahezu symmetrische Verteilung um eine Häufung im Bereich von 5 bis 10 K beobachtet werden.

**Abb. 6.17:** Häufigkeitsverteilung der Messwerte der Radonkonzentration in Wertebereichen der Temperaturdifferenz (innen/außen) in 5 K-Schritten



**Abb. 6.18:** Verteilung der prozentualen Abweichung vom Jahresmittelwert für gemessene Werte der Wertebereiche der Temperaturdifferenz (innen/außen) in 5 K-Schritten

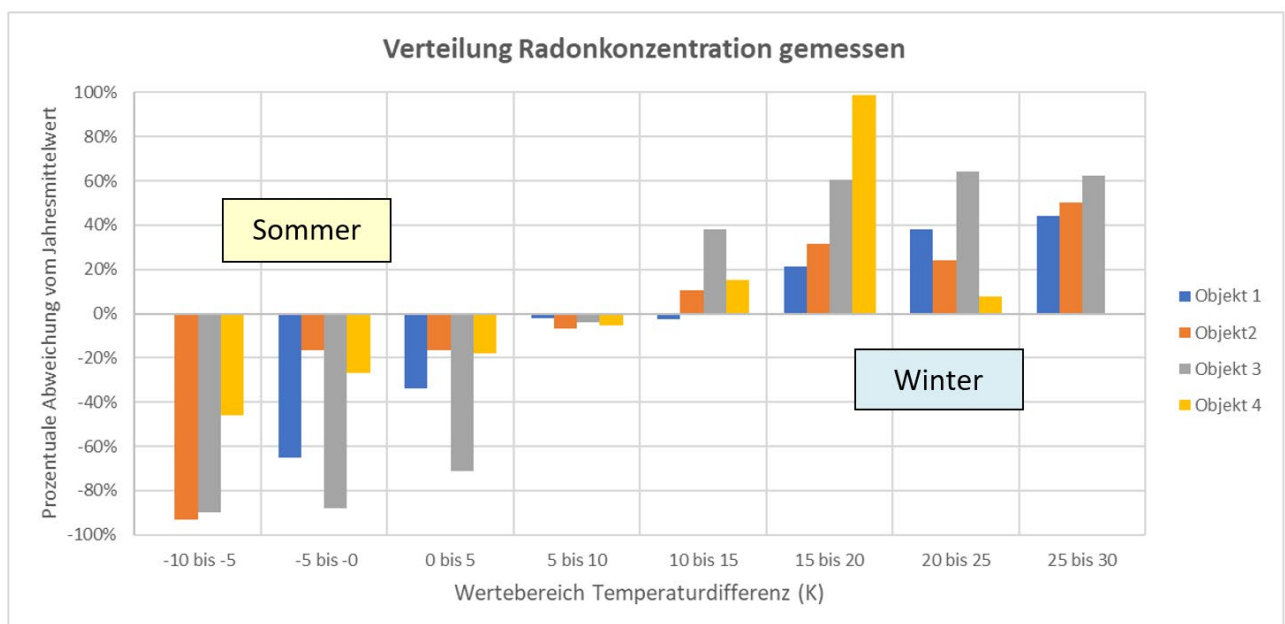
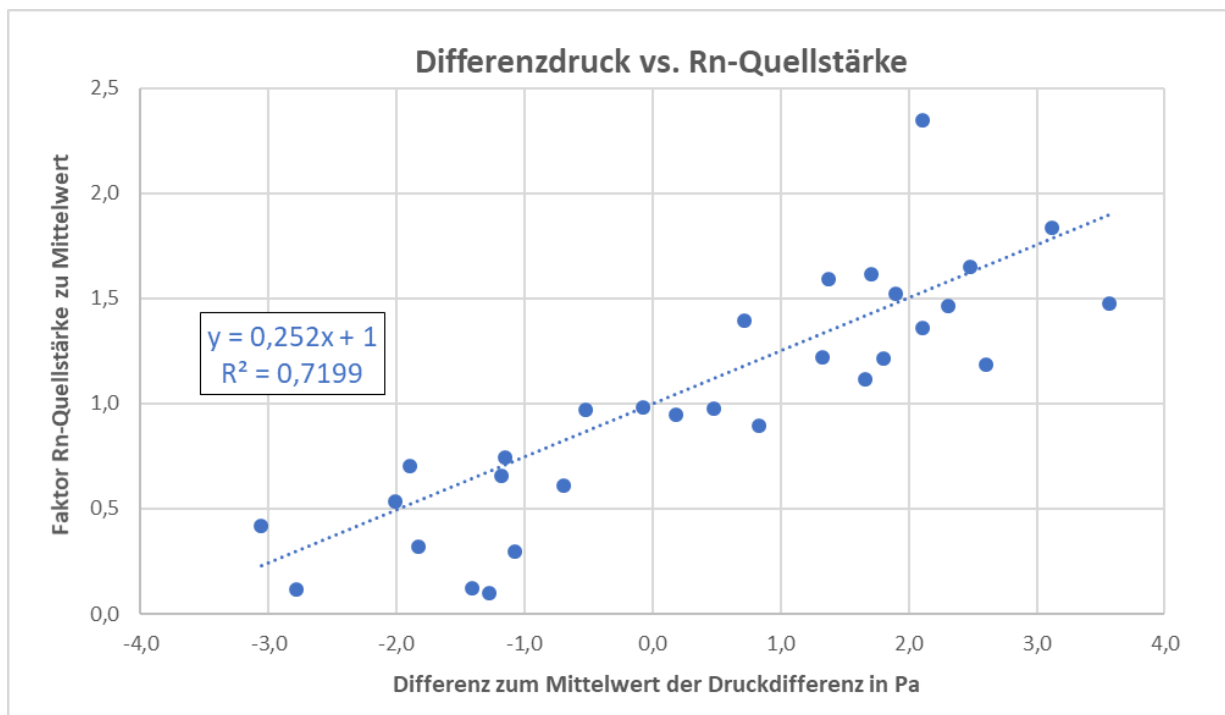


Abbildung 6.18 zeigt die prozentualen Abweichungen der gemessenen Werte zu den jeweiligen Jahresmittelwerten der Radonkonzentrationen in Abhängigkeit der Werteintervalle der Temperaturdifferenzen in 5 K-Schritten. Hier zeigen sich erwartungsgemäß nahezu kontinuierliche Anstieg von negativen Prozentzahlen bei negativen Temperaturdifferenzen bis hin zu positiven Prozentzahlen bei höheren positiven Temperaturdifferenzen.

### Regressionsanalyse

Abbildung 6.19 zeigt, für alle Objekte zusammengefasst, die Abhängigkeiten des Faktors für die Rn-Quellstärke zur Differenz zum Mittelwert der Druckdifferenzen für gemittelte Werte der Wertebereiche der Temperaturdifferenz ( $T_{\text{innen}} - T_{\text{ausßen}}$ ) in 5 K-Schritten. Über die Regressionsanalyse kann mit einem  $R^2$ -Wert von 0,72 ein vergleichsweise gutes Bestimmtheitsmaß für die lineare Regression beobachtet werden. Die Steigung liegt bei 0,25 (/Pa) bei einem Nulldurchgang bei -4 Pascal. Da in der Praxis keine negativen Radon-Konzentrationen und somit auch keine negativen Radon-Eintrittsraten vorkommen, ist der Anwendungsbereich dieser Regressionsformel auf Werte  $> -4$  Pascal limitiert. Negative Differenzdruckwerte beschreiben in diesem Fall Überdrucksituationen, die ggf. im Sommer vorliegen können und dem konvektivem Radoneintritt auf natürlichem Wege entgegenwirken.

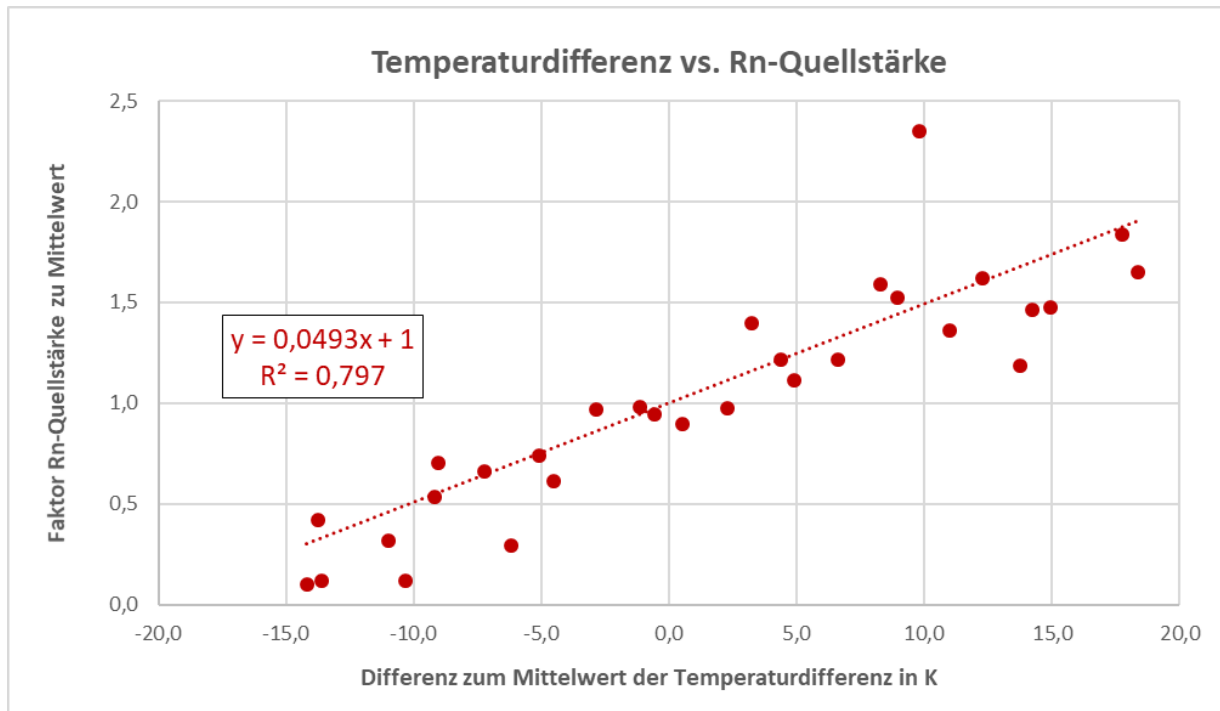
**Abb. 6.19:** Abhängigkeiten Faktor Rn-Quellstärke zur Differenz zum Mittelwert der Druckdifferenzen für gemittelte Werte der Wertebereiche der Temperaturdifferenz ( $T_{\text{innen}} - T_{\text{ausßen}}$ ) in 5 K-Schritten, alle Objekte zusammengefasst



Grundsätzlich kann auch auf eine Berechnung der Druckdifferenzen gem. DIN/TS 18177-2 aus den gemessenen Werten für die Temperaturdifferenzen und die Windstärken verzichtet werden und direkt eine Abschätzung über die gemessenen Temperaturdifferenzen erfolgen. Abbildung 6.20 zeigt, für alle Objekte zusammengefasst, die Abhängigkeiten des Faktors für die Rn-Quellstärke zur Differenz zum Mittelwert der Temperaturdifferenzen für gemittelte Werte der Wertebereiche der Temperaturdifferenz ( $T_{\text{innen}} - T_{\text{ausßen}}$ ) in 5 K-Schritten. Über die Regressionsanalyse kann mit einem

$R^2$ -Wert von knapp 0,8 ein vergleichsweise gutes Bestimmtheitsmaß für die lineare Regression beobachtet werden. Die Steigung liegt bei 0,05 (/K) bei einem Nulldurchgang bei -20 Kelvin. Der Anwendungsbereich dieser Regressionsformel ist somit auf Werte  $> -20$  Kelvin limitiert.

**Abb. 6.20:** Abhängigkeiten Faktor Rn-Quellstärke zur Differenz zum Mittelwert der Temperaturdifferenzen für gemittelte Werte der Wertebereiche der Temperaturdifferenz ( $T_{\text{innen}} - T_{\text{außen}}$ ) in 5 K-Schritten, alle Objekte zusammengefasst



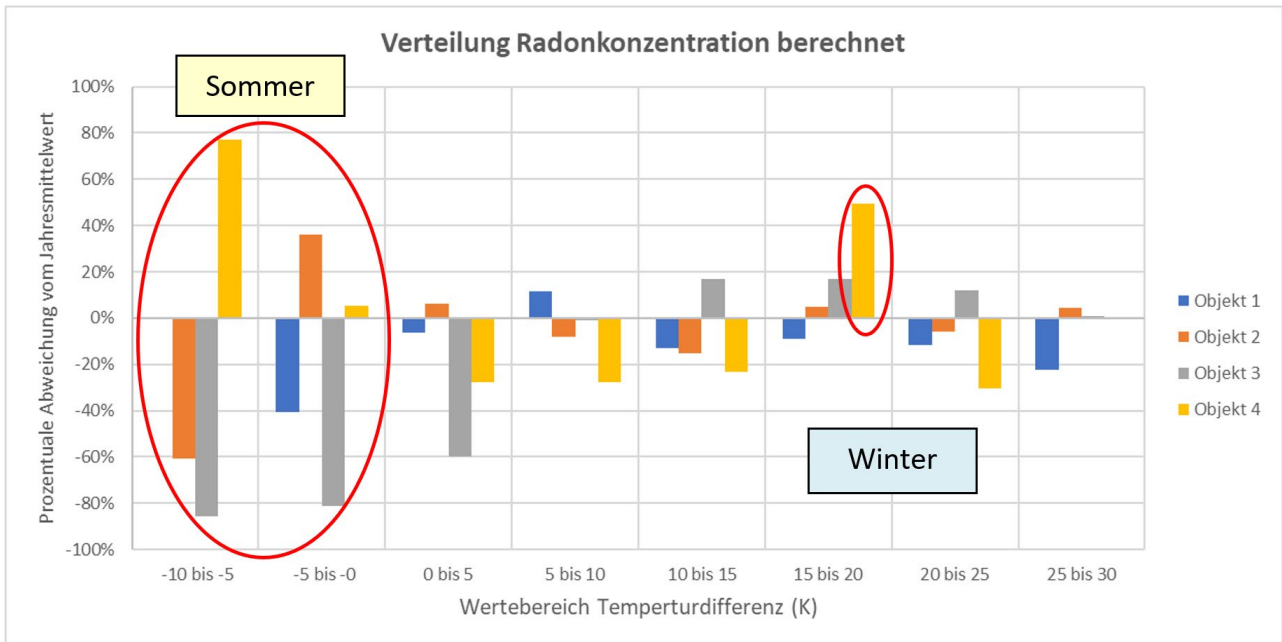
### Berechnung der Radonkonzentrationen nach Formel Regressionsanalyse

Aus den über die Regressionsformel berechneten Faktoren für die Radon-Quellstärken wurden je Temperaturdifferenz-Intervall die zu erwartenden Radonkonzentrationen für alle Objekte abgeschätzt und die zugehörigen prozentualen Abweichungen vom Jahresmittelwert berechnet. Abbildung 6.21 zeigt die Verteilung der prozentualen Abweichung vom Jahresmittelwert für berechnete Werte der Wertebereiche der Temperaturdifferenz ( $T_{\text{innen}} - T_{\text{außen}}$ ). Die mittlere Abweichung zum Jahresmittelwert liegt für die gemessenen Radonkonzentrationen bei 31 % (90. Perzentil: 56 %). Die mittlere Abweichung zum Jahresmittelwert liegt für die nach der Regressionsformel berechneten Radonkonzentrationen bei 22 % (90. Perzentil: 47 %).

Besonders große unregelmäßige Abweichungen können in den Temperaturdifferenz-Intervallen von -5 bis -10 K und 0 bis -5 K beobachtet werden. Diese Werteintervalle beschreiben Sommer-Situationen mit höheren Außentemperaturen ( $T_{\text{innen}} < T_{\text{außen}}$ ) und somit niedrigen bis hin zu negativen Druckdifferenzen. Zudem kann für Objekt 4 im Werteintervall von 15 bis 20 K ein Ausreißer zugeordnet werden, welcher auf Unregelmäßigkeiten während der Messung im Winter zurückzuführen ist. Die oben beschriebenen Datensätze bei starken Abweichungen in der Sommerphase aller Objekte und die Unregelmäßigkeit in dem Werteintervall 15 bis 20 K bei Objekt 4 wurden in der Darstellung in Abbildung 6.22 herausgenommen. Hierbei bleiben noch 92 % der Datensätze des gesamten Jahres erhalten. Die so korrigierte mittlere Abweichung zum Jahresmittelwert liegt für die

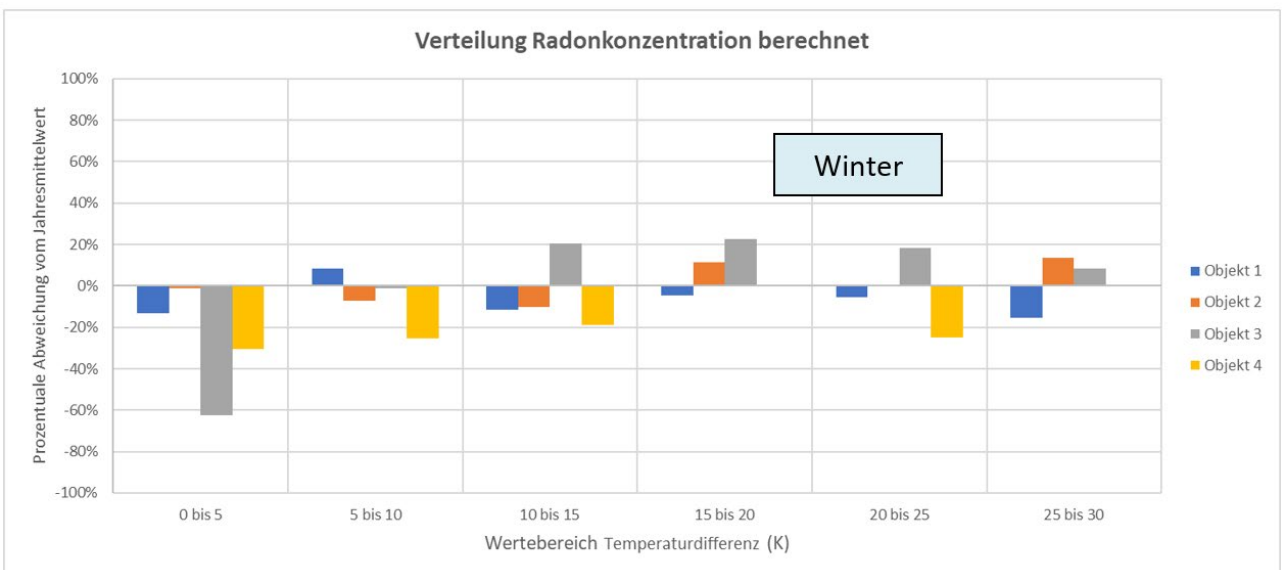
gemessenen Radonkonzentrationen bei 30 % (90. Perzentil: 62 %) und die mittlere Abweichung zum Jahresmittelwert für die berechneten Radonkonzentrationen bei 15 % (90. Perzentil: 28 %).

**Abb. 6.21: Verteilung der prozentualen Abweichung vom Jahresmittelwert für berechnete Werte der Wertebereiche der Temperaturdifferenz ( $T_{innen} - T_{ausßen}$ ) in 5 K-Schritten**



Mittlere Abweichung zum Jahresmittelwert gemessen: 31 % (90. Perzentil: 56 %)  
Mittlere Abweichung zum Jahresmittelwert berechnet: 22 % (90. Perzentil: 47 %)

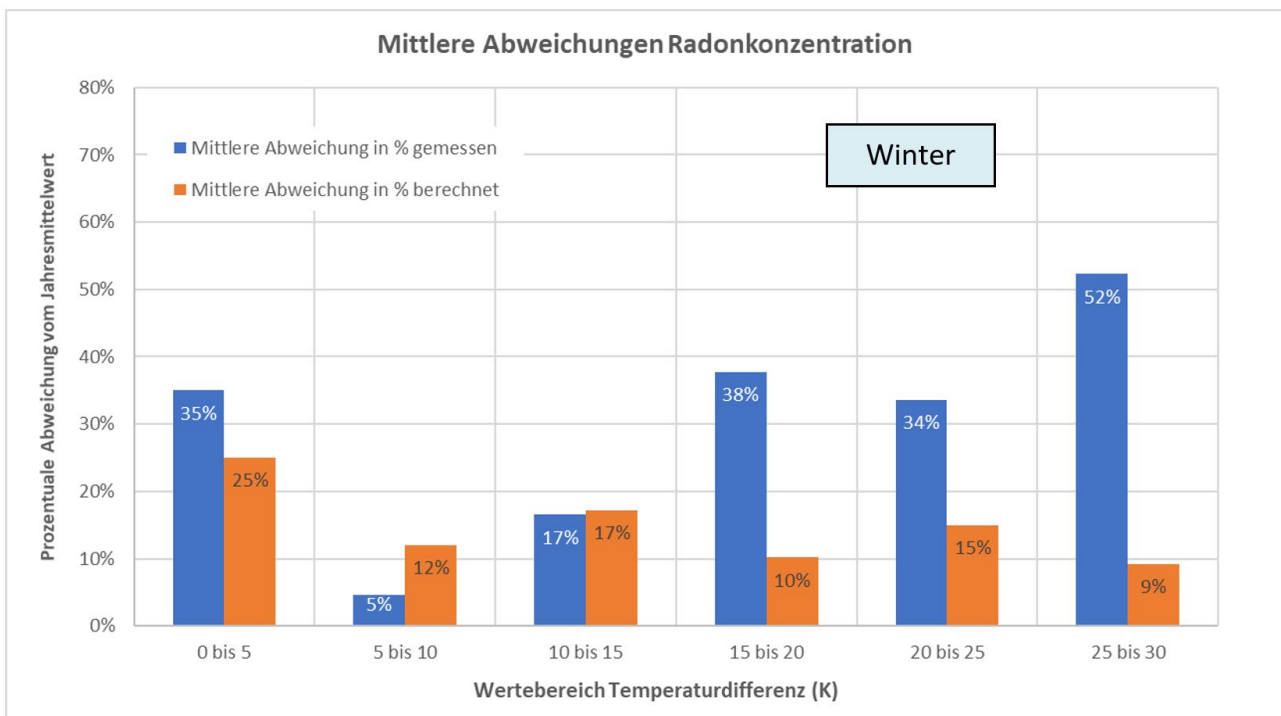
**Abb. 6.22: Korrigierte Verteilung der prozentualen Abweichung vom Jahresmittelwert für berechnete Werte der Wertebereiche der Temperaturdifferenz ( $T_{innen} - T_{ausßen}$ ) in 5 K-Schritten (ohne Sommerwerte bzw. Wertebereiche -10 K bis 0 K)**



Mittlere Abweichung zum Jahresmittelwert gemessen: 30 % (90. Perzentil: 62 %)  
Mittlere Abweichung zum Jahresmittelwert berechnet: **15 % (90. Perzentil: 28 %)**

Abbildung 6.23 zeigt die korrigierte Verteilung der prozentualen Abweichung (Absolutwerte) vom Jahresmittelwert für gemessene und berechnete Werte der Wertebereiche der Temperaturdifferenz ( $T_{\text{innen}} - T_{\text{außen}}$ ) in 5 K-Schritten (ohne Sommerwerte bzw. Wertebereiche -10 K bis 0 K) für alle Objekte zusammengefasst. In den mittleren bis oberen Wertebereichen der Temperaturdifferenzen liegen die prozentualen Abweichungen bei 9 % bis 17 % gegenüber den gemessenen prozentualen Abweichungen von 5 % bis 52 %. Der Wertebereich ab 0 K bis 5 K (geringe Temperaturdifferenzen) liefert die größte gemessene prozentuale Abweichung mit 25 %.

**Abb. 6.23: Korrigierte Verteilung der prozentualen Abweichung vom Jahresmittelwert für gemessene und berechnete Werte der Wertebereiche der Temperaturdifferenz ( $T_{\text{innen}} - T_{\text{außen}}$ ) in 5 K-Schritten (ohne Sommerwerte bzw. Wertebereiche -10 K bis 0 K), alle Objekte zusammengefasst**



### Bewertung der Abschätzung der Radonkonzentrationen nach Formel Regressionsanalyse

Die bei der Regressionsanalyse von ca. 92 % der Daten aller Objekte abgeleiteten Korrekturfaktoren für die Radon-Quellstärken auf der Basis von berechneten Druckdifferenzen (nach DIN/TS 18117-2) eignen sich bereits gut für die Abschätzung der Radonkonzentrationen im Jahresmittel mit einer mittleren Abweichung von durchschnittlich 15 %. Mit einer 90-prozentigen Wahrscheinlichkeit (90. Perzentil) weicht der abgeleitete Jahresmittelwert nur unter 28 % vom tatsächlichen Jahresmittelwert ab.

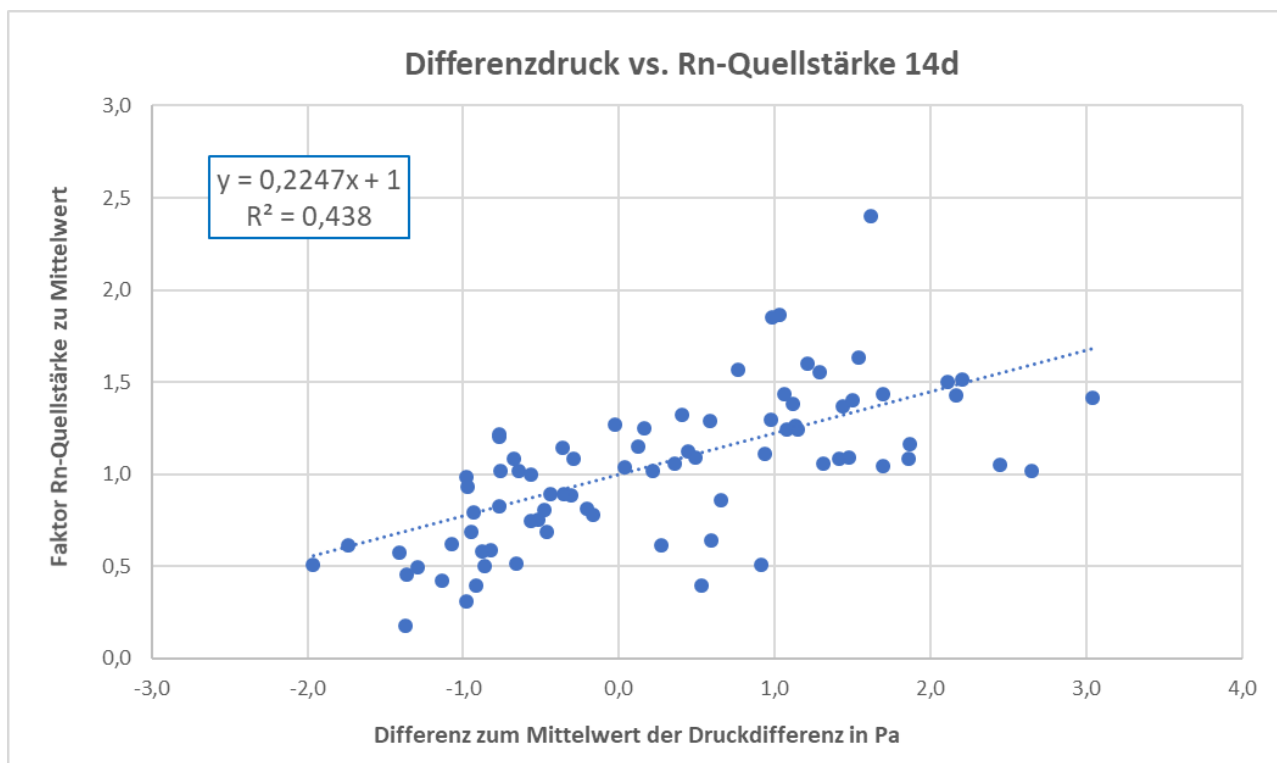
Die Daten von Messungen bei **hohen Außenlufttemperaturen** im Wertebereich **unter 0 K** (d.h. Außenlufttemperatur höher als Innentemperatur im Tagesmittel ~ Sommerwerte) eignen sich **nicht** für eine Abschätzung der Radonkonzentrationen im Jahresmittel.

Die Berechnungen der Druckdifferenzen berücksichtigen hierbei nur die Temperaturen und die Windstärken. Andere Witterungseinflüsse deuten bei der einfachen Regressionsanalyse **nicht** auf signifikante Einflussgrößen in Bezug auf die Radon-Quellstärken hin.

### 6.9 Analyse von Mittelwerten aus 14-Tages-Wertebereichen

In der Praxis lassen sich in einem kürzeren zeitlichen Messintervall (wenige Wochen) nur unvollständige Datensätze für eine Einteilung der Messwerte in Temperaturdifferenzen-Intervalle herleiten. Die in Kapitel 6.8 dargestellten Werteintervalle konnten aus den zeitauflösenden Messungen über 1 Jahr generiert werden und beinhalten eine ausreichende Anzahl von Datensätzen innerhalb der 5 K-Intervalle. Nachfolgend soll in Kapitel 6.9 eine Regressionsanalyse auf der Basis von Zeitintervallen von 2 Wochen aus 14-Tages-Mittelwerten abgeleitet werden. Abbildung 6.24 zeigt die Abhängigkeit Faktor Rn-Quellstärke zur Differenz zum Mittelwert der Druckdifferenzen für gemittelte Werte über 14 Tagesintervalle eines Jahres für alle Objekte zusammengefasst. Im Vergleich zu den Temperaturintervallen in Abbildung 6.20 für die Regressionsanalyse mit 14 Tagesintervallen mit einem  $R^2$ -Wert von 0,44 ein etwas schlechtes Bestimmtheitsmaß mit größerer Streuung für die lineare Regression beobachtet werden. Die Steigung liegt jedoch in einer ähnlichen Größenordnung bei 0,22 (/Pa) bei einem Nulldurchgang bei -4,4 Pascal. Die mittlere Abweichung zum gemessenen Jahresmittelwert für Radon liegt bei 31 % (90. Perzentil: 56 %) und die mittlere Abweichung zum berechneten Jahresmittelwert liegt nach Anwendung der Regressionsformel bei 22 % (90. Perzentil: 45 %).

**Abb. 6.24:** Abhängigkeiten Faktor Rn-Quellstärke zur Differenz zum Mittelwert der Druckdifferenzen für gemittelte Werte über 14 Tagesintervalle, alle Objekte zusammengefasst



Mittlere Abweichung zum Jahresmittelwert gemessen: 31 % (90. Perzentil: 56 %)  
Mittlere Abweichung zum Jahresmittelwert berechnet: 22 % (90. Perzentil: 45 %)

### Berechnung der Faktoren für die Rn-Quellstärke (Übersicht)

Aus den Regressionsanalysen kann eine allgemeine Berechnungsformel für die Berechnung des Faktors der Radon-Quellstärke aus gemessenen Datensätzen der Druckdifferenzen (aus Temperaturdifferenzen und Windstärken gem. DIN/TS 18117-2) zur Abschätzung der mittleren Radonkonzentration im Jahresmittel abgeleitet werden.

Die Berechnung des Faktors für die Radon-Quellstärke im Messintervall erfolgt nach dem Einsatz der Differenz zur mittleren Druckdifferenz  $x$  im Messintervall nach Gleichung 9:

Gleichung 9

$$F_{Q(Rn)} = a \cdot x + 1$$

mit  $F_{Q(Rn)}$  = Faktor Rn-Quellstärke im Messintervall  
 $a$  = Korrelationskoeffizient (Steigung) in 1/Pa  
 $x$  = Differenz zur mittleren Druckdifferenz im Messintervall in Pa

Die standortbezogene mittlere Druckdifferenz  $x_{\text{Jahresmittel}}$  ist nach DIN/TS 18117-2 aus den Jahresmittelwerten der Temperaturdifferenzen und Windstärken aus z.B. Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zu ermitteln ( $x = x_{\text{Messintervall}} - x_{\text{Jahresmittel}}$ ).

**Tabelle 6.11: Korrelationskoeffizienten  $a$  für die Berechnung der Faktoren der Rn-Quellstärke**

Datensatz	$a$	$R^2$
Saisonale Messungen Objekt 1	0,19	0,58
Saisonale Messungen Objekt 2	0,33	0,91
Saisonale Messungen Objekt 3	0,41	0,81
Saisonale Messungen Objekt 4	0,32	0,49
Saisonale Messungen gesamt	0,33	0,70
<b>Messreihe Gesamt: Werteintervalle Temperatur</b>	<b>0,25</b>	<b>0,72</b>
<b>Messreihe Gesamt: 14 Tage Mittelwerte</b>	<b>0,22</b>	<b>0,44</b>

Aus den Objektmessungen und saisonalen Messungen ergeben sich die in der Tabelle 6.11 aufgelisteten Korrelationskoeffizienten. Aus den Jahresmessungen und der Zusammenfassung aller Datensätze der Objekte liegt der für eine belastbare Abschätzung zugrunde gelegter Korrelationskoeffizient im Bereich von 0,22 und 0,25. Die mittleren prozentualen Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten für die Radon-Quellstärken bzw. Radonkonzentrationen im Jahresmittel liegen für die untersuchten Objekte bei 22 %. Aus der Erfahrung der Ergebnisse der Werteintervalle der Temperaturdifferenzen sollten auch für die 14-Tagesmittelwerte möglichst keine Datensätze aus der warmen Sommerphase mit negativen Temperaturdifferenzen ( $T_{\text{innen}} < T_{\text{ausen}}$ ) für Abschätzungen oder Prognosezwecke verwendet werden.

Die Berechnung der **Radon-Quellstärke** im Jahresmittel erfolgt dann nach Gleichung 10:

Gleichung 10

$$Q_{Rn} = \frac{Q_{Rn \text{ gemessen}}}{F_{Q(Rn)}}$$

mit

$Q_{Rn}$  = mittlere Radon-Eintrittsrate in Bq/m<sup>3</sup>h

$Q_{Rn \text{ gemessen}}$  = Radon-Eintrittsrate im Messintervall in Bq/m<sup>3</sup>h

$F_{Q(Rn)}$  = Faktor Rn-Quellstärke

Die Berechnung der **Radon-Aktivitätskonzentration** im Jahresmittel erfolgt nach Gleichung 11:

Gleichung 11

$$C_{Rn} = \frac{Q_{Rn}}{(n + \lambda)}$$

mit

$C_{Rn}$  = mittlere Radonkonzentration in Bq/m<sup>3</sup>

$Q_{Rn}$  = mittlere Radon-Eintrittsrate in Bq/m<sup>3</sup>h

$n$  = mittlere Luftwechselzahl in /h

$\lambda$  = Zerfallskonstante von Radon (Rn-222) in 1/h ( $\lambda = 0,0076/h$ )

(Außenluft ohne Berücksichtigung)

### 6.10 Korrelationsanalyse für die Einflussfaktoren

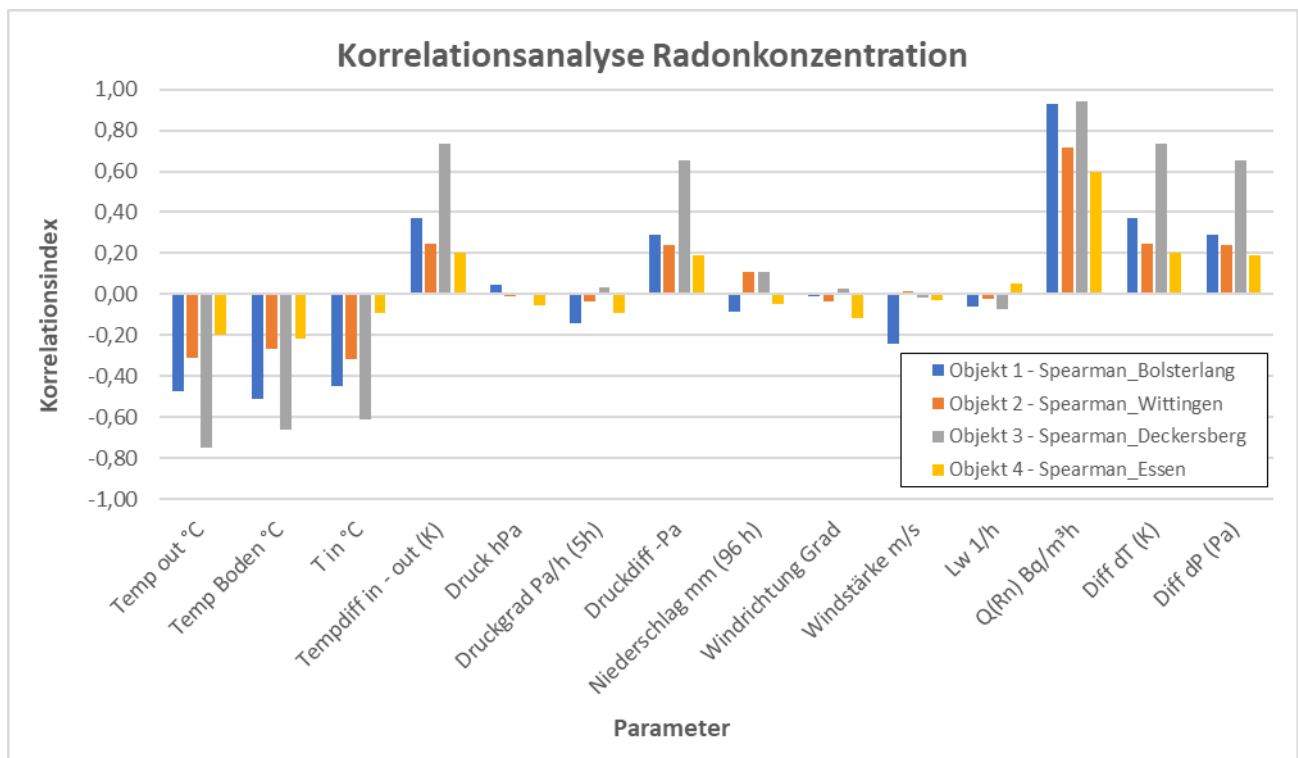
Die Korrelationsanalysen zeigen auf, welche Parameter einen besonders relevanten Einfluss auf die Radonwert oder den Faktor der Radon-Quellstärke haben und welche weniger relevant sind. Hierdurch sollen wichtige Features für ein KI-Modell (neuronales Netz) identifiziert werden.

Dabei wurde mit den Spearman- und Kendall-Matrizen gearbeitet. Die Spearman- und Kendall-Matrizen untersuchen die monotone Beziehung zwischen zwei Variablen, was bedeutet, dass sie aufzeigen, ob bei zunehmendem Wert einer Variable auch der Wert der anderen Variable tendenziell steigt oder fällt, ohne die genaue Form dieser Beziehung zu bestimmen.

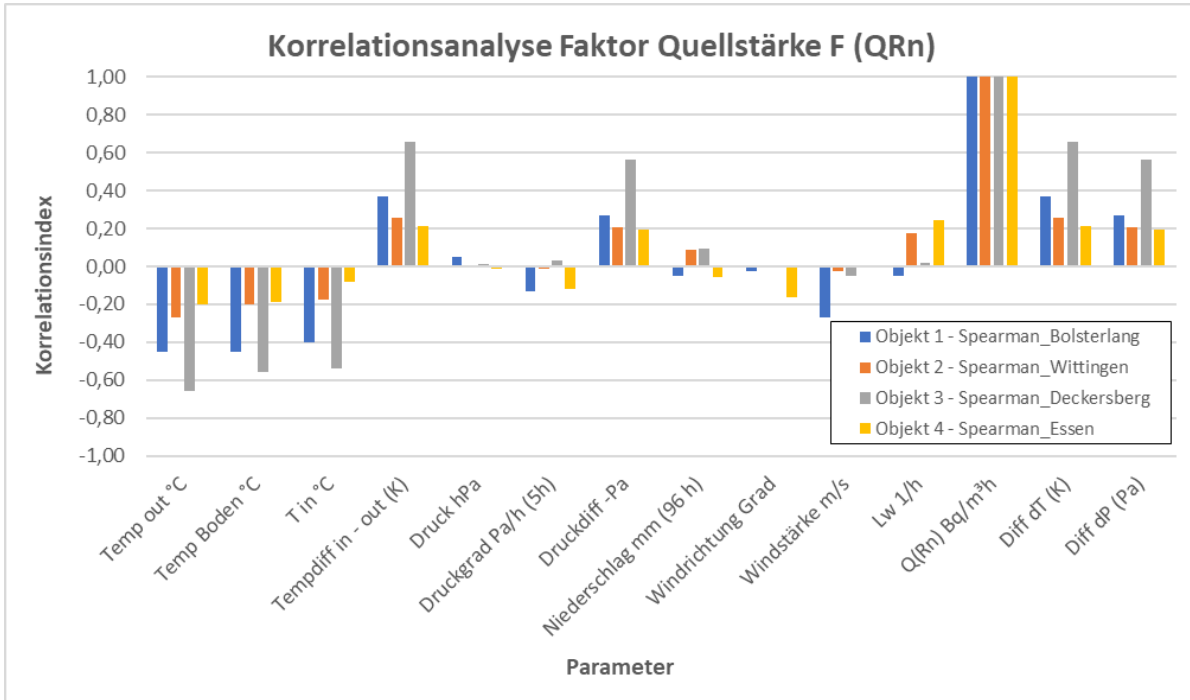
Für die Daten eines jeden Standorts wurden diese berechnet, um anschließend zu entscheiden, welche Parameter dem neuronalen Netz übergeben werden. Grundsätzlich werden der Radonwert, der Faktor der Quellstärke, die Radon-Quellstärke und der Zeitpunkt der Messung nicht als Parameter zur Vorhersage übergeben. Des Weiteren werden der Druck und die Windrichtung bei der Prognose nicht hinzugezogen. Für die Messwerte werden jeweils Mittelwerte über 25 Messungen durchgeführt. Es werden also in etwa Tagesmittelwerte mit den Tagesmittelwerten der Witterungsparameter prognostiziert.

Die nachfolgenden Abbildungen (Abb. 6.24 und 6.25) zeigen die Ergebnisse der Korrelationsanalysen nach Spearman für die Radonkonzentrationen und den Faktor Rn-Quellstärke in der grafischen Übersicht für die einzelnen Objekte separat. Zum Teil sind deutliche Unterschiede in der Höhe der Korrelations-Indexwerte für die einzelnen Parameter erkennbar. Die Richtungen (positive oder negative Korrelationen) zeigen jedoch keine Unterschiede. Bei Objekt 3 (Deckersberg) liegen die durchschnittlich höchsten Korrelations-Indexwerte vor.

**Abb. 6.25: Korrelationsanalyse mit Korrelations-Indexwerten nach Spearman für die Radonkonzentration**

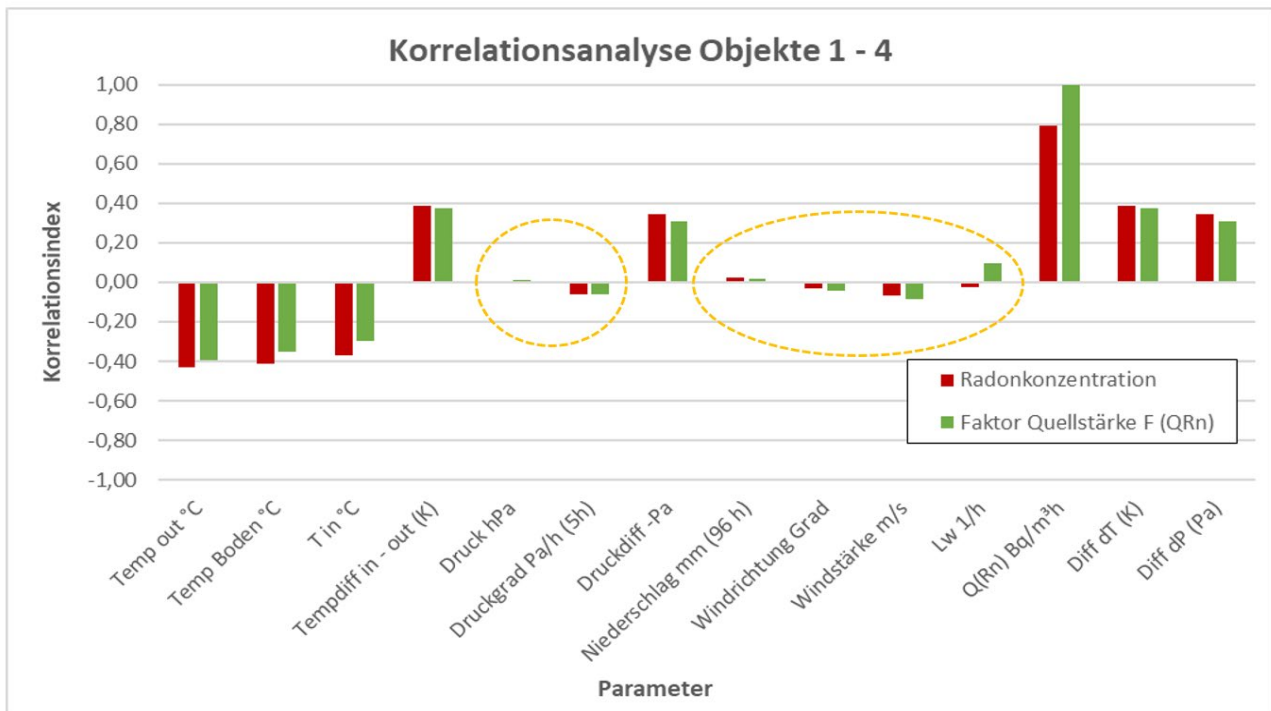


**Abb. 6.26:** Korrelationsanalyse mit Korrelations-Indexwerten nach Spearman für den Faktor Rn-Quellstärke



In Abbildung 6.27 sind die Ergebnisse der Korrelationsanalysen nach Spearman für die Radonkonzentrationen und den Faktor Rn-Quellstärke in der grafischen Übersicht für alle Objekte zusammengefasst als Mittelwert dargestellt.

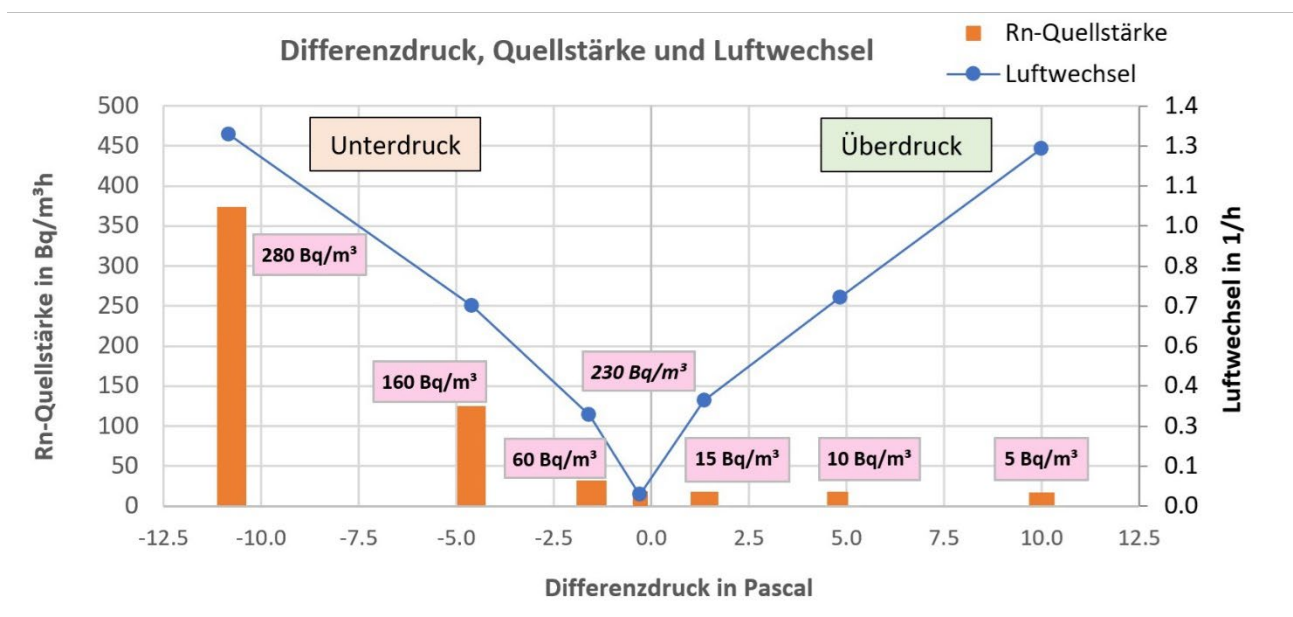
**Abb. 6.27:** Korrelationsanalyse mit Korrelations-Indexwerten nach Spearman für die Radonkonzentration und den Faktor Rn-Quellstärke, alle Objekte zusammengefasst



Die Ergebnisse der Korrelationsanalysen nach Spearman zeigen für alle Objekte zusammengefasst gute **negative** Korrelationen mit Temperaturen (Temp out, Temp Boden, Temp in) und gute **positive** Korrelation mit Druckdifferenzen (inkl. Diff dP) und Temperaturdifferenzen in-out (inkl. Diff dT). Schlechte Korrelationen ergeben sich mit den Druckgradienten und den Windstärken. Sehr schlechte Korrelationen liefern die Parameter Absolutdruck, Niederschlag und Windrichtung. Die Korrelationen mit dem Luftwechsel sind wenig aussagekräftig.

In Ergänzung zur Korrelationsanalyse wurde im Objektraum von Objekt 4 nach Abschluss der Messreihen eine separate Untersuchung der Abhängigkeiten der Quellstärken und der daraus resultierende Radonkonzentrationen von der wirksamen Druckdifferenz durchgeführt. Zu diesem Versuch wurde ein Ventilator in die Innenwand zum angrenzenden Kellerflur eingesetzt und Messungen in verschiedenen Betriebsstufen schrittweise im Unterdruck und im Überdruck (durch Umkehr der Strömungsrichtung von Ab- auf Zuluft) durchgeführt. Für jede Betriebsstufe wurde die zugehörige wirksame Druckdifferenz gemessen, der resultierende Luftwechsel über Tracergas bestimmt und die Radonkonzentration bis zur Ausgleichkonzentration aufgezeichnet. Aus der Radonkonzentration und dem Luftwechsel wurde die Radon-Quellstärke bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Übersicht in Abbildung 6.28 dargestellt.

**Abb. 6.28: Quellstärke und Radonkonzentration in Abhängigkeit vom Differenzdruck**



In der Ausgangssituation bei ausgeschalteter Lüftung liegt eine Radon-Quellstärke von 9,2 Bq/m³h bei einem Luftwechsel von 0,04 /h vor, was zu einer Radonkonzentration von 230 Bq/m³ führt. Bei Betrieb des Lüfters in der Einstellung Abluftventilation reduziert sich die Radonkonzentration zunächst auf 60 Bq/m³. Bei weiterer Erhöhung der Lüfterleistung zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Radonkonzentrationen und der Radon-Quellstärken im Bereich negativer Druckdifferenzen (Unterdruck). Trotz der Erhöhung des Luftwechsels zeigt sich ein Anstieg der Radonkonzentrationen von 60 Bq/m³ bei 0,3/h über 160 Bq/m³ bei 0,7/h bis 280 Bq/m³ bei 1,3/h. Verantwortlich sind die durch den bei Abluftventilation steigenden Unterdruck verursachten steigenden Radon-Quellstärken des konvektiven Radoneintritts.

Die Radoneintrittsraten steigern sich von 20 Bq/m<sup>3</sup>h bei -2 Pa über 115 Bq/m<sup>3</sup>h bei -4,5 Pa bis 360 Bq/m<sup>3</sup>h bei -11 Pa. Bei Ventilation mit Zuluft wird ein Überdruck erzeugt und die Radonkonzentrationen und Eintrittsraten bleiben auf durchgehend niedrigem Niveau von 10 Bq/m<sup>3</sup>h bzw. 15 Bq/m<sup>3</sup>.

Aus diesem Versuch wird deutlich, dass die Kellerbelüftung mit reiner Abluftventilation trotz deutlicher Erhöhung des Luftwechsels eine nur geringe Reduzierung der Raumluftkonzentration zur Folge haben kann. Unter bestimmten Voraussetzungen, wie in diesem Beispiel in einem relativ luftdichten Raum, kann bei höherer Lüfterleistung sogar eine Erhöhung der Radonkonzentrationen gegenüber der Ausgangskonzentration ohne Belüftung bewirkt werden. Entscheidende Größe ist der wirksame Unterdruck.

### **6.11 Modellentwicklung mit Hilfe von KI-basierten Modellen**

Zur weiteren Datenanalyse wurden KI-basierte Modelle mit neuronalen Netzen genutzt, um alle untersuchten und gemessenen Einflussfaktoren über eine möglichst umfassende Datenanalyse in Bezug auf die Zielgrößen Radonkonzentration in der Raumluft und normierte Faktoren der Radon-Quellstärke  $Q(Rn)$  einbeziehen zu können.

#### **Aufbau des neuronalen Netzes**

Die neuronalen Netze, die zur Vorhersage der Radonwerte bzw. Faktorwerte an den verschiedenen Standorten verwendet werden, sind in mehreren Schichten aufgebaut. Die Struktur der Netze besteht aus einer Eingabeschicht, zwei versteckten Schichten und einer Ausgabeschicht. Die Eingabeschicht besteht je aus 11 Neuronen, die die relevanten Parameter aufnehmen. Daran schließt sich die erste versteckte Schicht mit 22 Neuronen an, gefolgt von einer zweiten versteckten Schicht mit nochmals 11 Neuronen. Die finale Ausgabeschicht besteht aus einem einzelnen Neuron, welches den Vorhersagewert liefert. Für das Training der Netze wurde der Verlust als 'mean\_squared\_error' definiert, was bedeutet, dass die mittlere quadratische Abweichung zwischen den vorhergesagten und den tatsächlichen Werten minimiert wird. Als Optimierungsalgorithmus wurde 'SGD' (Stochastic Gradient Descent) verwendet, um das Netz zu trainieren und die Gewichte iterativ zu aktualisieren, um die Vorhersagegenauigkeit zu verbessern.

#### **Training des neuronalen Netzes**

Die Netze wurde mit einem Trainingsdatensatz trainiert, der aus ca. 75% der gesammelten Daten bestand. Die verbleibenden ca. 25% der Daten wurden zur Validierung und Testung des Modells verwendet. Es wurden standortinterne und standortübergreifende Modelle entwickelt (siehe Vorgehensweise).

Die Trainingsprozeduren der Netze wurden wie folgt durchgeführt:

#### ***Epochen***

Eine Epoche im Kontext des Trainings eines neuronalen Netzes bezeichnet einen vollständigen Durchgang durch den gesamten Trainingsdatensatz. Während einer Epoche wird jeder Datenpunkt einmal verwendet, um die Gewichte des Netzes zu aktualisieren. Mehrere Epochen sind oft notwendig, um das Modell zu trainieren und eine hohe Genauigkeit und Generalisierungsfähigkeit zu erreichen.

Die Netze wurden mit 1000 Epochen trainiert, was bedeutet, dass der gesamte Trainingsdatensatz 1000-mal durchlaufen wurde, um die Netzparameter zu optimieren und die Vorhersagegenauigkeit zu maximieren.

### **Batchgröße**

Eine Batchgröße bezeichnet die Anzahl der Trainingsbeispiele, die in einem Durchlauf (Batch) des neuronalen Netzes verarbeitet werden, bevor die Gewichte aktualisiert werden. In diesem Fall wurde die Batchgröße auf 4 gesetzt. Dies bedeutet, dass das neuronale Netz nach jedem Satz von 4 Trainingsbeispielen ein Update der Gewichte durchführt. Die hier angegebene Epochenanzahl sowie die Batchgröße beziehen sich auf den aktuellen Stand und könnten nach weiteren Tests und Optimierungen gegebenenfalls noch angepasst werden, um die Leistungsfähigkeit der Modelle weiter zu verbessern. Gleiches gilt für den Zeitraum der Mittelwertbildung, die Definition des Verlusts und den Optimierungsalgorithmus

### **Dokumentation**

Die Testergebnisse eines jeden neuronalen Netzes werden in einer CSV-Datei festgehalten. Pro Standort gibt es somit zwei Dateien, abhängig davon, ob Radon oder der Faktor der Radon-Quellstärke  $Q(R_n)$  vorhergesagt werden sollen. In diesen Dokumenten sind alle zur Vorhersage verwendeten Parameterwerte sowie der tatsächliche Radon- bzw. Faktorwert und der vorhergesagte Wert in Tabellenform eingetragen. Diese Einträge beziehen sich auf den Testdatensatz. Zusätzlich wird für jeden Datenpunkt die Differenz zwischen dem echten Wert und der Vorhersage sowie die prozentuale Abweichung berechnet und dokumentiert. In einer weiteren Datei werden alle durchschnittlichen prozentuale Abweichungen der verschiedenen Netze dokumentiert. Außerdem wird für jedes Netz die Beziehung zwischen den vorhergesagten sowie den echten Werten graphisch dargestellt.

Die durchschnittliche Abweichung kann als zu erwartende Abweichung für neue Datenpunkte des Standortes interpretiert werden. Die Ergebnisdokumentation soll außerdem durch eine approximierte Standardabweichung erweitert werden, sodass nicht nur Kenntnisse über den zu erwartenden Fehler bekannt sind, sondern auch über die Streuung um diesen herum. Dies ermöglicht eine umfassendere Bewertung der Modellgenauigkeit, indem sie sowohl den zentralen Tendenzfehler als auch die Varianz der Vorhersagen beleuchtet. Im Falle mehrerer dokumentierter Fehlerwerte, sind diese Netze mehrfach berechnet worden. Um keine Erkenntnisse zu verlieren, sind dabei alle Fehlerwerte notiert worden. Die letzte Zeile bezieht sich stets auf denjenigen Durchlauf, in dem auch die Grafik entwickelt worden ist.

### **Eingangsparameter und Zielgrößen (Features)**

Als Eingangsparameter für die Modellentwicklung wurden folgende Daten verwendet (jeweils 24h Mittelwerte):

- Außentemperatur in Grad Celsius
- Bodentemperatur in Grad Celsius
- Innentemperatur in Grad Celsius
- Temperaturdifferenz zwischen innen und außen in Kelvin
- Druckgradient in Pascal pro Stunde über einen Zeitraum von 5 Stunden
- Druckdifferenz in Pascal (nach DIN/TS 18117-2)

- Niederschlagsmenge in Millimetern (Summe über 96 Stunden)
- Windgeschwindigkeit in Metern pro Sekunde
- Lüftungsrate in 1/h
- Temperaturdifferenz Abweichung zum Mittelwert in Kelvin
- Druckdifferenz Abweichung zum Mittelwert in Pascal

Als Zielgrößen wurden folgende Daten verwendet:

- Radonkonzentration in der Raumluft in Bq/m<sup>3</sup>
- Faktor der Radonquellstärke zum Mittelwert  $Q(Rn)$

### Vorgehensweise

In einem ersten Modell (**KI-Modell 1**) wurden die Daten der Objekte separat betrachtet. Es wurden 75 % der Datensätze zum Training und 25 % der Datensätze zum Test verwendet (siehe Tabelle 6.12 bis 6.16). Als Zielgrößen wurden für die Prognosen die Radonkonzentration und der Faktor Quellstärke aus 25 Stunden-Mittelwerten und 14 Tages-Mittelwerte verwendet. Die Zuordnung von Trainings- und Test-Datensätzen erfolgte zufällig.

In einem zweiten Modell (**KI-Modell 2**) wurden die Objekte zusammengefasst. Es wurden alle Datensätze von 3 Standorten zum Training und alle Datensätze von dem verbleibenden Standort zum Test verwendet (3:1 Strategie). Hierbei wurden als Zielgrößen nur die normierten Größen der Faktoren der Rn-Quellstärken von 14 Tages-Mittelwerten betrachtet. Die Zuordnung von Trainings- und Test-Datensätzen erfolgte somit Blockweise und standortübergreifend.

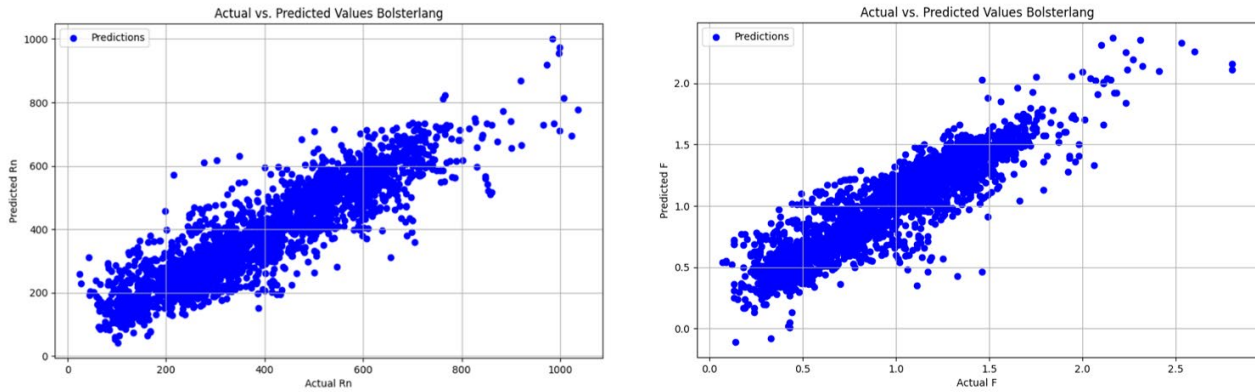
In einem erweiterten zweiten Modell (**KI-Modell 2.1**) wurden aus den Prognosen aus Modell 2 zusätzlich alle Datensätze mit negativen Temperaturdifferenzen ( $T_{\text{innen}} - T_{\text{ausen}}$ ) herausgenommen. In diesem Fall wurden die Fehlerberechnungen nur aus den Datensätzen abgeleitet, bei denen ein relevanter Radoneintritt über den thermischen Sog des Gebäudes über Unterdruck zu erwarten ist.

In einem dritten Modell (**KI-Modell 3**) wurden die Objekte zusammengefasst. Es wurden alle Datensätze von allen 4 Standorten zum Training und Test verwendet (4:0 Strategie). Es wurden 75 % der Datensätze zum Training und 25 % der Datensätze zum Test verwendet. Als Zielgrößen wurden für die Prognosen die Radonkonzentration und der Faktor Quellstärke aus 25 Stunden-Mittelwerten und 14 Tages-Mittelwerte verwendet. Die Zuordnung von Trainings- und Test-Datensätzen erfolgte zufällig.

In einem erweiterten dritten Modell (**KI-Modell 3.1**) wurden aus den Prognosen aus Modell 3 zusätzlich alle Datensätze mit negativen Temperaturdifferenzen ( $T_{\text{innen}} - T_{\text{ausen}}$ ) herausgenommen. In diesem Fall wurden die Fehlerberechnungen nur aus den Datensätzen abgeleitet, bei denen ein relevanter Radoneintritt über den thermischen Sog des Gebäudes über Unterdruck zu erwarten ist.

**Ergebnisse KI-Modell 1: Objekte separat (75:25)**

**Abb. 6.29: Übersicht berechnete (Predicted) und gemessene Werte (Actual) der Radonkonzentration (Rn) und Faktor Quellstärke (F) für den Standort Objekt 1 (25h-Mittelwerte)**



**Tabelle 6.12: Fehlerwerte der neuronalen Netze für den Standort Objekt 1 - Bolsterlang:**

Zielgröße	zu erwartende prozentuale Abweichung	Standardabweichung der prozentualen Abweichung
Radonkonzentration, 25h	14 %	39 %
Radonkonzentration, 14d	2,6 %	5,7 %
Faktor Q(Rn), 25h	17 %	43 %
Faktor Q(Rn), 14d	2,0 %	4,8 %

**Tabelle 6.13: Fehlerwerte der neuronalen Netze für den Standort Objekt 2 - Wittingen:**

Zielgröße	zu erwartende prozentuale Abweichung	Standardabweichung der prozentualen Abweichung
Radonkonzentration, 25h	24 %	90 %
Radonkonzentration, 14d	2,7 %	5,2 %
Faktor Q(Rn), 25h	24 %	161 %
Faktor Q(Rn), 14d	3,4 %	4,3 %

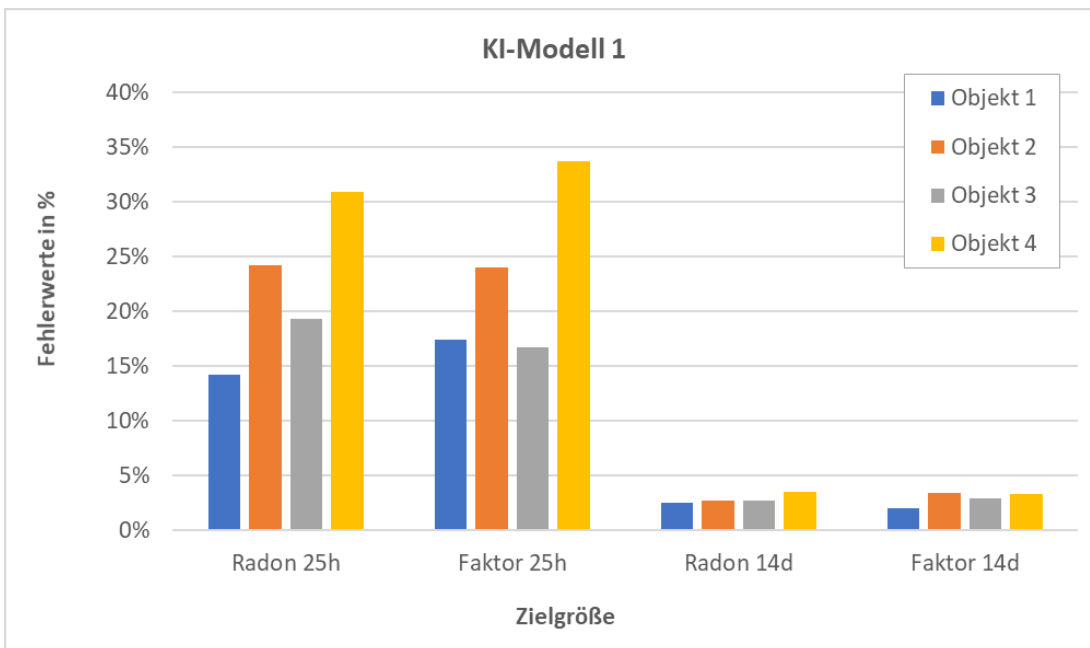
**Tabelle 6.14: Fehlerwerte der neuronalen Netze für den Standort Objekt 3 - Deckersberg:**

Zielgröße	zu erwartende prozentuale Abweichung	Standardabweichung der prozentualen Abweichung
Radonkonzentration, 25h	19 %	59 %
Radonkonzentration, 14d	2,7 %	4,8 %
Faktor Q(Rn), 25h	17 %	46 %
Faktor Q(Rn), 14d	2,9 %	6,7%

**Tabelle 6.15: Fehlerwerte der neuronalen Netze für den Standort Objekt 4 - Essen:**

Zielgröße	zu erwartende prozentuale Abweichung	Standardabweichung der prozentualen Abweichung
Radonkonzentration, 25h	31 %	84 %
Radonkonzentration, 14d	3,5 %	7,3 %
Faktor Q(Rn), 25h	34 %	86 %
Faktor Q(Rn), 14d	3,3 %	6,8 %

**Abb. 6.30: Fehlerwerte für die Zielgrößen Radonkonzentration (Rn) und Faktor Quellstärke Q(Rn) für das KI-Modell 1 (Objekte separat)**



Es zeigt sich für das KI-Modell 1 mit separater Betrachtung der Objekte (siehe Abbildungen 6.29 und 6.30) eine bereits Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten für die 25 Stunden Mittelwerte (Fehlerwerte 14 - 34 %) und sehr gute Übereinstimmungen für die 14 Tage Mittelwerte (Fehlerwerte 2 - 3,5 %).

Für eine standortübergreifende Prognose wurden weitere KI-Modelle (2, 2.1, 3 und 3.1) aus den Datensätzen generiert, um allgemeingültige Faktoren für die Radon-Eintrittsraten und zu erwartenden prozentualen Abweichungen aus den witterungsbedingten Einflussgrößen zu erhalten.

### Ergebnisse KI-Modell 2: Objekte zusammengefasst 3:1 Strategie

- Objekte 2, 3 und 4 als Trainingsdatensatz und Objekt 1 als Testdatensatz
- Objekte 1, 3 und 4 als Trainingsdatensatz und Objekt 2 als Testdatensatz
- Objekte 1, 2 und 4 als Trainingsdatensatz und Objekt 3 als Testdatensatz
- Objekte 1, 2 und 3 als Trainingsdatensatz und Objekt 4 als Testdatensatz

**Tabelle 6.16: Fehlerwerte der neuronalen Netze für Objekte zusammengefasst 3:1 Strategie, nur Faktor Quellstärke (14d Mittelwerte)**

Testdatensatz	zu erwartende prozentuale Abweichung	Standardabweichung der prozentualen Abweichung
a) Objekt 1	39 %	32 %
b) Objekt 2	40 %	29 %
c) Objekt 3	67 %	134 %
d) Objekt 4	115 %	204 %

Die Ergebnisse aus Modell 2 zeigen eindeutig, dass die Übereinstimmungen (prozentuale Abweichungen) bei der separaten 3:1 Betrachtung deutlich geringer sind, da jeweils ein Standort nicht für das Training verwendet wird (Tabelle 6.16). Die besten Übereinstimmungen wurden bei Objekt 1 und 2 mit im Mittel 39 % und 40 % prozentualer Abweichung beobachtet. Objekt 3 zeigt mit 67 % etwas höhere Fehlerwerte und für Objekt 4 liegen die mittleren Fehlerwerte am höchsten bei 115 %.

**Ergebnisse KI-Modell 2.1: Objekte zusammengefasst 3:1 Strategie (Filter Temperaturdifferenzen)**

**Tabelle 6.17: Fehlerwerte der neuronalen Netze für Objekte zusammengefasst 3:1 Strategie, nur Faktor Quellstärke (14d Mittelwerte) und Filterung negativer Temperaturdifferenzen ( $T_{innen}-T_{ausen}$ )**

Testdatensatz	zu erwartende prozentuale Abweichung	Standardabweichung der prozentualen Abweichung
a) Objekt 1	33 %	29 %
b) Objekt 2	42 %	22 %
c) Objekt 3	39 %	49 %
d) Objekt 4	129 %	96 %

Die Herausnahme der Datensätze mit negativen Temperaturdifferenzen ( $T_{innen}-T_{ausen}$ ) aus den Ergebnissen von Modell 2 (3:1 Strategie) zeigen keine eindeutige Verbesserung der Fehlerwerte (vgl. Tabelle 6.16 und Tabelle 6.17). Für die Objekte 1 und 3 liegen im Mittel geringere Fehlerwerte vor, bei Objekt 2 zeigt sich kaum eine Veränderung. Für Objekt 4 wird der durchschnittliche Fehlerwert größer.

### Ergebnisse KI-Modell 3: Objekte zusammengefasst 4:0 Strategie

**Tabelle 6.18: Fehlerwerte der neuronalen Netze für Objekte zusammengefasst 4:0 Strategie, nur Faktor Quellstärke (14d Mittelwerte)**

Testdatensatz	zu erwartende prozentuale Abweichung	Standardabweichung der prozentualen Abweichung
Objekte 1 bis 4 (jeweils 25%)	40 %	31 %

Die Ergebnisse aus Modell 3 zeigen erwartungsgemäß in Vergleich den gemittelten Einzelwerten in Modell 2 bessere Übereinstimmungen zwischen Prognose und gemessenem Radonwert. Die mittleren prozentualen Abweichungen liegen bei der 4:0 Strategie bei 40 %. Gegenüber den separat betrachteten Objekten aus Modell 1 zeigt sich für die Mittelwerte aus 14 Tagen jedoch ein zirka 10fach höherer durchschnittlicher Fehlerwert (Tabelle 6.18).

### Ergebnisse KI-Modell 3.1: Objekte zusammengefasst 4:0 Strategie (Filter Temperaturdifferenzen)

**Tabelle 6.19: Fehlerwerte der neuronalen Netze für Objekte zusammengefasst 4:0 Strategie, nur Faktor Quellstärke (14d Mittelwerte) und Filterung negativer Temperaturdifferenzen ( $T_{\text{innen}} - T_{\text{ausen}}$ )**

Testdatensatz	zu erwartende prozentuale Abweichung	Standardabweichung der prozentualen Abweichung
Objekte 1 bis 4 (jeweils 25%), nur gefilterte Daten mit Temperaturdifferenzen in-out > 0 K	38 %	29 %

Die Herausnahme der Datensätze mit negativen Temperaturdifferenzen ( $T_{\text{innen}} - T_{\text{ausen}}$ ) aus den Ergebnissen von Modell 3 (4:0 Strategie) zeigen eine geringfügige Verbesserung des Fehlerwertes von 40 % auf 38 % (vgl. Tabelle 6.18 und Tabelle 6.19).

Als weitere mögliche Verbesserung der Prognosequalität wurden für Modell 3.1 die Datensätze für niedrige Radonkonzentrationen schrittweise zusätzlich herausgefiltert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.20 dargestellt und liefern die Fehlerwerte für Modell 4 und Faktoren für die Quellstärke über 0,2, über 0,4, über 0,6 und über 1,0.

**Tabelle 6.20: Fehlerwerte der neuronalen Netze für Objekte zusammengefasst 4:0 Strategie, nur Faktor Quellstärke (14d Mittelwerte), gefiltert nach Temperaturdifferenzen ( $T_{\text{innen}} - T_{\text{ausen}}$ ) und ohne Datensätze mit niedrigen Faktoren der Quellstärke**

Betrachtete Datensätze	Anteil Datensätze in %	zu erwartende prozentuale Abweichung	Standardabweichung der prozentualen Abweichung
Faktor (QRn) > 0,2	94 %	38	28
Faktor (QRn) > 0,4	89 %	38	30
Faktor (QRn) > 0,6	77 %	36	28
Faktor (QRn) > 1,0	47 %	34	24

Die Herausnahme von Datensätzen mit den Faktoren für die Quellstärke über 0,2, über 0,4, über 0,6 und über 1,0 zeigt nur eine vergleichsweise geringere Verbesserung der Fehlerwerte. Wenn nur

Datensätze mit Radonwerten über dem Jahresmittel betrachtet werden, reduziert sich der durchschnittliche Fehlerwert für die Prognose nur minimal von 38 % auf 34 %.

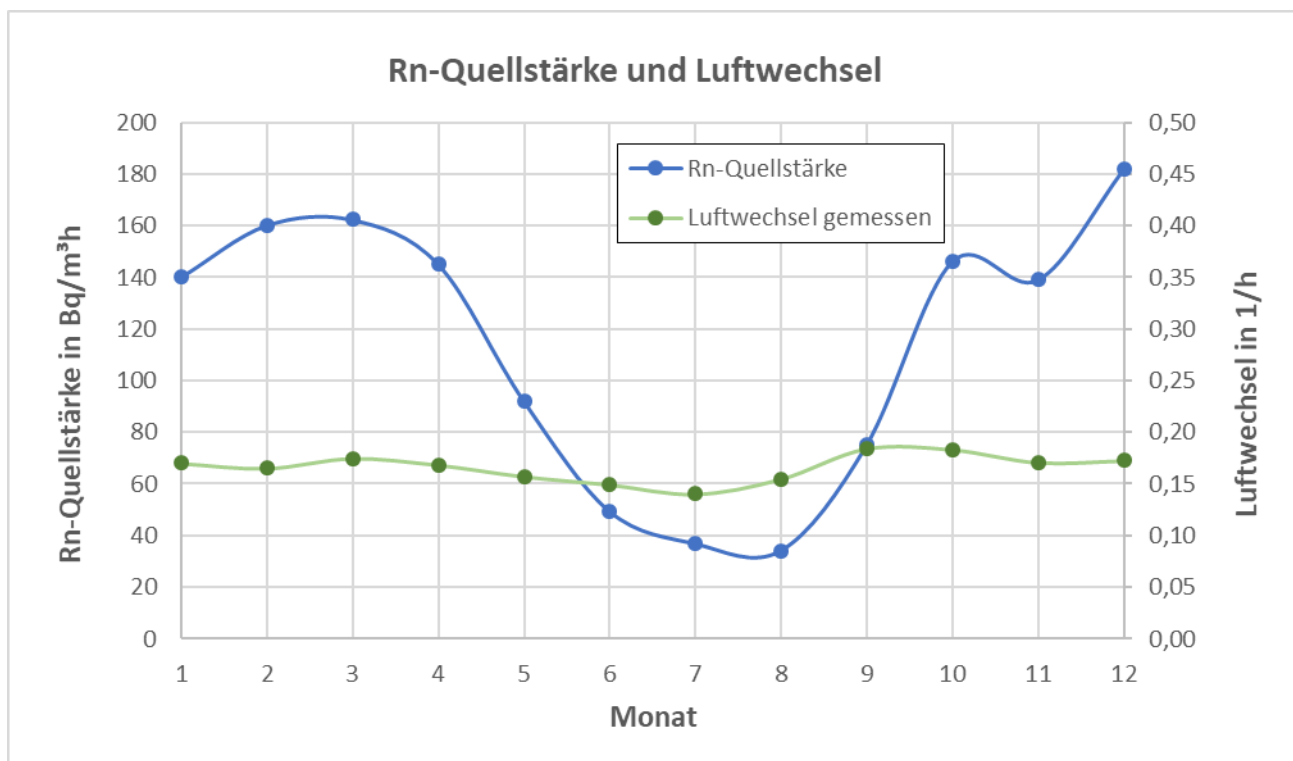
### Bewertung der Prognosemöglichkeiten der KI-Modellentwicklung mittels neuronaler Netze

In der Gesamtbetrachtung liefert die standortübergreifende Prognose des Faktors für die Radon-Quellstärke in Abhängigkeit der Witterungsparameter unter Nutzung der KI-Modellentwicklung mittels neuronaler Netze für gemessene Mittelwerte der Radonkonzentration über 14-Tage mittlere Fehlerwerte von zirka 30 % bis 40 % mit Standardabweichungen um 30 %. Unter der Voraussetzung gleichbleibender Luftwechselraten kann aus dem für das Untersuchungsintervall bestimmten Faktor der Quellstärke die zu erwartende mittlere Radonkonzentration (Jahresmittel) unter Berücksichtigung der abgeleiteten Fehlerbetrachtung standortübergreifend nur grob abgeschätzt werden.

### 6.12 Beschreibung eines typischen Jahresverlaufs von Radoneintrittsrates und Luftwechsel (alle Objekte)

Aus den Untersuchungsergebnissen aller Objekte wurden die mittleren Jahresverläufe von Radoneintrittsrates bzw. Quellstärke und Luftwechsel bestimmt und grafisch in Abbildung 6.31 dargestellt. Es zeigt sich ein typischer Jahresgang mit höheren Werten für die Quellstärken im Winter und niedrigeren Quellstärken im Sommer. Kleine Unregelmäßigkeiten im Jahresverlauf wurden durch den in der Aufzeichnungsphase vergleichsweise milden November (2022) und milden Jahreswechsel 22/23 zu erkennen, welche sich bei allen Objekten bemerkbar machen.

Abb. 6.31: Jahresverlauf der Rn-Quellstärke und des Luftwechsels, alle Objekte gemittelte Monatsmittelwerte



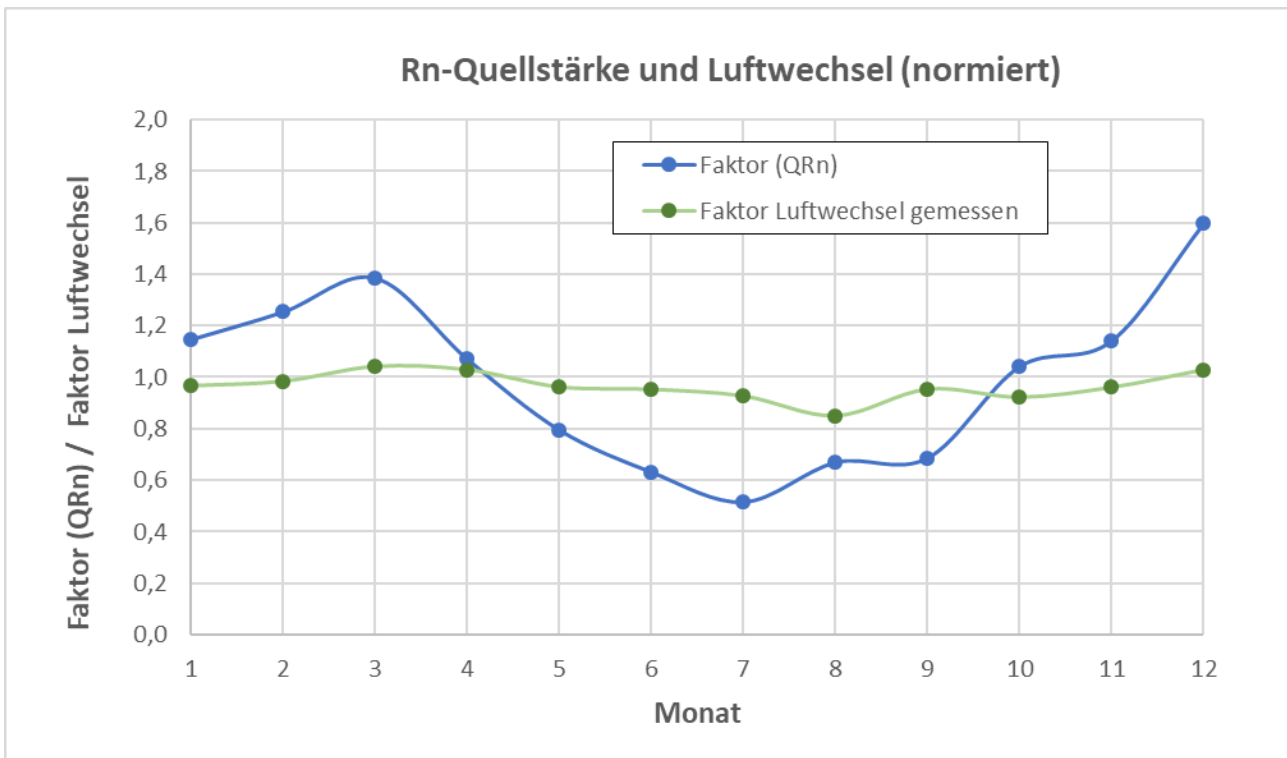
### Ergebnis Jahresverlauf Radoneintrittsrate und Luftwechsel

Der **Luftwechsel** variiert nicht signifikant über den Jahresverlauf. Als maßgebliche Größe kann der Infiltrationsluftwechsel als gebäudebedingter Beitrag (Undichtigkeiten in der Gebäudehülle zur Außenluft) angenommen werden. Für den zusätzlichen und meist geringeren nutzungsbedingten Beitrag (manuelle Fensterlüftung) kann aus den Untersuchungsergebnissen ein über das Jahr relativ konstanter Beitrag angenommen werden.

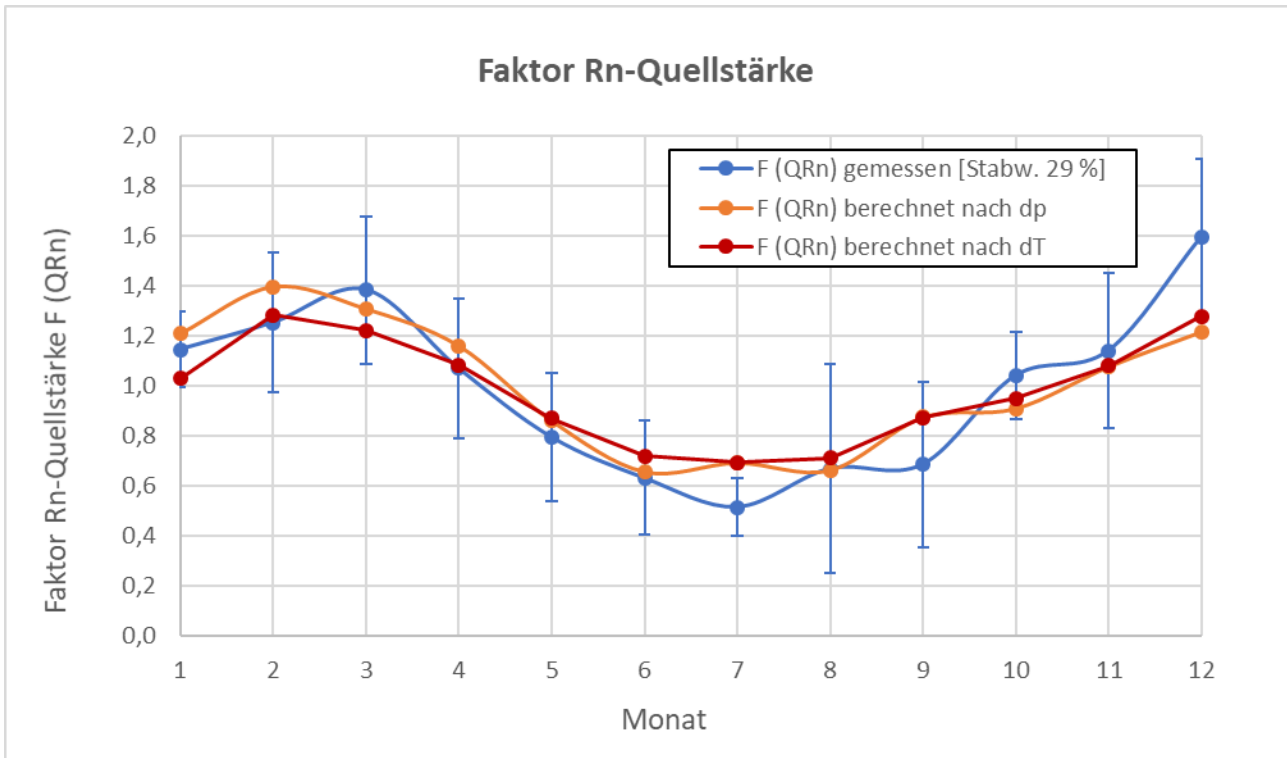
Die **Radoneintrittsrate** variiert je nach Temperatur- bzw. Druckdifferenz **deutlich** über den Jahresverlauf. In den Wintermonaten können bis zu 60 % höhere Quellstärken angenommen werden, in den Sommermonaten liegen bis 50 % niedrigere Quellstärken vor.

Die Darstellung in Abbildung 6.32 zeigt den Jahresverlauf der normierten Werte für die Rn-Quellstärke (Faktor Q(Rn)) und den Luftwechsel (Faktor Luftwechsel gemessen).

**Abb. 6.32: Jahresverlauf der Rn-Quellstärke und des Luftwechsels, alle Objekte gemittelte Monatsmittelwerte normiert**



**Abb. 6.33: Jahresverlauf der gemessenen und berechnete Werte des Faktors Rn-Quellstärke, alle Objekte gemessene und berechnete Monatsmittelwerte**



In Abbildung 6.33 sind die gemessenen Faktoren der Quellstärke über den Jahresverlauf aus den nach der Regressionsanalyse abgeleiteten Formeln (siehe Gleichung 9 Kapitel 6.9) für die nach den Temperatur- bzw. Druckdifferenzen berechneten Faktoren der Quellstärke dargestellt. Es zeigen sich für beide Einflussfaktoren gute Annäherungen der Monatsmittelwerte über den Jahresverlauf.

### 6.13 Schätzung der Jahresmittelwerte für die Radoneintrittsrate und den Luftwechsel

Die nachfolgende Tabelle 6.21 liefert beispielhaft die Schätzungen des Luftwechsels für zwei Lüftungsarten mit niedrigen und hohen Infiltrationsluftwechsel und dem jeweils zusätzlich wirksamen Anteil der manuellen Fensterlüftung durch die Nutzung. Für die manuelle Fensterlüftung werden drei Lüftungsvorgänge pro Tag mit jeweils komplettem einfachem Luftwechsel zu Grunde gelegt.

**Tabelle 6.21: Schätzung Luftwechsel im Jahresmittel (Beispiel, siehe auch Kapitel 6.5)**

	Lüftungsart A * Luftwechsel pro h	Lüftungsart B * Luftwechsel pro h
nur Infiltration (gemessen)	0,20	0,50
mit Fensterlüftung, geschätzt *	0,30	0,56

\* Mittelwerte über 24 h, bei Fensterlüftung 3 x pro Tag kompletter einfacher Luftwechsel

Tabelle 6.22 liefert beispielhaft die Schätzungen der Radon-Quellstärke und der Radonkonzentration im Jahresmittel. Aus den in einem 14-Tagesintervall gemessenen gemittelten Daten der Radonkonzentration, des Luftwechsels und der Witterungsparameter (Druckdifferenz) kann der Faktor für die Radon-Quellstärke in  $F_{Q(Rn)}$  nach der in Kapitel 6.9 angegebenen Regressionsformel (Gleichung 9)

berechnet werden und die zu erwartende Radon-Quellstärke  $Q(Rn)$  im Jahresmittel bestimmt werden (Gleichung 10). Aus dem für das Jahr geschätzten mittleren Luftwechsel kann die Radonkonzentration abgeleitet werden (Gleichung 11).

**Tabelle 6.22: Schätzung Radon-Quellstärke und Radonkonzentration im Jahresmittel (Beispiel)**

Parameter	Wert
Luftwechsel gemessen in 1/h *	0,20
Radonkonzentration in Bq/m <sup>3</sup> gemessen *	500
Radon-Quellstärke $Q(Rn)$ in Bq/m <sup>3</sup> h (aus Luftwechsel und Radonkonzentration)	100
Druckdifferenz dP nach DIN/TS 18117-2 im Messintervall in Pa berechnet (aus Temperaturdifferenz und Windstärke)	2,0
Druckdifferenz dP nach DIN/TS 18117-2 im Jahresmittel in Pa berechnet (aus Temperaturdifferenz und Windstärke)	2,5
Differenz der Druckdifferenz zum Jahresmittel in Pa berechnet	-0,5
Faktor Radon-Quellstärke $F_{Q(Rn)}$ nach Regressionsformel berechnet	0,87
Radon-Quellstärke $Q(Rn)$ (Jahresmittelwert) in Bq/m <sup>3</sup> h geschätzt aus Faktor $F_{Q(Rn)}$	115
Luftwechsel (Jahresmittelwert), Lüftungsart A geschätzt in 1/h	0,30
<b>Radonkonzentration im Jahresmittel geschätzt</b>	<b>383</b>
Radonkonzentration im Jahresmittel geschätzt (90. Perz.)	555 (+ 45%)

\* Messintervall 14 Tage (ohne Sommerphase,  $dT(in-out) > 1$ )

### **6.14 Anwendung der Erkenntnisse auf ein bestehendes Modell bzw. Entwicklung eines eigenen Modells und Praktikabilität der Vorgehensweise**

Im Mittelpunkt der Betrachtungen steht die Frage, nach welcher Methode auf der Basis der Daten von kürzeren Messzeiten als ein ganzes Jahr eine belastbare Abschätzung des Jahresmittelwertes für die Radon-Aktivitätskonzentration in der Innenraumluft und somit auch der Radoneintrittsrates und Beurteilung der Radondichtheit eines Gebäudes möglich ist. Aus den in der Literatur beschriebenen Verfahren nahmen folgende Methoden unter Berücksichtigung von Witterungsparametern (Temperatur, Druckdifferenzen) einen besonders vorrangigen Stellenwert ein.

- Methode 1 „generalisierte Radon-Temperatur-Funktion“, bestehendes Modell
- Methode 2 „erweiterte Blower-Door-Methode“ ( $Rn_{50}$ -Test), bestehendes Modell
- Methode 3 „Differenzdruckmodell“ mit Formel für Faktor  $Q(Rn)$ , eigenes Modell
- Methode 4 „Temperaturmodell“ mit Formel für Faktor  $Q(Rn)$ , eigenes Modell
- Methode 5 „KI-Modell“ mit Formel für Faktor  $Q(Rn)$ , eigenes Modell

## Methode 1

In Arbeiten von Meyer und Lehmann wird eine Vorgehensweise für die Ermittlung und Quantifizierung der Unsicherheiten bezüglich der „Schätzung des Jahresmittelwertes der Radonkonzentration mittels „**generalisierter Radon-Temperatur-Funktion**“ vorgestellt [8, 33, 37, 38]. Es wird eine Methode dargestellt, mit der Jahresmittelwerte unter Einbeziehung meteorologischer Parameter mit verringerten Unsicherheiten geschätzt sowie die langfristigen, unmittelbar und mittelbar witterungsbedingte Variationen der Jahresmittelwerte untersucht werden können.

Auf der Grundlage einer ausreichenden Zahl einjähriger Messreihen wird die Ableitung von Schwellenwerten dargestellt, die eine sichere Beurteilung der Messwerte mehrmonatiger Messungen zulassen. Es wird eine Methode vorgestellt, mit der aus mehrmonatigen Zeitreihen unter Einbeziehung meteorologischer Parameter Werte mit verringerten Unsicherheiten geschätzt werden können. Mit dieser Methode abgeleitete Schwellenwerte zur sicheren Beurteilung mehrmonatiger Messungen weisen eine geringere Variationsbreite auf als die aus den Mittelwerten dieser Zeitreihen gewonnenen Schwellenwerte.

Vereinfacht dargestellt ist für die Abschätzung mittels „generalisierter Radon-Temperatur-Funktion“ zunächst eine 4-wöchige zeitauflösende Messreihe an einem Standort mit Stundenwerten in Bezug auf Radon in der Innenraumluft und der Außentemperatur erforderlich. In dieser Zeit sollte ein ausreichend breiter Bereich der Außentemperatur erfasst werden. In einem nächsten Schritt wird über eine lineare Regression das Bestimmtheitsmaß der Trendfunktion bestimmt und ggf. eine weitere bzw. erneute Messreihe gestartet. Anschließend erfolgt die Berechnung der Schätzwerte anhand der Temperaturverläufe von Testreferenzjahren an diesem Standort.

Vorteil dieser Methode ist die Reduzierung der Eingangsparameter auf die Witterungsdaten der Außentemperaturen und der Einbezug von Daten nur eines Standortes für eine individuelle standortbezogene Abschätzung. Nachteil dieser Methode ist eine ggf. längere Messdauer über mehrere Monate. Mit den Datensätzen der Objekte 1 bis 4 wurden nur wenige 4-wöchige Messintervalle gefunden, welche für die weitere Berechnung anhand der geforderten Güte des Bestimmtheitsmaßes geeignet waren.

## Methode 2

Schon vor über 20 Jahren wurde mit dem Differenzdruckverfahren als „**erweiterte Blower-Door-Methode**“ im Rahmen der Radondiagnostik experimentiert und es wurden recht gute Möglichkeiten zur Abschätzung der Radonkonzentrationen im Jahresmittel aufgezeigt. Erfahrungen im Zusammenhang mit Radon im Innenraum wurden von zahlreichen Arbeitsgruppen dokumentiert und publiziert [7, 9, 17, 21, 32, 36, 42, 73].

Diese Methode ist für Gebäude mit unzureichender Abdichtung gegenüber den erdberührenden Bauteilen besonders praktikabel, da bei sehr großen Luftwechselraten infolge der gewählten hohen Unterdrücke die Quellstärken für das Haus mit vergleichsweise geringem Zeitaufwand ermittelt werden können. Da dies jedoch eher für den Altbaubestand zutrifft, bietet diese Methode Möglichkeiten für eine qualifizierte Auswahl und Planung geeigneter Sanierungsmaßnahmen.

Die erweiterte Radon-Blower-Door-Prüfung ( $Rn_{50}$ -Test) ist ein hilfreiches diagnostisches Werkzeug zur Bestimmung der konvektiven Radon-Eintrittsrates in ein Gebäude und zur Lokalisierung der Radon-Eintrittspfade beim sogenannten „Radon-Sniffing“. Messungen bei 50 Pascal Unterdruck bieten einen deutlichen zeitlichen Vorteil gegenüber einem geringeren Differenzdruck. Die Messzeit liegt

ja nach Gebäudedichtheit bei wenigen Stunden. Die Unterschiede zwischen Sommer und Winter sind vergleichsweise gering und die Übereinstimmungen zwischen den Radonkonzentrationen im Unterdruck - dem  $Rn_{50}$ -Wert als Schätzwert - und dem Jahresmittelwert sind recht gut. Aus der bei 50 Pascal Unterdruck gemessenen Radon-Eintrittsrate kann die zu erwartende Radonkonzentration für eine definierte mittlere Druckdifferenz und einen mittleren Luftwechsel im Jahresmittel rechnerisch abgeschätzt werden. Die praktische Umsetzung erfordert einen sicheren Umgang mit den Grundlagen des Blower-Door-Testverfahrens sowie Messungen mit empfindlichen zeitauflösenden Radonmessgeräten.

Vorteile sind in der sehr zeitnahen Abschätzung der Radonsituation - in der Regel innerhalb eines Tages -, der Luftdichtheit (Luftwechsel), der Radoneintrittsrate und die Lokalisierung sowie Quantifizierung von Radon-Eintrittsstellen über Radon-Sniffing während der Unterdrucksituation zu sehen. Der Nachteil dieser Methode liegt in dem erhöhten messtechnischen Aufwand vor Ort (Sachverständigengutachten). Leider ist die Methode nicht in die standardisierte Gebäude-Dichtheitsprüfung mittels Blower-Door im Sinne der energetischen Betrachtungen integrierbar.

### **Methode 3**

Die Schätzung der Radonsituation nach „**Differenzdruckmodell**“ mit Formel für Faktor  $Q(Rn)$  basiert auf den in diesem Projekt hergeleiteten und dargestellten Kennwerten und Gleichungen, die aus den Zeitreihen der Radonkonzentrationen und Witterungsparametern der untersuchten 4 Objekte stammen. Durch ein Normierungsverfahren können Abschätzungen für ein unbekanntes Objekt durch Messreihen ab einer Mindest-Messzeit von 14-Tagen vorgenommen werden. Benötigt werden zeitauflösende Messungen der **Radonkonzentration**, die Bestimmung des **Luftwechsels** (z.B. über zeitauflösende Messungen mit  $CO_2$ -Sensor oder Einmalmessungen mit Tracergas) sowie die **Witterungsdaten** der Innen- und Außentemperatur wie der Windstärke (Daten DWD, Jahresmittelwerte oder ggf. langjähriges Mittel). Es folgt die Berechnung des Faktors der konvektiv wirksamen Radon-Eintrittsrate (Quellstärke) für das Messintervall, die Berechnung der Quellstärke im Jahresmittel und die Abschätzung der Radonkonzentration im Jahresmittel über die Bestimmung des mittleren Luftwechsels.

Vorteile sind in der zeitnahen Abschätzung der Radonsituation nach 2 bis 4 Wochen Messzeit mit relativ geringem messtechnischem Aufwand zu sehen. Messgeräte können zugeschickt, Messungen nach Anleitung auch von Laien durchgeführt und Klimadaten aus Internetportalen (DWD) entnommen werden. Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass sich Messintervalle aus der warmen Sommerzeit (ca. 10% eines Jahres) nicht für eine belastbare Abschätzung eignen. Weiterhin wurden bisher nur Kennwerte von den Daten von 4 Objekten des Gebäudetyps Ein- bis Zweifamilienhaus mit 2 bis 3 Wohnetagen abgeleitet.

### **Methode 4**

Grundsätzlich können Schätzungen auch vereinfacht über das „**Temperaturmodell**“ mit Formel für Faktor  $Q(Rn)$  nach dem zu Methode 3 verwendeten Regressionsmodells vorgenommen werden. Hierbei sind nur die Temperaturdifferenzen (Innen und Außenluft) zu betrachten und es entfällt der Anteil der Windstärke und die weitere Ableitung des Druckdifferenz nach DIN/TS 18117-2. Es gelten die Vorgaben und Einschränkungen (Radon,  $CO_2$ , Luftwechsel, Messintervall) wie für Methode 3 beschrieben. Über die Korrelationsanalyse zeigt sich nur ein geringer Einfluss der Windstärke auf die

langfristig wirksame Radon-Eintrittsrate. Starke Windböen und Windereignisse sind in der Regel nur kurzfristig wirksam und spielen in besonders exponierten Lagen (z.B. Bergkuppe) eine für die Radonsituation relevante Rolle.

### **Methode 5**

Die Nutzung eines „**KI-Modells**“ mittels neuronaler Netze unter Berücksichtigung aller Witterungsparameter (inkl. Niederschlag, Druck, Druckgradient ...) führt für die untersuchten Objekte nicht zu einer gegenüber dem einfachen Regressionsmodell verbesserten Abschätzung der Radonsituation. Gute Übereinstimmungen mit niedrigen Fehlerwerten (Messungen gegenüber Prognose) zeigen sich nur für die Prognosen innerhalb der Datensätze eines Standorts. Standortübergreifende Prognosen lassen sich nach den vorliegenden Datensätzen nicht gut für Prognosen an fremden Standorten nutzen.

### **Fazit**

Die Erkenntnisse aus diesem Vorhaben lassen den Schluss zu, dass eine belastbare Abschätzung des Jahresmittelwertes über das Differenzdruckmodell (Methode 3) und ggf. über das Temperaturmodell (Methode 4) auf Basis kürzerer Messzeiten als ein ganzes Jahr unter Berücksichtigung von Witterungsparametern und Nutzerverhalten möglich ist.

Eine noch bessere Abschätzung des Jahresmittelwertes wäre über eine Kombination von Methode 2 mit Methode 3 bzw. Methode 2 mit Methode 4 denkbar. In der Praxis wäre eine Aufzeichnung der Radon- und Klimadaten (Innen/Außen) über 2 bis 4 Wochen vor oder nach der Vor-Ort-Messungen mit der erweiterten Blower-Door Methode durchzuführen. Durch die Vor-Ort-Messungen können auch weitere wichtige Informationen zur Lokalisierung und Intensität des Radon-Eintritts über Radon-Sniffing und die Gebäudedichtheit (Infiltrations-Luftwechsel) erhalten werden. Die Abschätzungen gelten für die in diesem Vorhaben untersuchten Gebäudetypen (Ein- bis Zweifamilienhaus, 2 bis 3 Wohnetagen) und den konvektiven Radoneintritt. In Gebieten mit hohen Radonkonzentrationen in der Bodenluft (über 100 kBq/m<sup>3</sup>) sollte zudem auch der großflächige Radoneintritt über Diffusion berücksichtigt werden (siehe auch DIN/TS 18117-2).

### 6.15 Bedeutung der Erkenntnisse für die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Senkung der Radonkonzentration

Das nachfolgende Unterkapitel behandelt die Bewertung der Bedeutung von Radoneintrittsrates und Luftwechsel für die Radonkonzentration des untersuchten Raumes auch im Hinblick auf die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Senkung der Radonkonzentration. Im Mittelpunkt stehen hierbei die Bewertungen der Möglichkeiten und Grenzen Lüftungstechnischer Lösungen.

Die Radoneintrittsrates kann durch eine gezielte **Drucksteuerung** (Reduzierung der Druckdifferenz) gesenkt werden und je nach Ausgangssituation kann die Radonkonzentration mit **Erhöhung des Infiltrations-Luftwechsels** (technische Dauerlüftung) gesenkt werden, hierbei darf die Radon-Eintrittsrates nicht durch Erhöhung der Druckdifferenz (Unterdruck) erhöht werden. Anhand der Daten der untersuchten Objekte werden nachfolgend die erreichbaren Zielwerte nach einem 2-stufigen Maßnahmenkonzeptes vorgestellt. Die Berechnungen der Tabellen 6.23. bis 6.26 gelten für Jahresmittelwerte aller Parameter.

#### Beispiel Maßnahmen in Objekt 1

Maßnahme 1: Erhöhung des Luftwechsels von 0,19 /h auf 0,5 /h

Maßnahme 2: Erhöhung des Luftwechsels von 0,19 /h auf 0,5 /h und Reduzierung der Druckdifferenz um 2 Pascal

**Tabelle 6.23: Beispiel Objekt 1**

	Ausgangssituation	Situation nach Maßnahme 1	Situation nach Maßnahme 2
<b>Radonkonzentration (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>435</b>	<b>165</b>	<b>82</b>
Luftwechsel (1/h)	0,19	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>
Quellstärke (Bq/m <sup>3</sup> h)	82,4	82,4	<b>41,2</b>
Druckdifferenz (-Pa)	2,9	2,9	<b>0,9</b>

Für das Beispiel Objekt 1 kann die Radonkonzentration im Jahresmittel von 435 Bq/m<sup>3</sup> durch eine Erhöhung des durchschnittlich wirksamen Luftwechsels von 0,19/h auf 0,5/h mit einer ventilatorgestützten Lüftungsmaßnahme ohne Änderungen der Druckverhältnisse und Radon-Eintrittsrates auf 165 Bq/m<sup>3</sup> gesenkt werden. Durch eine zusätzliche Reduzierung der Druckdifferenz um 2 Pascal von 2,9 auf 0,9 im Jahresmittel kann über die Einstellungen der ventilatorgestützten Lüftung die Radon-Eintrittsrates von 82,4 Bq/m<sup>3</sup>h auf 41,2 Bq/m<sup>3</sup>h gesenkt werden, was bei einem Luftwechsel von 0,5/h dann auch eine weitere Reduzierung der Radonkonzentration im Raum auf 82 Bq/m<sup>3</sup> zur Folge hat (Tabelle 6.23).

Für das Beispiel Objekt 2 kann die Radonkonzentration im Jahresmittel von 346 Bq/m<sup>3</sup> durch eine Erhöhung des durchschnittlich wirksamen Luftwechsels von 0,09/h auf 0,3/h mit einer ventilatorgestützten Lüftungsmaßnahme ohne Änderungen der Druckverhältnisse und Radon-Eintrittsrates auf 104 Bq/m<sup>3</sup> gesenkt werden. Durch eine zusätzliche Reduzierung der Druckdifferenz um 2 Pascal von 3,1 auf 1,1 im Jahresmittel kann über die Einstellungen der ventilatorgestützten Lüftung die Radon-Eintrittsrates von 31,6 Bq/m<sup>3</sup>h auf 15,8 Bq/m<sup>3</sup>h gesenkt werden, was bei einem Luftwechsel von 0,3/h dann auch eine weitere Reduzierung der Radonkonzentration im Raum auf 52 Bq/m<sup>3</sup> zur Folge hat (Tabelle 6.24).

### Beispiel Maßnahmen in Objekt 2

Maßnahme 1: Erhöhung des Luftwechsels von 0,09 /h auf 0,3 /h

Maßnahme 2: Erhöhung des Luftwechsels von 0,09 /h auf 0,3 /h und  
Reduzierung der Druckdifferenz um 2 Pascal

**Tabelle 6.24: Beispiel Objekt 2**

	Ausgangssituation	Situation nach Maßnahme 1	Situation nach Maßnahme 2
<b>Radonkonzentration (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>346</b>	<b>104</b>	<b>52</b>
Luftwechsel (1/h)	0,09	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>
Quellstärke (Bq/m <sup>3</sup> h)	31,6	31,6	<b>15,8</b>
Druckdifferenz (-Pa)	3,1	3,1	<b>1,1</b>

Die Vorgaben der Strahlenschutz-Gesetzgebung (Referenzwert 300 Bq/m<sup>3</sup>) und sogar der höheren Zielwerte (UBA-, BfS-, WHO- und BVS-Empfehlungen mit 100 Bq/m<sup>3</sup>) wären für die Objekte 1 und 2 allein durch Lüftungstechnische Maßnahmen (Luftwechsel und Druckdifferenzen) erfüllt. Weitere Reduzierungserfolge können ggf. durch gezielte punktuelle Abdichtungsmaßnahmen von detektierten Eintrittsstellen erreicht werden. Diese sind jedoch nicht zwingend nötig und können nur nach einer gezielten Diagnostik vor Ort (Radon-Sniffing) realisiert werden.

### Beispiel Maßnahmen in Objekt 3

Maßnahme 1: Erhöhung des Luftwechsels von 0,36 /h auf 0,5 /h

Maßnahme 2: Erhöhung des Luftwechsels von 0,36 /h auf 0,5 /h und  
Reduzierung der Druckdifferenz um 2 Pascal

**Tabelle 6.25: Beispiel Objekt 3**

	Ausgangssituation	Situation nach Maßnahme 1	Situation nach Maßnahme 2
<b>Radonkonzentration (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>881</b>	<b>634</b>	<b>317</b>
Luftwechsel (1/h)	0,36	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>
Quellstärke (Bq/m <sup>3</sup> h)	314	314	<b>157</b>
Druckdifferenz (-Pa)	2,1	2,1	<b>0,1</b>

Für das Beispiel Objekt 3 kann die Radonkonzentration im Jahresmittel von 881 Bq/m<sup>3</sup> durch eine Erhöhung des bereits recht hohen durchschnittlich wirksamen Luftwechsels von 0,36/h auf 0,5/h mit einer ventilatorgestützten Lüftungsmaßnahme ohne Änderungen der Druckverhältnisse und Radon-Eintrittsrates auf 634 Bq/m<sup>3</sup> gesenkt werden. Durch eine zusätzliche Reduzierung der Druckdifferenz um 2 Pascal von 2,1 auf 0,1 im Jahresmittel kann über die Einstellungen der ventilatorgestützten Lüftung die Radon-Eintrittsrates von 314 Bq/m<sup>3</sup>h auf 157 Bq/m<sup>3</sup>h gesenkt werden, was bei einem Luftwechsel von 0,5/h eine weitere Reduzierung der Radonkonzentration im Raum auf 317 Bq/m<sup>3</sup> zur Folge hätte. Hier trägt die zusätzliche Maßnahme der Drucksteuerung deutlich mehr zur

Radon-Reduzierung in der Raumluft bei als die - hier im Sinne der Machbarkeit stark eingeschränkte - Erhöhung des Luftwechsels (Tabelle 6.25).

Die Vorgaben der Strahlenschutz-Gesetzgebung (Referenzwert 300 Bq/m<sup>3</sup>) wären allein durch Lüftungstechnische Maßnahmen (Luftwechsel und Druckdifferenzen) **nicht** erfüllt. Insbesondere für die höheren Zielwerte (UBA-, BfS-, WHO- und BVS-Empfehlungen mit 100 Bq/m<sup>3</sup>) wären zusätzliche Maßnahmen (Abdichtung/Absaugung) erforderlich.

#### Beispiel Maßnahmen in Objekt 4

Maßnahme 1: Erhöhung des Luftwechsels von 0,06 /h auf 0,3 /h

Maßnahme 2: Erhöhung des Luftwechsels von 0,06 /h auf 0,3 /h und Reduzierung der Druckdifferenz um 2 Pascal

**Tabelle 6.26: Beispiel Objekt 4**

	Ausgangssituation	Situation nach Maßnahme 1	Situation nach Maßnahme 2
<b>Radonkonzentration (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>462</b>	<b>92</b>	<b>46</b>
Luftwechsel (1/h)	0,06	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>
Quellstärke (Bq/m <sup>3</sup> h)	27	27	<b>13,5</b>
Druckdifferenz (-Pa)	2,8	2,8	<b>0,8</b>

Für das Beispiel Objekt 4 kann die Radonkonzentration im Jahresmittel von 462 Bq/m<sup>3</sup> durch eine Erhöhung des in der Ausgangssituation recht niedrigen durchschnittlich wirksamen Luftwechsels von 0,06/h auf 0,3/h mit einer ventilatorgestützten Lüftungsmaßnahme ohne Änderungen der Druckverhältnisse und Radon-Eintrittsrates auf 92 Bq/m<sup>3</sup> gesenkt werden (Tabelle 6.26). Durch eine zusätzliche Reduzierung der Druckdifferenz um 2 Pascal von 2,8 auf 0,8 im Jahresmittel kann über die Einstellungen der ventilatorgestützten Lüftung die Radon-Eintrittsrates von 27 Bq/m<sup>3</sup>h auf 13,5 Bq/m<sup>3</sup>h gesenkt werden, was bei einem Luftwechsel von 0,3/h eine weitere Reduzierung der Radonkonzentration im Raum auf 46 Bq/m<sup>3</sup> zur Folge hätte. Hier trägt die Maßnahme der Erhöhung des Luftwechsels maßgeblich zur Radon-Reduzierung bei. Die Vorgaben der Strahlenschutz-Gesetzgebung (Referenzwert 300 Bq/m<sup>3</sup>) und sogar der höheren Zielwerte (UBA-, BfS-, WHO- und BVS-Empfehlungen mit 100 Bq/m<sup>3</sup>) wären allein schon durch Lüftungstechnische Maßnahmen (Erhöhung des Luftwechsels) erfüllt.

Die Beispiele anhand der in den Objekten ermittelten Daten und Gegebenheiten zeigen sehr deutlich die Möglichkeiten und Grenzen der Lüftungstechnischen Maßnahmen zur Reduzierung der Radonkonzentration im Innenraum auf. Besonders wichtig erscheint in diesem Zusammenhang eine möglichst präzise Diagnostik und Bestandsaufnahme hinsichtlich des im Objekt vorhandenen Luftwechsels und der Radon-Eintrittsrates, um möglichst wirtschaftliche und effiziente Maßnahmen zur Optimierung des Luftwechsels, der Druckverhältnisse und/oder ggf. zusätzlich nötige bauliche Maßnahmen (Abdichtung, Absaugung) planen und umsetzen zu können.

Die Praxismessungen zeigen, dass bei einer Reduzierung des mittleren Unterdrucks von 2 Pascal an der Schnittstelle Innenraum/erdberührende Gebäudehülle schon eine Halbierung der

Radoneintrittsrate zu erwarten ist und der Nutzen bzw. die Effizienz einer Lüftungstechnischen Anlage somit in Bezug auf den Radonschutz maßgeblich verbessert werden kann.

Da die Abschätzungen der Sanierungserfolge auf der Basis von Berechnungen erfolgen, in die einige Näherungen (Schätzungen anhand von Kurzzeitmessungen, Korrekturfaktoren etc.) eingeflossen sind, sollten nach der Durchführung von Maßnahmen in jedem Fall geeignete Plausibilitätskontrollen (Messungen des Luftwechsels und der Druckdifferenzen; Radonmessungen über ca. 14 Tage) und abschließend Langzeitmessungen der Radonkonzentrationen zur Kontrolle durchgeführt werden.

Als Hilfe für die praktische Umsetzung von Radonschutzmaßnahmen stehen Normen und Merkblätter wie die DIN/TS 18117 [63], das WTA Merkblatt „Radon im Gebäudebestand“ [66] und Fachbücher mit Praxisbeispielen zur Verfügung [73, 75].

## 7. Zusammenfassung

In dem Vorhaben wurden vier Objekten an sehr unterschiedlichen Standorten in Deutschland mit geeigneten Objekträumen untersucht, um die für die Auswertung nötigen Untersuchungsparameter Radonkonzentrationen, Luftwechsel und Witterungsdaten zu erhalten. Es wurden zunächst intensive Erstmessungen und Bestandsaufnahmen unter Zuhilfenahme der erweiterten Blower-Door-Methode durchgeführt, um die Radonkonzentrationen, -Eintrittsraten und Luftwechselraten unter provozierten Bedingungen (aktiv erhöhte Druckdifferenzen) festzustellen. Zudem konnte der Radoneintritt über Radon-Sniffing lokalisiert werden und über Bodenluftmessungen die Radonkonzentration in der Bodenluft und das Radonpotenzial am Standort bestimmt werden. An den Eintrittsstellen konnten über das Radon-Sniffing Radonkonzentrationen im Bereich von 10 bis über 100 % der vor Ort gemessenen Bodenluftkonzentrationen nachgewiesen werden.

Aus den zeitauflösenden Messdaten und Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes wurden für alle Objekte aus 2- bis 4-wöchigen Zeitabschnitten saisonale und für die Jahreszeiten repräsentative Datensätze generiert und mit den Ergebnissen der Langzeitauswertungen verglichen. Es zeigen sich für alle Untersuchungsparameter jeweils gute Übereinstimmungen aus den Mittelwerten der saisonalen Messintervalle mit den Jahresmittelwerten.

Für die Bestimmungen des Luftwechsels wurde der Infiltrationsluftwechsel und der durch die Nutzung zusätzlich wirksame Luftwechsel separat betrachtet. Die Luftwechselbestimmungen wurden nach der Konzentrations-Abklingmethode über das durch die Nutzer in den Raum abgegebene CO<sub>2</sub> (nach der Nutzung der Räume) und zusätzlich auch über Radon (nur bei sehr niedrigen CO<sub>2</sub>-Werten oder während der Nutzung) als Tracergase vorgenommen. Der mittlere Luftwechsel lag in den Objekträumen im für Bestandsgebäude niedrigen bis üblichen Wertebereich von unter 0,1/h bis 0,4/h. Der Anteil des durch die Nutzung über manuelle Fensterlüftung zusätzlich im **zeitlichen Mittel** generierten Luftwechsels lag in allen Objekten bei unter 0,1/h und stellt in der Gesamtbetrachtung eine untergeordnete Rolle. Aus den Daten des Luftwechsels und der Radonkonzentrationen konnte die jeweilige Radoneintrittsrate je Objekt und Zeitintervall berechnet werden. Für eine standortübergreifende Analyse über Regressionsmodelle und KI-Modelle wurden die Radon-Eintrittsraten normiert und den Witterungsparametern gegenübergestellt.

Die Radoneintrittsraten werden stark von **Witterungsparametern** beeinflusst. Hierbei spielen die Temperatur(differenz)en und zum Teil die Windstärken eine signifikante Rolle. Treibende Kraft ist die dadurch resultierende Druckdifferenz, welche nach DIN/TS 18117-2 in guter Näherung

berechnet werden kann. Andere Witterungsparameter wie Druck, Druckgradient, Windrichtung und Niederschlag wirken sich nicht signifikant auf die Radoneintrittsrate aus. Der Wertebereich der Druckdifferenzen ist für den untersuchten Gebäudetyp (Ein- bis Zweifamilienhaus, 2 bis 3 Wohnetagen) eng gesteckt und liegt im Bereich von 0 bis ca. 10 Pascal). Ab zirka 2 bis 3 Pascal Unterdruck werden die relevanten Radon-Eintrittsstellen aktiviert und sind durch das Radon-Sniffing deutlich erkennbar.

Das Nutzerverhalten spielt in Bezug auf die Höhe der **Radoneintrittsrate** eine eher untergeordnete Rolle. Effekte können ggf. indirekt bei Veränderungen der Druckverhältnisse durch Heizen und Lüften entstehen.

Die **Radondichtheit** von Gebäuden kann über Radonmessungen in der Raumluft im Zusammenhang mit den wirksamen Witterungsparametern (Temperaturdifferenz und Windstärke) und der Bestimmung des wirksamen Luftwechsels in guter Näherung beurteilt werden. Mit der aus einem Messintervall von zwei bis vier Wochen messtechnisch abgeleiteten Radoneintrittsrate und den gemessenen Witterungsparametern kann die zu erwartende Radoneintrittsrate im Jahresmittel abgeschätzt werden. Diese Abschätzung erfolgt nach einer aus den Messdaten der Objekte 1 bis 4 abgeleiteten Regressionsformel unter Zuhilfenahme ortsüblicher Jahresmittelwerte der Witterungsparameter.

Die Nutzung eines KI-Modells mittels neuronaler Netze unter Berücksichtigung aller Witterungsparameter führt für die untersuchten Objekte nicht zu einer gegenüber dem einfachen Regressionsmodell verbesserten Abschätzung der Radonsituation.

Aus der nach dem Regressionsmodell bestimmten Radoneintrittsrate kann unter Berücksichtigung des messtechnisch abgeleiteten oder geplanten mittleren Luftwechsels auch der Jahresmittelwert für die **Radonkonzentration in der Raumluft** abgeschätzt werden. Die Güte der Abschätzung hängt im Wesentlichen von der Jahreszeit bzw. den wirksamen Temperaturdifferenzen während der Messung und der Dauer der Messung ab. In der Praxis sollte die Messdauer von 14 Tagen nicht unterschritten werden. Die wirksame Temperaturdifferenz während der Messung sollte im Mittel nicht unter 0 K liegen. Für die untersuchten Objekte können unter dieser Voraussetzung noch 92% der Zeit im Jahr für eine Abschätzung genutzt werden.

Eine noch bessere Ausgangssituation für eine Bewertung der Radonsituation (Radonkonzentration, Radoneintrittsrate, Radondichtheit) - bei kürzeren Messzeiten als ein ganzes Jahr - wäre über eine Kombination von Vor-Ort-Messungen mittels erweiterter Blower-Door Methode mit Radon-Sniffing und einer vor- oder nachgeschalteten Kurzzeitmessung über zwei bis vier Wochen mit Aufzeichnung der Radon- und Klimadaten möglich. Die Vor-Ort-Messungen liefern zudem auch weitere wichtige Informationen zur Lokalisierung und Intensität des Radon-Eintritts über Radon-Sniffing und die Gebäudedichtheit (Infiltrationsluftwechsel).

Die Abschätzungen gelten für die in diesem Vorhaben untersuchten Gebäudetypen (Ein- bis Zweifamilienhaus, 2 bis 3 Wohnetagen) und den konvektiven Radoneintritt. In Gebieten mit hohen Radonkonzentrationen (über 100 kBq/m<sup>3</sup>) sollte zudem auch der großflächige Radoneintritt über Diffusion berücksichtigt werden (siehe auch DIN/TS 18117-2).

Die Erkenntnisse aus dem Vorhaben können auch im Hinblick auf die Wirksamkeit von **Maßnahmen zur Senkung der Radonkonzentration** genutzt werden. In vielen Fällen reichen in der Praxis bereits Lüftungstechnische Maßnahmen aus, um Zielwerte zu erreichen oder den Referenzwert zu unterschreiten. Es konnte gezeigt werden, dass bei bekanntem Luftwechsel und bekannter Radoneintrittsrate ein zu erreichender Zielwert für die Radonkonzentration im Innenraum rechnerisch gut

abgeschätzt werden kann. Hierbei spielen sowohl der Luftwechsel als auch die wirksame Druckdifferenz eine Rolle. Bei vergleichsweise niedrigem Luftwechsel kann durch die Erhöhung des Luftwechsels über eine z.B. ventilatorgestützte Lüftung eine Reduzierung der Radonkonzentrationen um den Faktor 2 bis 3 erreicht werden. Unter Berücksichtigung der Druckverhältnisse können durch Einstellungen der Volumenströme bei ventilatorgestützten Lösungen dem natürlichen thermischen Sog wirksam entgegengewirkt werden. Die Praxismessungen zeigen, dass bei einer Reduzierung des mittleren Unterdrucks von 2 Pascal an der Schnittstelle Innenraum/erdberührende Gebäudehülle schon eine Halbierung der Radoneintrittsrates zu erwarten ist und der Nutzen bzw. die Effizienz einer Lüftungstechnischen Anlage somit in Bezug auf den Radonschutz maßgeblich verbessert werden kann. Die Berechnungen verdeutlichen ebenso am Beispiel von Objekt 3, dass allein durch eine Erhöhung des Luftwechsels bei gleichzeitiger Erniedrigung der Druckdifferenz (Reduzierung Unterdruck) der angestrebte Zielwert nicht immer erreicht werden kann. In solchen Fällen sind weiterführende Untersuchungen erforderlich und es kommen bauliche Maßnahmen wie z.B. Abdichtungen und/oder Absaugungen bzw. Unterdruck unter der Gebäudehülle in Frage.

Zur weiteren Verifikation der aus dem Vorhaben abgeleiteten Erkenntnisse wären z.B. weitere Objekte zu betrachten, bei denen bereits Jahresmittelwerte der Radonkonzentrationen im Innenraum über z.B. integrative Messungen (Kernspurexposimeter) vorliegen und in der unveränderten Situation nur noch die 2- bis 4-wöchigen Aufzeichnungen (Stundenwerte) der Radon- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Klimasituation (Innen/Außen) zur Bestimmung des Faktors der Radon-Quellstärke und des Luftwechsels durchgeführt werden müssen.

## 8. Literaturübersicht

- [1] Baumert, R., Flesch, K., Hermann E & Jobski, S. (2010): Abschlussbericht zum Vorhaben St.Sch.4534. Erarbeitung fachlicher Grundlagen für die Entwicklung zeit- und kosteneffektiver Verfahren zur Bestimmung von Strahlenexpositionen durch Radon in Wohnungen (unveröffentlicht). Dresden: IAF – Radioökologie GmbH - St.Sch. 3607S04537.
- [2] Buermeyer, J., Gundlach, M., Grund, A. L., Grimm, V., Spizyn, A., & Breckow, J. (2016): Use of linear regression models to determine influence factors on the concentration levels of radon in occupied houses. In *International Journal of Modern Physics: Conference Series* (Vol. 44, p. 1660223). World Scientific Publishing Company.
- [3] Grund, A. L. (2016): „Untersuchung des Einflusses baulicher Energiesparmaßnahmen (energetische Sanierung, Passivbauweise) auf die Radonkonzentration in Innenräumen“ Abschlussbericht Projekt BfS 3611S10016 Los 2, 192 S., Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz (IMPS); Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen (THM): Gießen, 31. März 2015, zitiert am 24. Februar 2016.
- [4] Kemski, J. (2012): Untersuchung des Einflusses baulicher Energiesparmaßnahmen (energetische Sanierung, Passivbauweise) auf die Radonkonzentration in Innenräumen (Los 1)-Vorhaben 3611S10015 (Anlage).
- [5] Meyer, W. (2015): *Hohe Radonkonzentrationen - Besonders betroffene Gebäudetypen 9*. Sächsischer Radontag 11. Tagung Radonsicheres Bauen 8. September 2015, 17.
- [6] SMUL (2008): „Radon in öffentlichen Gebäuden – Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse aus dem Abschlußbericht “Auftraggeber Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (SMUL)““. <https://www.strahlenschutz.sachsen.de/studie-radon-in-offentlichen-gebauten-10159.html>
- [7] Schulz, H., Hermann, E., & Baumert, R. (2019). „Qualifizierung der Luftdichtheitsmessung an Gebäuden zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude“ – BfS-Vorhaben 3616S12241.
- [8] Meyer, W. (2021): „Schätzung des Jahresmittelwertes der Radonkonzentration mittels generalisierter Radon-Temperatur-Funktion“ Publikation in Vorbereitung; siehe auch 2 Beiträge von Meyer in der StrahlenschutzPRAXIS 3/2021 Lit. [37] und [38]
- [9] Haumann, Th. (2017): „Radonmessungen und Blower Door - Fallbeispiele aus Bestandsgebäuden“, 2. Radonfachtag des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V. am 4. Mai 2017 im Bauzentrum München
- [10] Al-Ahmady, K. (1996): CHARACTERIZATION OF WIND-INDUCED PRESSURE DIFFERENTIALS, 1996 International Radon Symposium IIP - 3.1
- [11] Al-Ahmady, Kaiss & Hintenlang, David. (1994): ASSESSMENT OF TEMPERATURE-DRIVEN PRESSURE DIFFERENCES WITH REGARD TO RADON ENTRY AND INDOOR RADON CONCENTRATION, 1994 International Radon Symposium 111 - 6.8
- [12] Andersen, Claus & Sjøgaard-Hansen, J. & Majborn, B. (1992): Radon Entry into a Simple Test Structure. Radiation Protection Dosimetry. 45. 10.1093/rpd/45.1-4.407.

- [13] Aquilina, N.J., Fenech, S. (2019): The Influence of Meteorological Parameters on Indoor and Outdoor Radon Concentrations: A Preliminary Case Study. *J Environ Pollut Control* 2(1): 107
- [14] Bakaeva, N & Kalaydo, A. (2021): Modelling the source and mechanism of radon entry into the building. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 864. 012013. 10.1088/1755-1315/864/1/012013.
- [15] Brabec, M. and Jílek, K. (2007): "State-space dynamic model for estimation of radon entry rate, based on Kalman filtering." *Journal of environmental radioactivity* 98.3 (2007): 285-297.
- [16] Cavallo, A. & Gadsby, K. & Reddy, Tracy. (1996): Comparison of natural and forced ventilation for radon mitigation in houses. *Environment International*. 22. 1073-1078. 10.1016/S0160-4120(96)00221-8.
- [17] Collignan, B., Powaga, E. (2014): Procedure for the characterization of radon potential in existing dwellings and to assess the annual average indoor radon concentration, *Journal of Environmental Radioactivity*, Bd. 137, S. 64–70, DOI 10.1016/j.jenvrad.2014.06.024.
- [18] Collignan, B., Powaga, E. (2019): Impact of ventilation systems and energy savings in a building on the mechanisms governing the indoor radon activity concentration, *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 196, 2019, Pages 268-273.
- [19] Collignan, B., Lorkowski, C., Améon, R. (2012): Development of a methodology to characterize radon entry in dwellings, *Building and Environment*, Bd. 57, S. 176–183, DOI 10.1016/j.buildenv.2012.05.002, 2012.
- [20] Froňka, A., and Jílek, K. (2014): "Radon entry rate analyses using in situ tracer gas method application." *Radiation protection dosimetry* 160.1-3: 143-148.
- [21] Froňka, A., Moučka, L. (2015): Blower Door Method in Radon Diagnostic. Proceedings 4th European conference on protection against radon at home and at work. *Siehe auch Froňka, A., Moučka, L.: Blower door method and measurement technology in radon diagnosis, International Congress Series, Bd. 1276, S. 377–378, DOI 10.1016/j.ics.2004.11.140, 2005.* sowie Froňka, Ales & Moučka, Ladislav & Cechak, Tomas. (2008): Application of the advanced radon diagnosis methods in the indoor building environment. *Radiation protection dosimetry*. 130. 72-5. 10.1093/rpd/ncn102.
- [22] Froňka, A., et al. (2011): "Significance of independent radon entry rate and air exchange rate assessment for the purpose of radon mitigation effectiveness proper evaluation: case studies." *Radiation protection dosimetry* 145.2-3 (2011): 133-137.
- [23] Gadgil, A. J., Models of Radon Entry (1992): A Review, December 1992, *Radiation Protection Dosimetry* 45(1), Lawrence Berkeley National Laboratory, Permalink: <http://escholarship.org/uc/item/93v2b4cv>
- [24] Garbesi, Karina & Robinson, A. & Sextro, R. & Nazaroff, W. (1999): RADON ENTRY INTO HOUSES. *Health Physics*. 77. 183-191. 10.1097/00004032-199908000-00008.
- [25] Ippolito, Rosaria & Remetti, Romolo. (2019): RADON ENTRY MODELS INTO BUILDINGS VERSUS ENVIRONMENTAL PARAMETERS, BUILDING SHAPE AND TYPES OF FOUNDATION. 309-316. 10.2495/AIR190301.

- [26] Jingshu, Wang & Liu, Yuyu & Xiaohua, Yao & Jianfeng, Meng & Yongyi, Zhang & Xiaohe, Wang. (1995): Relationship between Indoor Radon Concentrations and Air Exchange Rate. *Radioisotopes*. 44. 401. 10.3769/radioisotopes.44.6\_401.
- [27] Jiranek, M. (2019): APPLICABILITY OF VENTILATION SYSTEMS FOR REDUCING THE INDOOR RADON CONCENTRATION, ERA ROOMS 2019 meeting Berlin, 30.10.2019
- [28] Keskkikuru, Timo & Kokotti, H & Lammi, S & Kalliokoski, P. (2001): How does wind affect the radon entry into seven detached houses. *Science of The Total Environment - SCI TOTAL ENVIR*. 272. 291-291.
- [29] Kohl, T., Medici, F., Rybach, L. (1994): Numerical simulation of radon transport from subsurface to buildings, *Journal of Applied Geophysics*, Bd. 31, 1-4, S. 145–152, DOI 10.1016/0926-9851(94)90053-1, 1994.
- [30] Kokotti H., Kalliokoski P., Jantunen M., (1992): Dependency of radon entry on pressure difference, *Atmospheric Environment*. Part A. General Topics, Volume 26, Issue 12, 1992, Pages 2247-2250.
- [31] Korhonen, P. (1995): The Effect of Ventilation & Pressure Differences on Concentrations of Radon at Workplace implementing the Results of Ventilation Research 16th AIVC Conference, Palm Springs, USA 19-22 September, 1995
- [32] Kuske, T. (2018): Verfahren zur Bestimmung der Radonquellstärke in Gebäuden, Radonfachgespräch 26. - 27. April 2018, Berlin.
- [33] Lehmann, R., Meyer, W. (2006): Konzept zur Abschätzung der Radon-Langzeitexposition in Aufenthaltsbereichen. Ettenhuber, E.; Giessing, R.; Beier, E.; Bayer, A. (Hrsg): Fortschritte im Strahlenschutz: Strahlenschutz-Aspekte bei natürlicher Radioaktivität. 38. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, 2006.
- [34] Löbner, W., Schulz, H. (2005): Wie und warum gelangt Radon in ein Haus? 1. Tagung Radonsicheres Bauen, HTW Dresden, 28.09.2005.
- [35] Löbner, W. (2006): Luftaustausch in Gebäuden – Bestimmung der Luftwechselrate in Räumen, 2. Tagung Radonsicheres Bauen, Dresden, 27.09.2006.
- [36] Maringer, F. J., Akis, C., Kaineder, H., Kindl, P., Kralik, C., Lettner, H., Ringer, W., Stadtmann, H., Winkler, R. (1998): Ein robustes und schnelles Verfahren zur Abschätzung der langzeitlich mittleren Radonkonzentration in einem Gebäude (erweiterte Blower-Door-Methode), *RADIOAKTIVITÄT IN MENSCH UND UMWELT*, S. 435–440: Lindau, 28. 09. - 02.10.1998.
- [37] Meyer, W. (2021): Schätzung des Jahresmittelwertes der Radon-Konzentration aus mehrmonatigen Zeitreihen, *StrahlenschutzPRAXIS 3/2021* S. 78-83.
- [38] Meyer, W. (2021): Schätzung des Jahresmittelwertes der Radon-Konzentration mittels generalisierter Radon-Temperatur-Funktion, *StrahlenschutzPRAXIS 3/2021* S. 84-91.
- [39] Miles, Jonathan & Howarth, C & Hunter, N. (2012): Seasonal variation of radon concentrations in UK homes. *Journal of radiological protection: official journal of the Society for Radiological Protection*. 32. 275-87.

- [40] Neugebauer, T., Hingmann, H., Buermeyer, J., Grimm, V., Breckow, J. (2015): Radonquellstärke von Gebäuden und Betrachtung ihrer Einflussgrößen, Jahrestagung 2015 Strahlen - Schutz - Gesundheit, S. 49–54, Jahrestagung 2015: Baden bei Wien, 5.-9.10.2015. *siehe auch Neugebauer, T., et al. "Method for the determination of the radon entry rate inside buildings." Radiation protection for humans and environment. 50 years competence in the professional association. Annual meeting 2016; Strahlenschutz fuer Mensch und Umwelt. 50 Jahre Kompetenz im Fachverband. Jahrestagung 2016; Heringsdorf (Germany); 25-30 Sep 2016; ISSN 1013-4506; Worldcat; Available from TIB Hannover*
- [41] Porstendoerfer, J., G. Butterweck, and A. Reineking (1993): "Influence of meteorological parameters on the radon concentration in indoor air." *Environmental radioactivity, radioecology, radiation effects. Vol. 1. Proceedings. 1993. 1993; p. 125-130; Verl. TUeV Rheinland; Koeln (Germany); 25. annual meeting of Fachverband fuer Strahlenschutz e.V. (FS): Environmental radioactivity, radioecology, radiation effects; 25. Jahrestagung des Fachverbandes fuer Strahlenschutz e.V. (FS): Umweltradioaktivitaet, Radiooekologie, Strahlenwirkungen; Binz auf Ruegen (Germany); 28-30 Sep 1993 Siehe auch Porstendörfer, J., Butterweck, G., Reineking (1994), A.: Daily Variation of the radon concentration indoors and outdoors and the influence of meteorological parameters. Health Phys. 67(3):283-287, 1994.*
- [42] Ringer, W.: Determination of the Radon Potential of a Building by a Controlled Depressurization Technique (2001), Ph.D. thesis, Institute of Technical Physics, Faculty of Science, Technical University of Graz, Austria, March 2001.
- [43] Syuryavin, Ahmad & Park, Seong & Nirwono, Muttaqin Margo & Lee, Sang. (2020): Indoor radon and thoron from building materials: Analysis of humidity, air exchange rate, and dose assessment. *Nuclear Engineering and Technology. 52. 10.1016/j.net.2020.03.013.*
- [44] Thomas, J. (1995): "Attempt to determine radon entry rate and air exchange rate variable in time from the time course of indoor radon concentration." (1995). Conference: 19. radiation hygiene days (RHD) Jasna, Jasna Pod Chopkom (Slovakia), 20-23 Nov 1995; Other Information: PBD: 1995; Related Information: Is Part Of 19th Radiation Hygiene Days. Conference Proceedings; PB: 208 p
- [45] Vasilyev, A., Zhukovsky, M. (2010): Measurements of Radon Entry Parameters in the Buildings, IRPA 2010, P10.73.
- [46] Vasilyev, A., Zhukovsky, M. (2013): Determination of mechanisms and parameters which affect radon entry into a room, *Journal of Environmental Radioactivity, Volume 124, 2013, Pages 185-190.*
- [47] Wang, Fan & Ward, Ian (2000): The Development of a Radon Entry Model for a House with a Cellar. *Building and Environment - BLDG ENVIRON. 35. 615-631. 10.1016/S0360-1323(99)00052-9.*
- [48] Yadeta, C. (2016): "Radon sources in indoors: A review paper", *International Journal of Current Research, 8, (10), 40441-40444.*
- [49] Salthammer, T. (2018): Formaldehyde sources, formaldehyde concentrations and air exchange rates in European housings. *Building and Environment. 150. 10.1016/j.buildenv.2018.12.042.*

- [50] Grün, L. (2021): Innenraumluftverunreinigungen - Schadstoff- oder Lüftungsproblematik, 28. *WaBoLu-Innenraumtage*, 10.05.-12.05.2021 (online)
- [51] AGÖF (2004), Ergebnisse des 7. Fachkongresses der Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) am 04. und 05. März 2004 in München ISBN 3-930576-05-8, Kapitel 4 Luftwechseluntersuchungen.
- [52] Künzel, H. (Herausgeber), Wohnungslüftung und Raumklima: Grundlagen, Ausführungshinweise, Rechtsfragen; Fraunhofer IRB Verlag; 2. überarbeitete und erweiterte Edition (31. Juli 2009). 362 Seiten. Zahlreiche Fachbeiträge.
- [53] Umweltbundesamt (2019): „Qualitätssicherung der Bestimmung der Luftwechselrate in Innenräumen – ein Methodenvergleich Abschlussbericht“, UBA Texte 46/19, Forschungskennzahl 3716622080 UBA-FB 002795, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/qualitaetssicherung-der-bestimmung-der>
- [54] Weithaas, T.: Bestimmung des natürlichen Luftwechsels im Altbaubestand anhand von Blower-Door-Messungen, Korrelation zwischen dem mittels Blower-Door gemessenen Luftwechsel bei 50 Pa n50 und dem mittels Tracergas-Messungen ermittelten „natürlichen“ Luftwechsel, Diplomarbeit an der TH Freiberg, [www.anbus.de](http://www.anbus.de)
- [55] Miller, James & Newell, Ty. (2011): Comparison of Blower Door and Tracer Gas Testing Methods for Determination of Air Infiltration Rates Through Building Envelopes at Normal Operating Conditions. ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability, ES 2011. 10.1115/ES2011-54373.
- [56] Sherman, M. (1990): Tracer Gas Techniques for Measuring Ventilation in a Single Zone. *Building and Environment*. 25. 365-374. 10.1016/0360-1323(90)90010-O.
- [57] Hodgson, A.T., Garbesi, K, Sextro R.G. & Daisey J.M. (1992): Soil-Gas Contamination and Entry of Volatile Organic Compounds into a House Near a Landfill, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 42:3, 277-283.
- [58] Johnson, P.C., Ettinger, R.A., (1991): Heuristic model for predicting the intrusion rate of contaminant vapors into buildings. *Environ. Sci. Technol.* 1991 (25), 1445e1452.
- [59] Garbesi, K. (1988): Experiments and modeling of the soil-gas transport of volatile organic compounds into a residential basement. Report no. LBL-25519. Lawrence Berkeley Laboratory, USA
- [60] Münzenberg, U., Thumulla, J., (2005): Anwendungsmöglichkeiten von Blower-Door-Untersuchungen; 10. BlowerDoor-Symposium des e.u.[z] 17. Juni 2005 in Hannover-Laatzten
- [61] DIN (EN) ISO 11665-Reihe - Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt - Luft: Radon-222 (beuth-verlag)
- [62] VDB-Richtlinien (2018): Band 2 - B I 8 - Untersuchungen auf Radon), [www.baubiologie.net](http://www.baubiologie.net)
- [63] DIN/TS 18117; „Bauliche und Lüftungstechnische Maßnahmen zum Radonschutz“ – Teil 1 2021 (Teil 2 im Entwurf 03/2024); beuth-verlag
- [64] SSK (2020): "Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten" Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission SSK, Band 47, BMU 2002

- [65] Fachverband für Strahlenschutz (2000): Übersicht über die Messung von Radon und Radonfolgeprodukten, Loseblattsammlung FS-94-75 Arbeitskreis AKURA (derzeit AKNAT), 2000
- [66] WTA-Merkblatt: „Radon im Gebäudebestand“, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA) e.V. (in Bearbeitung)
- [67] Bundesverband öffentlich bestellter und vereidigter sowie qualifizierter Sachverständiger e. V. (BVS), Standpunkt Radon in Gebäuden, 02-2017
- [68] DIN EN ISO 12569: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden und Werkstoffen - Bestimmung des spezifischen Luftvolumenstroms in Gebäuden - Indikatorgasverfahren (ISO 12569:2017); beuth-verlag
- [69] DIN EN ISO 9972: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Differenzdruckverfahren (ISO 9972:2015); beuth-verlag
- [70] NFPA 2001 (2012): Standard on Clean Agent Fire Extinguishing Systems, 2012 Edition (Appendix C Enclosure Integrity Procedure). National Fire Protection Association (NFPA), ISBN: 978-145590128-9
- [71] Kemski & Partner (2012), „Erarbeitung fachlicher Grundlagen zur Beurteilung der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messmethoden zur Bestimmung der Radonbodenluftkonzentration“ - Vorhaben 3609S10003, BfS-RESFOR-63/12-Bd.1 urn:nbn:de:0221-201203237824
- [72] Bossew und Hoffmann (2018), „Die Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland und die Ableitung eines Schwellenwertes zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten“ BfS-SW-24/18 urn:nbn:de:0221-2017122814454
- [73] Haumann, Th. (2024); Radon im Neubau und Bestand, Grundlagen - Prävention - Sanierung; Rudolf Müller Verlag, Köln, 1. Auflage 2024
- [74] Heinz, E. (2021); Wohnungslüftung - frei und ventilatorgestützt - Anforderungen, Grundlagen, Maßnahmen, Normenanwendung, 4. Auflage, Beuth-Verlag 2021
- [75] Klingelhöfer, G. und Leicht K. (2023); Radon und Radonschutz im Bauwesen, Der Bausachverständige - Edition, Reguvis, Fraunhofer IRB Verlag, 1. Auflage 2023

## Danksagungen

Die Autoren bedanken sich bei den Eigentümern der Objekte, die uns ihre Räume für Messzwecke zur Verfügung gestellt haben, und deren Hilfestellungen. Die Autoren bedanken sich zudem für die Hilfestellungen bei der Auswertung der Daten mittels neuronaler Netze (KI-Modell) in Kapitel 6.11 bei Dr. Philipp Dreiss und Frau Vianne Hartmann.