

"Qualifizierung der Luftdichtheitsmessung an Gebäuden zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude"

Auftraggeber: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)

Projektname: Endbericht

Projektnummer: BfS AG-R-08313/3616S12241

Auftragnehmer: IAF-Radioökologie GmbH
Wilhelm-Rönsch-Str. 9
01454 Radeberg

Autoren: Hartmut Schulz, Eiko Hermann, René Baumert

Radeberg, den 11.6.2018



Dr. rer. nat. habil. Hartmut Schulz
Geschäftsführer



Wilhelm-Rönsch-Str. 9
01454 Radeberg
Tel. +49 (0) 3528 48730-0
Fax +49 (0) 3528 48730-22
E-Mail info@iaf-dresden.de

Geschäftsführer:
Dr. rer. nat. habil. Hartmut Schulz
Dr. rer. nat. Christian Kunze
Dr. rer. nat. Holger Hummrich
Handelsregister: HRB 9185
Amtsgericht Dresden

Bankverbindung:
HypoVereinsbank Dresden
IBAN: DE92 8502 0086 5360 1794
SWIFT (BIC): HYVEDEMM496

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---------|---|-----|
| 1 | Veranlassung und Aufgabenstellung | 7 |
| 2 | Literaturrecherche und Prämissen zur Konkretisierung des Forschungsumfangs | 10 |
| 2.1 | Ergebnisse der Literaturrecherche | 10 |
| 2.2 | Konkretisierung des Forschungsbedarfs | 12 |
| 2.3 | Zur Luftwechselrate..... | 15 |
| 2.4 | Zur Definition der Radondichtheit eines Hauses..... | 17 |
| 3 | Zur zeitlichen Radonkonzentrationsentwicklung | 20 |
| 3.1 | 1-Raum-Modell | 20 |
| 3.2 | Effekt der Absaugung (Modelluntersuchung) | 25 |
| 3.2.1 | Vorbemerkung | 25 |
| 3.2.2 | Szenario (1)..... | 28 |
| 3.2.3 | Szenario (2)..... | 31 |
| 3.3 | Zusammenfassung und Schlussfolgerungen..... | 35 |
| 4 | Ergebnisse eines BDT: Objekt 1 (Haus mit mechanischer Lüftungsanlage)..... | 39 |
| 4.1 | Beschreibung des Hauses | 39 |
| 4.2 | Zur Radonsituation des Hauses | 43 |
| 4.3 | Ergebnisse der BDT Unterdruckmessungen | 53 |
| 4.3.1 | Beschreibung der einzelnen Aktionen im Rahmen der BD Messungen..... | 53 |
| 4.3.2 | Auswertung der 1. BDT Messung (BD1, Aktion 4) | 56 |
| 4.3.3 | Auswertung der 2. BDT Messung (BD2, Aktion 7) | 60 |
| 4.3.4 | 3. BDT sowie Modellierung der Radonkonzentrationsentwicklung bei weiteren Aktionen | 62 |
| 4.3.4.1 | Aktion 8 | 62 |
| 4.3.4.2 | 3. BDT (Aktion 9)..... | 63 |
| 4.3.4.3 | Normale Nutzungsbedingungen (Aktion 10) | 64 |
| 4.4 | Fazit der BD Messungen im Objekt 1 | 65 |
| 5 | Ergebnisse eines BDT: Objekt 2 (Messung im Souterrain) | 70 |
| 5.1 | Zum Hausaufbau und Randbedingungen für den BDT | 70 |
| 5.2 | Radonkonzentrationsentwicklung im Souterrain..... | 72 |
| 5.3 | BD Messungen im Souterrain des Hauses..... | 76 |
| 5.3.1 | Vorbemerkung zu den Messungen | 76 |
| 5.3.2 | Ergebnisse der Differenzdruckmessungen für einzelne Räume | 78 |
| 5.3.3 | Messung der Radonkonzentration im Absaugstrom des BDT | 79 |
| 5.4 | Fazit der BDT Messungen im Objekt 2..... | 84 |
| 6 | Ergebnisse eines BDT: Objekt 3..... | 86 |
| 6.1 | Zum Hausaufbau und Randbedingungen für den BDT | 86 |
| 6.2 | Untersuchungsergebnisse bezüglich Luftdichtheit des Gebäudes..... | 90 |
| 6.3 | Radonkonzentrationsentwicklung im Haus..... | 90 |
| 6.4 | Ergebnisse des BDT | 93 |
| 6.5 | Fazit der BDT Messungen im Objekt 3..... | 97 |
| 7 | Ergebnisse eines BDT: Objekt 4 | 99 |
| 7.1 | Beschreibung des Hauses | 99 |
| 7.2 | Ergebnisse der Unterdruckmessungen | 100 |
| 8 | Ergebnisse eines BDT: Objekt 5..... | 104 |
| 8.1 | Beschreibung der Radonsituation | 104 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 8.2 | Ergebnisse zur Bestimmung des Radonquellterms | 105 |
| 8.2.1 | Vorbemerkung zur Untersuchungsmethode..... | 105 |
| 8.2.2 | Bestimmung der Quellstärke mit der Anstiegsmethode..... | 106 |
| 8.2.2.1 | Heizungskeller..... | 106 |
| 8.2.2.2 | Wohnzimmer und Schlafzimmer..... | 107 |
| 8.2.3 | Bestimmung der Quellstärke im Heizungsraum mit dem Unterdruckverfahren..... | 108 |
| 8.3 | Fazit der BDT Messungen im Objekt 5..... | 110 |
| 9 | Ergebnisse eines BDT: Objekt 6..... | 112 |
| 9.1 | Beschreibung des Hauses | 112 |
| 9.2 | Zur Radonsituation des Hauses | 113 |
| 9.3 | Ziel der Untersuchung und Ergebnisse | 113 |
| 9.4 | Fazit der BDT Messungen im Objekt 6..... | 117 |
| 10 | Vorschläge zur Überprüfung der Radondichtheit eines Hauses | 117 |
| 10.1 | Zur Definition der Radondichtheit eines Hauses..... | 117 |
| 10.2 | Zwei Szenarien zur Prüfung der Radondichtheit eines Hauses | 121 |
| 10.2.1 | Vorbemerkung zu den Szenarien..... | 121 |
| 10.2.2 | Szenario 1: Prüfung der Radondichtheit ohne Anlegen eines Unterdrucks | 122 |
| 10.2.3 | Prüfung der Radondichtheit durch Anlegen eines Unterdrucks | 124 |
| 10.2.3.1 | Szenario 2a: BDT ohne zusätzliche Messungen in einzelnen Aufenthaltsräumen..... | 124 |
| 10.2.3.2 | Szenario 2b: BDT mit zusätzlichen Messungen in einzelnen Aufenthaltsräumen..... | 125 |
| 10.3 | Kostengründe als weitere Randbedingung..... | 126 |
| 10.4 | Zusammenfassung der Prüfungsmethoden zur Radondichtheit | 127 |
| 10.5 | Anmerkungen zur Erweiterung der Vorgehensweise zur Überprüfung der Radondichtheit eines Hauses..... | 130 |
| 11 | Quellstärkenbestimmung aus Radonlangzeitmessungen..... | 133 |
| 12 | Zusammenfassung | 136 |
| 13 | Literaturverzeichnis | 143 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|--|----|
| Tabelle 1: | Mindestwerte der Gesamt-Außenluftströme nach Tabelle 5 der DIN 1946 Teil 6 (2009) | 16 |
| Tabelle 2: | Mindestwerte der Gesamt-Außenluftströme nach Tabelle 5 der DIN 1946 Teil 6 (2009) umgerechnet auf Luftwechselraten für Raumhöhen von 2,5 m .. | 17 |
| Tabelle 3: | Übersicht über die Volumenströme und Luftwechselraten, die bei den BDT benutzt wurden. | 43 |
| Tabelle 4: | Übersicht über die Volumina der einzelnen Räume des Hauses..... | 43 |
| Tabelle 5: | Zusammenstellung der Maßnahmen während der Radonmessungen | 46 |
| Tabelle 6: | Übersicht über die mittleren Radonkonzentrationen im Erdgeschoss des Hauses | 66 |
| Tabelle 7: | Übersicht über die Volumenströme, Unterdrücke und Luftwechselraten, die bei den BDT benutzt wurden, sowie die abgeschätzten Zeiträume für das Erreichen eines Plateauwerts. | 77 |
| Tabelle 8: | Übersicht über die Anteile der einzelnen Volumenströme aus den unterschiedlichen Räumen, die zum Gesamtvolumenstrom des BDT beitragen. | 78 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tabelle 9: | Übersicht zu den Flächen und Volumina des Hauses | 87 |
| Tabelle 10: | Übersicht über die Volumenströme und Luftwechselraten, die bei den BDT benutzt wurden. | 90 |
| Tabelle 11: | Ergebnisse der mit Dosimetern gemessenen Radonkonzentration in 3 Räumen des Hauses sowie die Ergebnissen von aktiven Messungen im 1-Stundenrhythmus über einen Zeitraum von 1 Woche | 104 |
| Tabelle 12: | Übersicht über die Randbedingungen zur Definition der Radondichtheit eines Hauses nach Szenario 1 | 128 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Schematische Darstellung der Kopplungen unterschiedlicher Radonquellen für einen einzelnen Raum | 20 |
| Abbildung 2: | Illustrierung der Luftströme im Modellhaus während normaler Nutzungsbedingungen und während der Absaugung (BDT) | 26 |
| Abbildung 3: | Radonkonzentrationsentwicklung in einem Raum mit unterschiedlichen Luftwechselraten und Radonquellstärken des Raums (s. Text für Details)..... | 29 |
| Abbildung 4: | Wie Abbildung 3, jedoch die anfänglichen Radonkonzentrationen sind 350 Bq/m ³ | 34 |
| Abbildung 5: | Radonquellstärke Q als Funktion der Luftwechselrate für zwei unterschiedliche Abhängigkeiten von λ_{LW} und λ_Q | 36 |
| Abbildung 6: | Darstellung des Hauses (Erdgeschoss, oberes Bild), (Obergeschoss, unteres Bild) die grünen und roten Pfeile markieren die vorhandenen Luftein- und austrittsöffnungen | 40 |
| Abbildung 7: | Ergebnisse des Blower Door Tests (BDT) im Rahmen des Projekts | 42 |
| Abbildung 8: | Zeitliche Entwicklung der mittleren Radonaktivitätskonzentrationen im gesamten Haus sowie im Erd- und Obergeschoss (Messintervall 10 Minuten, Mittelung über 1 Stunde), Aktionen 1 - 3 s. Tabelle 5 | 44 |
| Abbildung 9: | Wie Abbildung 8, jedoch Darstellung der im 10-Minutentakt erhaltenen Radonkonzentrationen sowie mit Modellkurve für die ersten 5 Tage Aktion 1 (Lüfter aus, Lüftungsklappen geschlossen, s. Tabelle 5) | 47 |
| Abbildung 10: | Wie Abbildung 8, jedoch mit Modellkurve für die ersten 5 Tage Aktion 1 (Lüfter aus, Lüftungsklappen geschlossen, s. Tabelle 5) | 48 |
| Abbildung 11: | Zeitliche Entwicklung der im Erdgeschoß gemessenen Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen des EG. Zusätzlich angegeben sind die Differenzdrücke zwischen dem Arbeitszimmer (AZ) und der Außenatmosphäre | 49 |
| Abbildung 12: | Zeitliche Entwicklung der Differenzdrücke zwischen dem Inneren des Hauses und der Hausaußenatmosphäre sowie die Windgeschwindigkeiten außerhalb des Hauses..... | 52 |
| Abbildung 13: | Zeitliche Entwicklungen der Differenzdrücke zwischen dem Inneren des Hauses und der Hausaußenatmosphäre sowie zwischen den einzelnen Räumen des Erdgeschosses | 53 |
| Abbildung 14: | Zeitliche Entwicklung der im Erdgeschoß gemessenen Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen sowie die daraus berechnete mittlere Radonkonzentration. Zusätzlich angegeben sind die Differenzdrücke zwischen dem Flur und der und der Außenatmosphäre. | 54 |
| Abbildung 15: | Zeitliche Entwicklung der im Haus gemessenen mittleren Radonkonzentrationen vor und während des 1. BDT. Zusätzlich dargestellt sind die berechneten mittleren Radonkonzentrationen im Flur sowie die Ergebnisse Modellrechnung..... | 57 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 16: Wie Abbildung 15, jedoch für den Zeitraum des 1. und 2. BDT | 60 |
| Abbildung 17: Wie Abbildung 15, jedoch für weitere Aktionen und dem 3. BDT | 62 |
| Abbildung 18: Radonkonzentrationsentwicklung im Erdgeschoss des Hauses unter normalen Nutzungsbedingungen (Lüftungsventilatoren eingeschaltet mit 60 m ³ /h, Luftwechselrate $\lambda_{LW}=0,16 \text{ h}^{-1}$, Unterdruck etwa 1 - 2 Pa) | 66 |
| Abbildung 19: Bestimmung der Radonquellstärke nach der Anstiegsmethode | 68 |
| Abbildung 20: Schematische Darstellung des Grundrisses vom Souterrain und der Lage der einzelnen Räume, der Ort für die Installation der Tür für den BDT ist eingezeichnet | 71 |
| Abbildung 21: Zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration im Flur des Souterrains (Messpunkt MP6), der mit den anderen Räumen lufttechnisch (Türspalte) verbunden ist | 73 |
| Abbildung 22: Wie Abbildung 20, jedoch für die Messpunkte MP1, MP2 (oberes Bild) und MP2, MP6 (unteres Bild)..... | 74 |
| Abbildung 23: Wie Abbildung 20, jedoch für den Hauswirtschaftsraum (MP4) im Vergleich zum Flur (MP6) (oberes Bild) und gleitender Mittelwert für den MP4 im unteren Bild | 75 |
| Abbildung 24: Zeitliche Staffelung von Differenzdruck und resultierenden Volumenströmen für den BDT in Abhängigkeit von der gewählten Saugzeit .. | 76 |
| Abbildung 25: Wie Abbildung 24, jedoch für Luftwechselraten | 77 |
| Abbildung 26: Wie Abbildung 25, jedoch zusätzlich zu den Volumenströmen V_{in} und Luftwechselraten λ_{in} sind die Ergebnisse der Radonmessungen im Absaugstrom und der mit Hilfe der gemessenen Volumenströme aus den angekoppelten Räumen berechneten mittleren Radonkonzentrationen im Souterrain mit angegeben..... | 80 |
| Abbildung 27: Wie Abbildung 25, jedoch für die Räume MP2 und MP4 (Hauswirtschaftsraum)..... | 81 |
| Abbildung 28: Wie Abbildung 26, jedoch zusätzlich sind die Ergebnisse der Modellierung mit angegeben..... | 83 |
| Abbildung 29: Abhängigkeit der berechneten Quellstärken Q von der gemessenen Luftwechselrate | 84 |
| Abbildung 30: Darstellung des Objektes im Erdgeschoss..... | 88 |
| Abbildung 31: Darstellung des Objektes im Obergeschoss | 89 |
| Abbildung 32: Zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration in allen Räumen des Erdgeschosses (Haus, Objekt 3) | 91 |
| Abbildung 33: Wie Abbildung 32, jedoch für das Obergeschoss..... | 91 |
| Abbildung 34: Wie Abbildung 32, jedoch für die mittleren Radonkonzentrationen Erd- und Obergeschoss | 92 |
| Abbildung 35: Zeitliche Entwicklung der Luftwechselrate und des Differenzdrucks während des BDT | 93 |
| Abbildung 36: Zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration in allen Räumen des Erdgeschosses (Haus, Objekt 3) während des BDT | 94 |
| Abbildung 37: Zeitliche Entwicklung der mittleren Radonkonzentrationen in den 2 Etagen vor und während des BDT sowie die im Abstrom im 10-Minuten-Rhythmus gemessenen Radonkonzentrationen am BD Lüfter, im Wohnzimmer und im Hausanschlussraum. | 95 |
| Abbildung 38: Zeitliche Entwicklungen der während des BDT im Abstrom im 10-Minuten-Rhythmus gemessenen Radonkonzentrationen am BD Lüfter und der Differenzdrücke | 96 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 39: Wie Abbildung 36, jedoch für die Räume des Obergeschosses | 97 |
| Abbildung 40: Gegenüberstellung der mit dem BDT gemessenen Radonquellstärken $Q(BD)$ und der erwarteten Quellstärken $Q(\beta=const)$, die im Ergebnis der bei einem Unterdruck von ca. 2 Pa im Normalzustand des Hauses gemessenen Quellstärke berechnet wurden. | 98 |
| Abbildung 41: Zeitliche Entwicklung der Radonkonzentrationen in einem Kellerraum | 100 |
| Abbildung 42: Zeitliche Entwicklung der Radonkonzentrationen in einen Kellerraum bei unterschiedlichen Unterdrücken und sich daraus resultierenden Luftwechselraten (s.a. Abbildung 43)..... | 101 |
| Abbildung 43: Radonquellstärke Q sowie die nach ausreichend langen Saugzeiten als Funktion der Luftwechselrate resultierenden Radonkonzentration C_{asympt} | 102 |
| Abbildung 44: Ergebnisse der Radonmessungen in allen Räumen des Erd- und Obergeschosses sowie im Heizungsraum des Kellers..... | 104 |
| Abbildung 45: Zeitliche Entwicklung der mittleren Radonkonzentrationen in allen Etagen des Hauses sowie der mittleren Gesamtaktivität..... | 105 |
| Abbildung 46: Ergebnisse der Radonmessungen in ausgewählten Räumen des Erd- und Obergeschosses sowie im Heizungsraum des Kellers. Zusätzlich angegeben sind die Differenzdrücke zwischen Heizungsraum (Radonquelle) und der Außenatmosphäre sowie die Ergebnisse der Modellierung zur Extraktion der Radonquellstärke und der Luftwechselrate im Heizungskeller. | 106 |
| Abbildung 47: Wie Abbildung 44, jedoch beispielhaft nur für das Wohnzimmer im Erdgeschoss und das Schlafzimmer im 1. Obergeschoss. Die mit Hilfe der Anstiegsmethode berechneten Quellstärken sind angegeben | 108 |
| Abbildung 48: Wie Abbildung 46, jedoch zusätzlich mit den Ergebnisse des Unterdruckverfahrens | 109 |
| Abbildung 49: oberes Bild: Zeitliche Entwicklung der Radonkonzentrationen in allen Räumen des Erd- und Obergeschosses sowie im Heizungsraum des Kellers vor und nach Anlegen eines Unterdrucks unteres Bild: Darstellung der Ergebnisse in einem verkleinerten Maßstab. | 111 |
| Abbildung 50: Aufteilung der Räume im Erdgeschoss des Hauses (grüne Pfeile kennzeichnen die Ausgangskanäle der mechanischen Lüftung, rote Pfeile die Frischlufteingangskanäle) | 112 |
| Abbildung 51: Zeitlichen Entwicklung der Differenzdrücke zwischen dem Hausinneren und der Außenatmosphäre über einen Zeitraum von ca. 3 Wochen, wobei 2 Unterdruckstufen von 4 und 10 Pa angelegt wurden. Zusätzlich angegeben sind die Ergebnisse der Innen- und Außenraumtemperaturmessungen sowie der in unmittelbarer Nähe herrschenden Windgeschwindigkeiten | 114 |
| Abbildung 52: Entwicklung der Differenzdrücke zwischen dem Hausinneren und der Außenatmosphäre über einen Zeitraum von ca. 3 Wochen, wobei 2 Unterdruckstufen von 4 und 10 Pa angelegt wurden. Zusätzlich angegeben sind die Ergebnisse der Radonkonzentrationsentwicklungen im Hausanschlussraum und die berechneten mittleren Radonkonzentration (gewichteter Mittelwert) für das gesamten Haus | 115 |
| Abbildung 53: Entwicklung der Radonkonzentration in einzelnen Räumen des Hauses über einen Zeitraum von ca. 3 Wochen, wobei 2 Unterdruckstufen von 4 und 10 Pa angelegt wurden. Die berechneten mittleren Radonkonzentrationen (gewichteter Mittelwert) für das gesamten Haus im jeweiligen Unterdruckmodus sind mit angegeben. | 116 |

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Der Strahlenexposition durch die Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten in Wohnungen und an Arbeitsplätzen wird weltweit erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt. Dies kommt auch in den aktualisierten Empfehlungen der internationalen Organisationen (UNSCEAR, WHO, ICRP, IAEA) zum Ausdruck. Die Richtlinie 2013/59/EURATOM des Europäischen Rates [1] vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung trifft konkrete Aussagen zur Radonexposition in Innenräumen. Es wird gefordert, dass die Mitgliedsstaaten im Rahmen des nationalen Maßnahmenplans nach Artikel 103 Maßnahmen zur Ermittlung von Wohnräumen ergreifen, in denen die Radonkonzentration (im Jahresmittel) den Referenzwert überschreitet. Diese Richtlinie [1] wurde in dem neuen Strahlenschutzgesetz (Gesetz zur Neuordnung des Rechts zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung) der Bundesrepublik Deutschland vom 3. Juli 2017 [2] umgesetzt.

Nach § 124 des Gesetzes beträgt der Referenzwert für die über das Jahr gemittelte Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Luft in Aufenthaltsräumen 300 Becquerel je Kubikmeter. Spätestens zehn Jahre nach Inkrafttreten dieses Gesetzes legt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit einen Bericht über die Entwicklung der Schutzmaßnahmen für die Allgemeinbevölkerung gegenüber Radonexpositionen, über deren Wirksamkeit und Kosten auf Bundes- und Länderebene vor. Die Bundesregierung wird ermächtigt, durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates festzulegen, wie die Messung der Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Luft in Aufenthaltsräumen zu erfolgen hat. Nach § 126 ist der Referenzwert für die über das Jahr gemittelte Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Luft an Arbeitsplätzen ebenfalls auf 300 Becquerel je Kubikmeter festgelegt worden.

Es ist international weitgehend akzeptiert, dass entsprechende vorsorgende Maßnahmen zur Beherrschung und Kontrolle der Radonsituation in neu errichteten Gebäuden effektiv sind und gegenüber Sanierungsmaßnahmen zur nachträglichen Verringerung der Radonkonzentration auch mit geringeren Kosten verbunden sein können. Somit ist die Kontrolle der Wirksamkeit von Radonschutzmaßnahmen in neu errichteten Gebäuden ein Schwerpunkt zukünftiger Aktivitäten zur Verbesserung der Radonsituation in Wohnungen und an Arbeitsplätzen in Deutschland.

In der Leistungsbeschreibung des BfS vom 26.1.2016 [3] für das Vorhaben "Qualifizierung der Luftdichtheitsmessung an Gebäuden zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude" wurde formuliert, dass die derzeit gebräuchliche Methode zur Bestimmung des Jah-

resmittelwertes der Radonkonzentration in Innenräumen mit integrierenden Messeinrichtungen über die Dauer von einem Jahr für eine Prüfung der Radondichtheit eines Gebäudes gegen den Baugrund ungeeignet ist. Als Ziel eines Forschungsvorhabens wurde deshalb die Entwicklung einer praxistauglichen Methode zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude und die Ableitung von Prüfwerten, die die Einhaltung des Referenzwertes für die Radonkonzentration in Innenräumen gewährleisten, benannt. Es wurde darauf verwiesen, dass als Grundlage für die Entwicklung des Prüfverfahrens der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik zu Messverfahren und Berechnungsmethoden zu recherchieren ist, mit denen für die Radonkonzentration in Gebäuden relevante Parameter ermittelt werden, die für die Aufgabenstellung von Bedeutung sein können. Dabei sind die in existierenden einschlägigen Normen festgelegten, radonrelevanten Parameter und Berechnungsverfahren zu berücksichtigen. Die Erstellung einer Unsicherheitsanalyse und der Vergleich der Ergebnisse mit den Unsicherheiten einer Langzeitmessung sollten Bestandteil der Leistungserbringung sein. Im Ergebnis der Untersuchungen ist ein konkreter Vorschlag für eine Prüfmethode zu formulieren, der ggf. als Grundlage für eine Standardisierung geeignet ist.

Es wurde auch darauf in [3] hingewiesen, dass die Referenzwerte Jahresmittelwerte der Aktivitätskonzentration von Radon-222 sind, oberhalb derer die resultierenden Expositionen als unangemessen zu betrachten sind. In der Praxis bedeutet dies, dass neue Gebäude so zu errichten sind, dass der Referenzwert oder ein anderer mit dem Bauherrn vertraglich vereinbarter Jahresmittelwert der Radonkonzentration nicht überschritten werden sollte. Die Einhaltung vertraglich gebundener oder behördlich geforderter bzw. nach dem Stand der Technik geschuldeter Eigenschaften neu errichteter Gebäude ist in der Regel bei Abnahme des Bauwerkes nachzuweisen. Die weit verbreitete, einfache und robuste Methode zur Bestimmung des Jahresmittelwertes der Radonkonzentration mit integrierenden Messeinrichtungen über die Dauer von einem Jahr, die in einem bereits genutzten Gebäude häufig angewendet wird, ist dafür ungeeignet.

In der Leistungsbeschreibung wurde auf ein in der Literatur beschriebenes, komplexes Verfahren, den Jahresmittelwert der Radonkonzentration mit Hilfe modifizierter (vor der Bauabnahme ohnehin durchzuführender) Gebäudedichtheits-Messungen mit Unterdruck zu bestimmen, hingewiesen [4]. Diesbezüglich ist zu ermitteln, mit Hilfe welcher zusätzlich zu berücksichtigender Parameter oder festzulegender Prüfwerte eine möglichst einfache, robuste Methode zur Prüfung auf ausreichende Radondichtheit entwickelt werden kann.

Darüber hinaus sind alternative Methoden (auch ohne Luftdichtheitsmessung an Gebäuden) zu betrachten, die eine Prüfung der Radondichtheit erdberührender Bauteile von neu errichteten Gebäuden vor der Bauabnahme ermöglichen.

Im Kapitel 2 werden die Ergebnisse der Literaturrecherche sowie weitere Prämissen zur Konkretisierung des Forschungsumfangs zusammengefasst. Im Kapitel 3 werden die erforderlichen Elemente zur Beschreibung der zeitlichen Radonkonzentrationsentwicklung, die für die Fortführung und Interpretation der Ergebnisse von Bedeutung sind, kurz dargestellt und anhand von Modellrechnungen untersetzt. Untersuchungsergebnisse von Prüfungen der Radondichtheit von 6 Häusern sowie zur Bestimmung des Radonquellterms werden in den Kapiteln 4 bis 9 vorgestellt. Die Häuser sind nach entsprechenden Voruntersuchungen so ausgewählt worden, dass möglichst viele Facetten einer Radondichtheitsprüfung erfasst werden und die Grenzen und Vorteile der anzuwendenden Methoden ausgelotet werden können. Entsprechend dem Auftrag ist für die Radondichtheitsprüfung die Unterdruckmethode als Vorzugsmethode zu testen, da auf der einen Seite die Veröffentlichungen zu bisherigen Forschungsarbeiten erfolgversprechend sind und auf der anderen Seite man sich eine deutliche Zeitersparnis, verbunden mit einer relativ Unabhängigkeit von äußeren Bedingungen verspricht.

Vorschläge für eine Vorgehensweise zur Radondichtheitsuntersuchung von Häusern im Rahmen der Bauabnahme werden im Kapitel 10 unterbreitet und einzeln bewertet. In Kapitel 11 werden Ergebnisse von Langzeitmessungen der Radonkonzentration mit Hilfe von Kernspurdetektoren den Kurzzeitmessungen gegenübergestellt. Eine Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse enthält das Kapitel 12.

2 Literaturrecherche und Prämissen zur Konkretisierung des Forschungsumfangs

2.1 Ergebnisse der Literaturrecherche

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Die grundlegenden Zusammenhänge zur Radonsituation in Innenräumen von Gebäuden, die heute noch ihre Gültigkeit besitzen, sind in der Monographie von Nazaroff und Nero („Radon and its Decay Products in Indoor Air“ (1988)) dargestellt [5]. Einen wesentlichen Beitrag zu den wissenschaftlichen Grundlagen leisteten in Deutschland die Arbeiten von Jacobi [6], Porstendörfer [7] und Keller [8]. Im Zusammenhang mit der Thematik des radonsicheren Bauens wurden die grundlegenden konzeptionellen Modellvorstellungen im Jahr 2005 von Schulz und Löbner auf der 1. Tagung Radonsicheres Bauen unter der Überschrift „Wie und warum gelangt Radon in ein Haus?“ zusammengefasst [9]. Der Aspekt des Luftaustausches in Gebäuden und die Bestimmung der Luftwechselrate in Räumen wurde von Löbner [10] auf der 2. Tagung Radonsicheres Bauen im Jahr 2006 zusammengestellt. Hier wurde bereits die **Anwendung der Blower-Door-Technologie beschrieben. Auch in verschiedenen europäischen Ländern** wurden in den letzten Jahren die konzeptionellen Modellvorstellungen in Dissertationen und Forschungsberichten zusammenfassend dargestellt (siehe z.B. [11], [12], [13], [14], [15]). Ein aktueller Review ist in [16] veröffentlicht.

Für das Forschungsvorhaben relevante Literaturquellen sind [4], [13], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41]. Ihre Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Weltweit wird die messtechnische Charakterisierung und Beherrschung der Radonsituation in neu errichteten Gebäuden in den aktuellen Strahlenschutzempfehlungen im Sinne des vorsorgenden Schutzes der Bevölkerung als wichtige Aufgabe angesehen. Lösungen bei der praktischen Umsetzung in den nationalen Aktionsplänen werden unterschiedlich angegangen. Die Rechtfertigung von Forschungsaktivitäten kann nach wie vor als gegeben angesehen werden. Die zu verfolgenden Zielstellungen müssen mit dem nationalen Aktionsplan kompatibel sein.
- In nur wenigen Ländern sind in den Bauvorschriften Konstruktions- und Dimensionierungsrichtlinien enthalten, die durch entsprechende Planungen und Ausführungsbestimmungen das radonsichere Bauen von neuen Häusern qualitätsgesichert gewährleisten. Auch die Prüfvorschriften für das Bauwerk sind auf die Einhaltung der Energieeinsparung und ggf. noch die Funktionalität der Wohnungslüftung zur Vermeidung von Schimmelbildung ausgerichtet. Das Radon-Management in den USA und einigen anderen Ländern zeigt, dass Prüfvorschriften zur Radonsituation in neu errichteten

Gebäuden immer im Zusammenhang mit den existierenden Bauvorschriften zu sehen sind.

- Dichte Gebäude sind energieeffizient, aber eine gute Ventilation (Luftaustausch) im Gebäude ist für das gesunde und komfortable Wohnen unabdingbar. Deshalb spielen technische Lüftungsanlagen eine große Rolle. Die technischen Lüftungsanlagen in Kombination mit dem Nutzerverhalten beeinflussen die Innenraumlufthqualität maßgeblich und damit auch die Radonsituation. Die Dichtheit der Gebäudehülle muss hinsichtlich der Innenraumlufthkonzentrationen nicht das entscheidende Kriterium sein, das die Radonkonzentration in den Innenräumen bestimmt. Barrieren (z.B. Folien), die sowohl den Radontransport aus dem Baugrund durch die bodenberührende Gebäudehülle infolge Diffusion als auch Konvektion von Bodenluft unterbinden, sind unabhängig vom Radonpotenzial im Baugrund als Standard vorzuschreiben. In einigen Ländern ist dies der Fall.

Eine Erweiterung bestehender Normen zur Kontrolle der Energieeinsparverordnung (Standard Blower Door (BD) Verfahren) erscheint nicht sinnvoll, da unterschiedliche Zielstellungen verfolgt werden. Die methodische Durchführung des Unterdruckversuches zur Kontrolle der Radonpermeabilität der Gebäudehülle muss auf die spezielle Zielstellung ausgerichtet werden und ergibt ggf. einen eigenständigen Standard.

- Die Bestimmung der Radonintrusionsrate aus dem Baugrund mit einem erweiterten BD Verfahren ist nicht ausreichend, um die mittlere Radon-Innenraumlufth zu prognostizieren. Es muss zusätzlich ein einfaches und robustes konzeptionelles Modell des Luftaustausches im Gebäude identifiziert und vereinbart werden.
- Die Literaturrecherche ergab, dass bei der Verfahrensanwendung verschiedene Modelle zum Einsatz kamen. Die Prognosesicherheit der verwendeten Modelle konnte nicht abschließend geklärt werden.
- Ein Differenzdruck-Verfahren (erweitertes BD Verfahren) wird in verschiedenen Ländern zu Diagnosezwecken angewendet. Es gibt jedoch methodische Unterschiede, die benennbar sind. In einigen Ländern befinden sich die Verfahren noch im Entwicklungsstadium, insbesondere wenn es um neue Häuser geht. Die Verfahrensgrundlagen sind in der Literatur beschrieben. Die technische Durchführung und die einzusetzende Messtechnik lässt noch Spielraum zu.
- Es ist in einigen Ländern der Trend zu verzeichnen, nicht nur die Infiltration von Radon zu analysieren, sondern gleichzeitig auch andere Innenraumschadstoffe. Es ist überlegenswert, ob die Zielfunktion "Innenraumlufthqualität" breiter gefasst werden muss und die Radonsituation dort zu integrieren ist.

- In einigen früheren Untersuchungen wurde in verschiedenen Ländern der Weg gewählt, die Entwicklung einer neuen Methodik (die zur Standardisierung geeignet erscheint) hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit an wenigen zufällig ausgewählten Stichprobenobjekten zu untersuchen. Die Verallgemeinerung basiert dann auf empirischen Überlegungen. In einigen Ländern wurde ein anderer Weg gewählt. Hier wurden komplexe Untersuchungsstrategien an einem "Modellhaus" ausgeführt, dadurch konnte das Systemverständnis qualifiziert werden und die Reproduzierbarkeit der Untersuchungsmethode bei veränderten äußeren Randbedingungen bewertet werden. Bei der Untersuchungsstrategie "wenige Häuser als repräsentative Stichprobe" muss beachtet werden, dass neue Häuser hinsichtlich der baulichen Gegebenheiten Unikate sind und die Ergebnisse infolge des Gebäudeeinflusses und ggf. infolge des unterschiedlichen Nutzerverhaltens nicht vergleichbar oder verallgemeinerbar sind.

2.2 Konkretisierung des Forschungsbedarfs

Die Ergebnisse von ersten orientierenden Unter- und Überdruckmessungen an unterschiedlichen Häusern, die zur Qualifizierung der Luftdichtheitsmessung an Gebäuden zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude unter Zuhilfenahme des etablierten Blower Door Tests (BDT) durchgeführt wurden, sind in einer Präsentation beim BfS am 09.11.2016 [42] vorgestellt und diskutiert worden. Diese Messergebnisse von unterschiedlichen Häusern sind unter der Prämisse gewählt worden, möglichst viele Facetten der BDT Messungen zu erfassen. Als wichtigstes Ergebnis wurde herausgearbeitet, dass die Bestimmung der Luftdichtheit eines Hauses durch einen BDT nicht einfach um die Komponente Radonkonzentrationsentwicklung im Haus und der damit erhofften Prognosemöglichkeiten erweitert werden kann. Ein eigenständiges Messprotokoll zur Radondichtheitsmessung mittels Unterdruck ist nötig. Des Weiteren ist ein besonders wichtiges Detail zu beachten, denn bei der Ausführung des ursprünglichen BDT zur Luftdichtigkeit eines Gebäudes wird immer eine instantane (sofortige) Reaktion von Systemvariablen (z.B. Volumenströme) auf eine Druckänderung registriert. Deshalb dauert der Test nur wenige Minuten, um die Luftdichtheit der Gebäudehülle zu quantifizieren.

Die zeitliche Änderung der Radoncharakteristika kann dagegen oftmals ein sehr langsamer Prozess sein, der von der Lage und der Art der Radonquellen sowie vom Intrusionsverhalten des Radons aus dem Baugrund in das Haus geprägt wird. Während der Unterdruckphase findet gleichzeitig ein Vermischungs- und Konsolidierungsprozess der in den einzelnen Räumen eines Hauses sich entwickelnden Radonkonzentrationen statt. Deshalb können Radondichtheitsprüfungen nicht nach wenigen Minuten Unterdruckanlegung bereits schlüssige Ergebnisse liefern.

Des Weiteren ist zu beachten, dass nach einem einfachen BDT letztlich nur eine einzige Systemvariable, die durch das Produkt der Radonkonzentration in der abgesaugten Innenraumluft (Abluft) und der abgesaugten Luftmenge gebildet wird, zur Charakterisierung der Radondichtheit zur Verfügung steht. Ob dieser Variable der Terminus "Radonquellstärke des Hauses" bei fixiertem Unterdruck zugewiesen werden kann, hängt von einer Reihe von Randbedingungen ab, die in Fortführung des Forschungsvorhabens noch genauer auszuloten sind. Fakt ist, dass bei dem etablierten BDT zur Bestimmung der Luftdichtigkeit eines Hauses die Radonintrusion mit der eventuell angesaugten Menge an Bodenluft wegen deren Geringfügigkeit, d.h. wenige m^3/h Bodenluft im Vergleich zu 100 - 400 m^3/h angesaugter Außenluft über existierende Gebäudeleckagen, die nicht in unmittelbarer Verbindung zum Baugrund stehen, praktisch überhaupt keine Rolle spielt.

Zu Realisierung des Gesamtprojekts [3] "Qualifizierung der Luftdichtheitsmessung an Gebäuden zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude" wurden durch den Auftraggeber (AG) (BfS AG-R-08313/3616S12241) die nachfolgend aufgelisteten Positionen für die weitere Arbeit vorgeschlagen, die in einem Protokoll [43] festgehalten sind.

1. Durch den AG wurde herausgearbeitet, dass die zu entwickelnde Prüfmethode nicht im Rahmen der Bauüberwachung anzuwenden ist, sondern für die Bauabnahme herangezogen werden soll. In diesem Zustand ist das zu bewertende Haus fertiggestellt, aber noch nicht bezogen und wird auch noch nicht genutzt.
2. Für die Auswertung und Modellierung der Prüfergebnisse und Hochrechnung auf einen jährlichen Mittelwert der Radonkonzentration in einzelnen Räumen des Hauses sind Mindestluftwechselraten, die als eingeführte technische Regel vorliegen, zu nutzen. Für den Vergleich von Langzeitmessungen mit dieser Hochrechnung sind für die Interpretation der Langzeitmessung reale Luftwechselraten zu berücksichtigen.
3. Die zu erarbeitende Prüfmethode kann, wenn notwendig, deutlich vom klassischen BDT abweichen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass das zu prüfende Haus den gewöhnlichen BDT bereits bestanden hat.
4. Der im Vorhaben ins Auge gefasste Test soll nur eine Entscheidung "radondicht" oder "nicht radondicht" liefern. Eine Ursachenermittlung über die Radonundichtheit ist nicht Gegenstand des Tests. Die Bewertung "radondicht" impliziert, dass die daraus resultierenden Radonkonzentrationen als Langzeitmittelwert von $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$ für Aufenthaltsräume nicht überschritten werden sollen. Es wurde festgelegt, dass die Bewertung "radondicht" impliziert, dass die daraus resultierenden Radonkonzentrationen als Langzeitmittelwert von $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$ für Aufenthaltsräume bei einer beispielhaft angenommenen Mindestluftwechselrate von $0,5 \text{ h}^{-1}$ nicht überschritten werden sollen.

Mit der Verknüpfung des einzuhaltenden Referenzwerts und der Mindestluftwechselrate von $0,5 \text{ h}^{-1}$ ist somit in der Untersetzung der in der Leistungsbeschreibung aufgeschlüsselten Forschungsaufgaben eine richtungsweisende Entscheidung in Hinblick auf die messtechnische Gestaltung und Auswahl der Häuser gelegt worden. Im Vordergrund der Untersuchungen steht somit die Frage, welche Erkenntnisse ein BDT liefern kann und ob bereits nach wenigen Stunden ein belastbares Ergebnis zur Radondichtheit des Hauses vorliegen könnte. Dies konnte erst anhand von Praxisbeispielen herausgearbeitet werden. Im Fokus stand dabei die Frage, unter welchen Bedingungen ein BDT sinnvoll ist und welche Prognosesicherheit aus der alleinigen Kenntnis über die Radonkonzentration in der abgesaugten Luft und der Höhe des Abluftstroms bei vorgegebenem Unterdruck erreicht werden kann. Auf diese Weise erscheint das Haus zunächst als eine Art "Blackbox", so dass nur sehr konservative Interpretationen der gemessenen Radonquellstärke als Kriterien für die Radondichtheit des Gebäudes in Hinblick auf die Langzeitprognose der mittleren Radonkonzentration in Aufenthaltsräumen getroffen werden können, wenn nicht zusätzliche Messungen in den einzelnen Räumen des Hauses durchgeführt werden. Das bedeutet, der Standard BDT muss qualitativ erweitert werden.

Im Ergebnis von methodischen Untersuchungen (s. Kapitel 3) stellt sich die Situation so dar, dass für die Bestimmung der Radondichtheit eines Hauses Messungen bei mehreren Unterdruckstufen durchgeführt werden müssen. Dafür sind Mindestzeiträume von 8 - 12 Stunden und mehr einzuplanen. Das schränkt eine Entscheidungsfindung während der Bauabnahme stark ein und impliziert eine Zuwendung zu alternativen Prüfmethoden.

Ist z.B. im Ergebnis von Untersuchungen ein Kellerraum oder auch der Hausanschlussraum im Haus ohne Keller als Haupteintrittspfad für ein Haus identifiziert worden, kann ein nachgeschalteter Unterdruckversuch an dem ausgewählten Raum bereits nach kurzer Saugzeit die Radonquellstärke des Raums liefern. Wie sich dann das Radon im gesamten Haus verteilt und wie sich die Radonquellstärke als Funktion des Unterdrucks entwickelt, kann nur durch einen zusätzlichen Messaufwand geklärt werden. Überdies ist durch solch eine Messung nicht auszuschließen, dass weitere Räume als Eintrittspfade ins Kalkül zu ziehen sind. Für eine Prüfmethode im Rahmen einer zeitlich sehr beschränkten Bauabnahme ist u.E. ein solches Vorgehen jedoch ungeeignet.

Zur Konkretisierung des Forschungsthemas ist abschließend hervorzuheben, dass sich die Untersuchungsaufgaben ausschließlich auf neu gebaute Häuser beziehen sollen. Neu gebaute Häuser zeichnen sich gegenüber älteren Häusern vor allem dadurch aus, dass sie wegen der Wärmeisolierung und der verwendeten Technologien die Bedingungen der Luftdichtigkeitsprüfungen [44] erfüllen, wobei jedoch, wie in den nachfolgenden Fallbeispielen

(s. Kapitel 4 - 9) gezeigt wird, der Anteil von radonhaltiger Bodenluft in der angesaugten Luft eher eine untergeordnete Rolle spielt. In älteren Häusern können dagegen je nach Bauzustand und Bauausführung Sachlagen angetroffen werden (s. z.B. [4]), in denen im Absaugstrom die angesaugte radonhaltige Bodenluft aus dem Baugrund wegen existierender Leckagen in der Gebäudehülle zum Baugrund die Radonsituation des gesamten Hauses so dominiert, dass das Haus wegen der offensichtlichen Baumängel als nicht radondicht eingestuft werden kann. Solche Messungen können im Vorfeld von Sanierungsentscheidungen in Hinblick auf eine Radoneintrittspfadsuche zielführend sein. Auch Absaugungen aus einzelnen Räumen zur Verifizierung und der Quantifizierung von Radonintrusionsraten aus dem Baugrund können dabei ins Auge gefasst werden. Solche Messungen sind jedoch nicht im Sinne der im Forschungsvorhaben "Qualifizierung der Luftdichtheitsmessung an Gebäuden zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude" angedachten Vorgehensweise.

2.3 Zur Luftwechselrate

Für die Definition der Radondichtheit eines Hauses spielt der dabei einzuhaltende Luftwechsel eine entscheidende Rolle. Grundlage für die Mindestluftwechselrate ist die DIN 1946 Teil 6 von 2009 [45], die aber bauaufsichtlich noch nicht durchgesetzt ist. Die DIN fordert, dass bei der planmäßig anzunehmenden Personenzahl je Nutzungsfläche mindestens 30 m³/h Frischluftzufuhr pro Person als hygienische Mindestfrischluftzufuhr zur Verfügung stehen. Einzelne Angaben dazu sind in der Tabelle 1 aufgeschlüsselt.

Tabelle 1: Mindestwerte der Gesamt-Außenluftströme nach Tabelle 5 der DIN 1946 Teil 6 (2009)

| Fläche der Nutzungseinheit A_{NE}^a (in m^2) | ≤ 30 | 50 | 70 | 90 | 110 | 130 | 150 | 170 | 190 | 210 |
|--|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Lüftung zum Feuchteschutz Wärmeschutz hoch ^c $q_{v,ges,NE,FLh}$ | 15 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 |
| Lüftung zum Feuchteschutz Wärmeschutz gering ^d $q_{v,ges,NE,FLg}$ | 20 | 30 | 40 | 45 | 55 | 60 | 70 | 75 | 80 | 85 |
| Reduzierte Lüftung ^e $q_{v,ges,NE,RL}$ | 40 | 55 | 65 | 80 | 95 | 105 | 120 | 130 | 140 | 150 |
| Nennlüftung ^{f, b} $q_{v,ges,NE,NL}$ | 55 | 75 | 95 | 115 | 135 | 155 | 170 | 185 | 200 | 215 |
| Intensivlüftung ^g $q_{v,ges,NE,IL}$ | 70 | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 220 | 245 | 265 | 285 |

^a beheizte Fläche A_{NE} innerhalb der Gebäudehülle, die im Rahmen des Lüftungskonzeptes zu berücksichtigen ist, bei Flächen der NE $A_{NE} < 30 m^2$ (je Wohnung bzw. Nutzungseinheit) wird $A_{NE} = 30 m^2$ gesetzt, bei Flächen der NE $A_{NE} > 210 m^2$ (je Wohnung bzw. Nutzungseinheit) sind die planmäßigen Außenluftvolumenströme in geeigneter Weise (z. B. mit Gleichung nach Fußnote f) an die geplante Nutzung (Belegungsdichte) anzupassen.

^b Die für Nennlüftung angegebenen Gesamt-Außenluftvolumenströme gelten für den Fall, dass bei der planmäßig anzunehmenden Personenzahl je Nutzungsfläche mindestens $30 m^3/h$ je Person zur Verfügung stehen. Den Werten ist eine Raumhöhe von 2,5 m zugeordnet. Bei erhöhten Anforderungen (z. B. bei über die üblichen Werte hinausgehenden, hohen Schadstofflasten) können die Außenluftvolumenströme erhöht werden. Bei einer höheren als der nicht planmäßigen Personenzahl je Nutzungsfläche kann der spezifische Luftvolumenstrom von $30 m^3/(h \cdot Person)$ verringert werden, jedoch nicht unter mindestens $20 m^3/(h \cdot Person)$.

^c Wärmeschutz hoch:
Neubau nach 1995 oder Komplett-Modernisierung mit entsprechendem Wärmeschutzniveau (mindestens nach WSchV 95, schließt EnEV ein)
 $q_{v,ges,NE,FL} = 0,3 \cdot q_{v,ges,NE,GL}$

^d Wärmeschutz gering:
nicht oder teilmodernisierte (z. B. nur Fensterwechsel, dadurch Erhöhung der Dichtheit der Gebäudehülle bei niedrigem Wärmedämmstandard), alle vor 1995 errichtete Gebäude
 $q_{v,ges,NE,FL} = 0,4 \cdot q_{v,ges,NE,NL}$

^e $q_{v,ges,NE,RL} = 0,7 \cdot q_{v,ges,NE,NL}$, eine Reduzierung des Wertes für den Luftvolumenstrom für die Reduzierte Lüftung ist nur zulässig, wenn dies aufgrund der Nutzung der Räume entsprechend begründet werden kann.

^f $q_{v,ges,NE,NL} = -0,001 \cdot A_{NE}^2 + 1,15 \cdot A_{NE} + 20$ (Nutzungsfläche A_{NE} in m^2 , Außenluftvolumenstrom $q_{v,ges}$ in m^3/h)

^g $q_{v,ges,NE,IL} = 1,3 \cdot q_{v,ges,NE,NL}$

^h einschließlich Infiltration

Die in der Tabelle 1 aufgeführten Mindestwerte der Gesamt-Außenluftströme sind im Sinne einer direkten Anwendung als Luftwechselraten für Raumhöhen von 2,5 m umgerechnet worden und in der Tabelle 2 zusammengestellt. Es ist zu erkennen, dass von Nennlüftungen im Bereich von $0,5 h^{-1}$ bei einer Wohnfläche $100 m^2$ auszugehen ist. Dazu gibt es z.B. gegenwärtig noch keine Vorschriften, wie hoch bei einer mechanischen Lüftung die Unterdrücke zwischen den Innenräumen und der Hausaußenatmosphäre sein können. Im Sinne des Radonschutzes sollte die Belüftung weitestgehend drucklos geschehen, da anderenfalls

möglicherweise einer unerwünschten zusätzlichen Radonintrusion aus dem Baugrund Vor-schub geleistet werden könnte.

Tabelle 2: Mindestwerte der Gesamt-Außenluftströme nach Tabelle 5 der DIN 1946 Teil 6 (2009) umgerechnet auf Luftwechselraten für Raumhöhen von 2,5 m

| Wohnraumfläche [m ²] | < 30 | 50 | 70 | 90 | 110 | 130 | 150 | 170 | 190 | 210 |
|---|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Abgeleitete Luftwechselrate [1/h] | | | | | | | | | |
| Lüftung zum Feuchteschutz bei hohem Wärmeschutz | 0,20 | 0,20 | 0,17 | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,12 |
| Lüftung zum Feuchteschutz bei geringem Wärmeschutz | 0,27 | 0,24 | 0,23 | 0,20 | 0,20 | 0,18 | 0,19 | 0,18 | 0,17 | 0,16 |
| reduzierte Lüftung | 0,53 | 0,44 | 0,37 | 0,36 | 0,35 | 0,32 | 0,32 | 0,31 | 0,29 | 0,29 |
| Nennlüftung | 0,73 | 0,60 | 0,54 | 0,51 | 0,49 | 0,48 | 0,45 | 0,44 | 0,42 | 0,41 |
| Intensivlüftung | 0,93 | 0,80 | 0,71 | 0,67 | 0,64 | 0,62 | 0,59 | 0,58 | 0,56 | 0,54 |

2.4 Zur Definition der Radondichtheit eines Hauses

Es ist im Ergebnis der Voruntersuchungen und anhand der ausgewählten Fallbeispiele belegt worden (s. Kapitel 4 - 9), dass die aus den unterschiedlichen BDT Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens resultierenden Ergebnissen nur dann zu einer nachvollziehbaren und belastbaren Definition der Radondichtheit eines neu gebauten Hauses im Rahmen der Bauübergabe führen können, wenn eine Reihe von zusätzlichen Randbedingungen eingehalten werden. Zunächst ist festzuhalten, dass in einem neu gebauten Haus, in dem der gewöhnliche BDT zur Luftdichtheitsprüfung erfolgreich absolviert wurde, der sogenannte "Normalzustand" in vielen Fällen durch sehr geringe Luftwechselraten von $\lambda_{LW} \approx 0,03 - 0,1 \text{ h}^{-1}$ charakterisiert ist. Die untersuchten Gebäudehüllen sind somit als "sehr luftdicht" zu bezeichnen. Damit in solch einem Haus bei einem so niedrigen Luftwechsel die Radonkonzentrationen in den einzelnen Aufenthaltsräumen einen Wert von 300 Bq/m^3 im Langzeitmittel nicht übertreffen, sind entweder hohe Anforderungen an die Radondichtheit der Gebäudehülle zu stellen oder eine technische Lüftung zu installieren. Aber auch das Lüftungsverhalten der Bewohner (z.B. häufiges Querlüften, Ankippen der Fenster etc.) kann dazu führen, dass im Langzeitmittel Radonkonzentrationen von 300 Bq/m^3 in Aufenthaltsräumen nicht übertroffen werden. Entsprechende Beispiele wurden detailliert untersucht (s. z.B. Ergebnisse in Kapitel 6).

In diesem Zusammenhang ist der Begriff Radonquellstärke zu klären. Die mittlere Radonquellstärke eines Hauses ist durch das Produkt der mit der Bodenluft verknüpften Radonintrusionsrate und Radonaktivitätskonzentration im Baugrund gegeben, wenn die Rado-

nexhalation der Baumaterialien und die Radondiffusion aus dem Baugrund in das Gebäude außer Acht gelassen wird (s. Ausführungen in Kapitel 3.2). Ist das Gebäude sehr dicht und wird beim Anlegen eines Unterdrucks immer proportional so viel radonhaltige Bodenluft wie atmosphärische Außenluft angesaugt, kann die bei vergleichsweise hohen Unterdrücken bestimmte Radonquellstärke einfach auf die Situation "Normalzustand" zurückskaliert werden. Im Ergebnis der Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens wird jedoch gezeigt, dass diese Situation eher eine Ausnahme bildet. Die bei höheren Unterdrücken extrahierten Quellstärken sind durch die überproportional hohe Beimischungen von atmosphärischer Außenluft in der aus dem Haus abgesaugten Abluft so stark modifiziert, dass es nur mit großem zusätzlichem Messaufwand möglich ist, die Einflüsse der Radonintrusionsrate von der der atmosphärischen Außenluft auf die Radoninnenraumluft als Funktion des angelegten Unterdrucks zu separieren. Es ist deshalb sachdienlich, die bei geringen Unterdrücken und bei geringen Luftwechselraten von $\lambda_{LW} \approx 0,03 - 0,1 \text{ h}^{-1}$ deduzierte Radonintrusion aus dem Baugrund als Radonquellstärke eines Hauses zu bezeichnen.

Nach den Untersuchungsergebnissen ist von einem Differenzdruck zwischen der Hausaußenatmosphäre und dem des Hausinneren im Mittel von etwa 2 - 4 Pa auszugehen, wobei proportional frische Außenluft um Größenordnungen stärker über Leckagen bzw. diverse Wegsamkeiten in der oberirdischen Gebäudehülle als über die Verbindungen zum Baugrund in das Haus nachströmt. Auch die Witterungsbedingungen (Wind, niedrigere Temperaturen im Winter) können saisonbedingt einen tageszeitlichen Einfluss auf die Radonsituation haben, der in Einzelfällen detailliert untersucht wurde.

In vielen neugebauten Häusern wäre eine mittlere Radonquellstärke von

$$Q \approx 30 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{ h}} \right], \quad (1)$$

ausreichend gering, damit auch bei einer niedrigen Luftwechselrate von

$$\lambda_{LW} \approx 0,1 \text{ h}^{-1}, \quad (2)$$

die jedoch deutlich kleiner als die in Tabelle 1 aufgelisteten Mindestluftwechselraten ist, die mittlere Radonkonzentration, bezogen auf das gesamte Hausvolumen, den Referenzwert von 300 Bq/m^3 nicht übersteigt. Falls noch niedrigere Luftwechselraten zu besorgen sind, müsste die Radonquellstärke entsprechend geringer sein. Wie die Situation tatsächlich ein-

zuschätzen ist, wird in den ausgewählten Fallbeispielen in den nachfolgenden Kapiteln 4 - 9 detailliert beschrieben.

Die Radonsituation eines neu gebauten Hauses würde sich qualitativ ändern, wenn z.B. eine Mindestluftwechselrate von $\lambda_{\text{LW}}^{\text{min}} \approx 0,5 \text{ h}^{-1}$, wie in den Konkretisierungen zum Forschungsthema vom AG vorgeschlagen, ins Kalkül zu ziehen ist. Ist eine solche Luftwechselrate bauseitig zu erfüllen, könnte bei Radonquellstärken des Hauses von $Q \approx 150 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{ h}} \right]$ der Referenz-

wert von 300 q/m^3 immer noch eingehalten werden. Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass in solch einem Fall die erhöhten Radonquellstärken bereits durch erhöhte, der Radonintrusion Vorschub leistende Baumängel, verursacht werden, die im Rahmen einer Luftdichtheitsprüfung gemäß der EnEV 2013 [46] nicht aufgespürt werden.

3 Zur zeitlichen Radonkonzentrationsentwicklung

3.1 1-Raum-Modell

Ein wichtiges Element der zeitabhängigen Beschreibung des Radontransports in einem Raum ist die Berücksichtigung der Erhaltungssätze für den Luftaustausch. Es gilt für die ein- und austretenden Ströme allgemein

$$\sum_i Q_i^{\text{in}} - \sum_j Q_j^{\text{out}} = 0 \quad (3)$$

wobei Q_i^{in} alle in einen Raum hineinkommenden Luftströme und Q_j^{out} alle aus einem Raum austretenden Luftströme bezeichnet. In Q_i^{in} sind nach dem einfachen Kopplungsschema in Abbildung 1 das Radonreservoir, das z.B. aus der Radonquelle einströmenden radonhaltigen Luft gebildet wird, erfasst. Dazu gehört auch die Frischluftzufuhr aus der Außenatmosphäre mit der Radonkonzentration C_{AL} .

Obwohl dieser Modellraum explizit nur einen einzigen Raum einschließt, berücksichtigt er durch die impliziten Verknüpfungen mit allen anderen Räumen und Radonquellen und erlaubt so, alle wichtigen Elemente der Radodynamik zu erfassen. Der Raum ist somit als ein "Mischkessel" von radonhaltiger Luft aus einer oder mehreren Quellen (Bodenluft) und radonarmer Luft der Außenatmosphäre bzw. weiterer implizit angekoppelter Luftwegsamkeiten zu betrachten, die zusammen Gl. (3) für die ein- und austretenden Ströme erfüllen müssen.

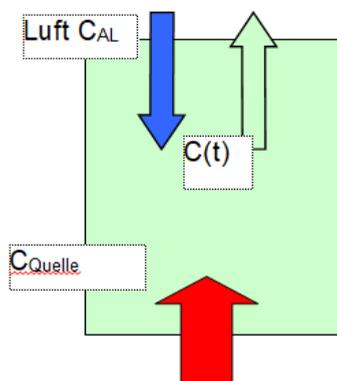


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Kopplungen unterschiedlicher Radonquellen für einen einzelnen Raum

Werden mehrere Räume betrachtet, ergibt sich in Abhängigkeit von den jeweilig angenommenen Kopplungen und den Radonquelltermen ein gekoppeltes System von Differentialgleichungen, das die Radonkonzentrationsentwicklung in jedem einzelnen Raum beschreibt. Dieses System kann numerisch gelöst werden [47]. Sind die Kopplungen nicht zeitunabhängig und z.B. komplizierte Funktionen der Druck- oder Temperaturdifferenzen zwischen den Räumen oder weiterer meteorologischer Größen, kann das resultierende Differentialgleichungssystem nur numerisch gelöst werden, wenn die entsprechenden zeitabhängigen funktionalen Abhängigkeiten bekannt sind bzw. in Form von Messwerten vorliegen. Der Grad der Komplexität des Gleichungssystems wird dabei hauptsächlich durch die Anzahl der betrachteten Kopplungen und Räume bestimmt.

Beim BD Test ist dies der Fall, da durch den z.B. an der Haustür angelegten Unterdruck die Räume im Haus mehr oder minder stark lufttechnisch angekoppelt werden. Hinzu kommt, dass in Räumen eines 2-stöckigen Hauses oder eines Hauses mit Keller sehr unterschiedliche Verfrachtungen des möglicherweise nur aus einem oder zwei Räumen, in die Radon mit der Bodenluft in das Haus eindringt, auftreten werden, die allein durch die Messung der Radonkonzentration vor der Absaugstelle an der Außentür nicht erfassbar sind und somit auch keine Information darüber liefern, wie sich die Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen des Haus bei gewähltem Unterdruck entwickeln werden und in welchen Räumen die eigentlichen Radonintrusionsstellen vorhanden sind. Das bedeutet, dass eine alleinige Messung der Radonkonzentration im aus dem Haus abgesaugten Luftstrom wahrscheinlich nicht ausreicht, die Ergebnisse des BD Tests belastbar zu interpretieren. Diesbezüglich kann das Haus als eine "Blackbox" angesehen werden.

Die Radonkonzentrationsentwicklung in einem einzelnen Raum wird durch die folgende Differentialgleichung beschrieben [47]

$$\frac{\partial C(t)}{\partial t} = -\lambda \cdot C(t) + \frac{1}{V_0} \left[C_{\text{Quelle}} Q_{\text{Quelle}}^{\text{in}} - C(t) Q_{\text{Abstrom}}^{\text{out}} + C_{\text{AL}} Q_{\text{Luft}}^{\text{in}} \right]. \quad (4).$$

Hier ist das Raumvolumen durch V_0 gegeben und der Einfachheit wegen ist die Radonexhalation der Baumaterialien nicht eingeschlossen. Da nur ein Raum betrachtet wird, gilt gemäß

Gl. (3) für die Luftströme, gemessen in $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$,

$$Q_{\text{Abstrom}}^{\text{out}} = Q_{\text{Quelle}}^{\text{in}} + Q_{\text{Luft}}^{\text{in}}. \quad (5)$$

Die Gl. (4) ist z.B. praktisch anwendbar für den Flur eines Hauses vor der Absaugtür des BD Tests. Der Flur kann als ein großer "Mischkessel" betrachtet werden, in dem sich die aus den unterschiedlichen Räumen eintretenden Luftströme mischen und im Abstrom des Radonkonzentrationsstroms $C(t) \cdot Q_{\text{Abluft}}^{\text{out}}$ experimentell bestimmt wird. Unter welchen Randbedingungen diese Größe die Radonquellstärke des neu gebauten Hauses erfasst, wird in den nachfolgenden Ausführungen erläutert.

Die Lösung der Gl. (4) ist

$$C(t) = \frac{\lambda_{\text{LW}} C_{\text{AL}} + \lambda_{\text{Q}} C_{\text{Q}}}{\lambda + \lambda_{\text{LW}} + \lambda_{\text{Q}}} [1 - \exp[-(\lambda + \lambda_{\text{LW}} + \lambda_{\text{Q}}) \cdot t]] + C_{\text{R}}(0) \cdot \exp[-(\lambda + \lambda_{\text{LW}} + \lambda_{\text{Q}}) \cdot t] \quad (6)$$

wobei für die Bodenlufteintrittsrates aus der Quelle in den Raum

$$\lambda_{\text{Q}} = \frac{Q_{\text{Quelle}}^{\text{in}}}{V_0} \quad (7)$$

und für die Eintrittsrates der atmosphärischen Außenluft in den Raum

$$\lambda_{\text{LW}} = \frac{Q_{\text{Luft}}^{\text{in}}}{V_0} \quad (8)$$

eingeführt werden. Die zum Zeitpunkt $t=0$ im Raum herrschende Radonkonzentration ist $C_{\text{R}}(0)$. Die für den gesamten Raum zu betrachtende Lufteintrittsrates ist durch

$$\lambda_{\text{in}} = \frac{Q_{\text{Quelle}}^{\text{in}}}{V_0} + \frac{Q_{\text{Luft}}^{\text{in}}}{V_0} = \lambda_{\text{Q}} + \lambda_{\text{LW}} \quad (9)$$

gegeben und entspricht der im BDT gemessenen Rate im Abstrom, d.h.

$$\lambda_{\text{Abstrom}} = \frac{Q_{\text{Quelle}}^{\text{in}}}{V_0} + \frac{Q_{\text{Luft}}^{\text{in}}}{V_0} = \lambda_{\text{Q}} + \lambda_{\text{LW}} \quad (10)$$

Die sich für $t \rightarrow \infty$ einstellende Radonkonzentration ist durch

$$C_{\text{asympt}} = \frac{\lambda_{\text{LW}} C_{\text{AL}} + \lambda_{\text{Q}} C_{\text{Q}}}{\lambda + \lambda_{\text{LW}} + \lambda_{\text{Q}}} \quad (11)$$

gegeben, wobei die jeweiligen Infiltrationsraten λ_{LW} und λ_{Q} abhängig vom angelegten Unterdruck ΔP sind. Das Produkt

$$Q = \lambda_Q \cdot C_Q \quad (12)$$

wird als Radonquellstärke des betrachteten Raums definiert.

Da praktisch immer $\lambda_{LW} \gg \lambda$ gilt, kann die Radonzerfallskonstante $\lambda = 0,0076 \text{ h}^{-1}$ im Nenner von Gl. (11) vernachlässigt werden. Auch gilt in den praktischen Fällen $\lambda_{LW} \gg \lambda_Q$ bzw.

$\lambda_{LW} \approx \lambda_{\text{Abstrom}}$, da die Radoninfiltrationsrate $\lambda_Q = \frac{Q}{C_0}$ bei einer Radonkonzentration in der Bodenluft von z.B. $C_0 = 100 \text{ kBq/m}^3$ bei etwa $10^{-5} - 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ anzusiedeln ist. Für die zu erwartende Radonkonzentration des asymptotisch erreichbaren Plateaus gilt somit annähernd

$$C_{\text{asympt}} \approx C_{\text{AL}} + \frac{Q}{\lambda_{LW}} = C_{\text{AL}} + \frac{\lambda_Q \cdot C_Q}{\lambda_{LW}} \quad (13)$$

Wird ein BDT durchgeführt, ist die Luftwechselrate λ_{LW} über die im Abstrom gemessene Luftmenge bekannt. Die Radonquellstärke Q kann mit Hilfe von Gl. (13)

$$Q = (C_{\text{asympt}} - C_{\text{AL}}) \cdot \lambda_{LW} \quad (14)$$

einfach berechnet werden, wobei solange abgesaugt werden muss, bis der Plateauwert C_{asympt} annähernd erreicht wird. Ändert sich infolge des BDT das Verhältnis

$$\beta = \frac{\lambda_Q}{\lambda_{LW}} \quad (15)$$

von Radoninfiltrationsrate λ_Q und Außenluftinfiltrationsrate λ_{LW} nicht, bleibt auch der Plateauwert C_{asympt} nach Gl. (13) unverändert. Dies bedeutet, dass die Quellstärke Q mit Erhöhung des Unterdrucks ΔP linear ansteigt, wobei die Anstiegskonstante nach Gl. (14) durch die asymptotisch erreichte Radonkonzentration C_{asympt} gegeben ist und sich im gesamten Unterdruckbereich nicht ändert, solange der Parameter β konstant bleibt. Für die praktische Anwendung des BDT ist dies ein zentraler Gesichtspunkt, da die bei unterschiedlich hohen Unterdrücken erreichten Plateauwerte C_{asympt} im Absaugstrom nach Gl. (13) annähernd übereinstimmen sollten. In dem Fall ist auch eine Rückrechnung der beim BDT gewonnenen Werte auf die im Haus im Normalfall herrschenden Situationen, die bei geringen Unterdrü-

cken im Bereich von 2 - 4 Pa zu erwarten sind, möglich. In dem Fall würde der Vorteil eines BDT voll zu Buche schlagen.

Für kurze Zeiträume von einigen Stunden, d.h.

$$t < \frac{1}{\lambda_{LW}} \quad (16)$$

und $C_R(0)=C_{AL}$, d.h. das Haus ist vor der Durchführung des BDT gelüftet worden, steigt die Radonkonzentration nach der allgemeinen Lösung Gl. (6) im Raum bzw. im Absaugstrom immer linear als Funktion der Zeit an und ist unabhängig von der Luftwechselrate λ_{LW} bei sich verändernden Unterdruck ΔP . Es gilt annähernd

$$C(t) \approx C_{AL} + Q \cdot t, \quad (17)$$

d.h. die Radonquellstärke ist allein durch die Anstiegskonstante der Radonkonzentration im Raum gegeben. Wird z.B. ein BDT bei Unterdrücken von ca. 20 Pa durchgeführt, beträgt in der Regel die Zeitdauer des linearen Anstiegs nur etwa eine Stunde, so dass die mit Hilfe von Gl. (17) bestimmte Radonquellstärke Q im Vergleich zu der aus Gl. (13) ermittelten Quellstärke noch mit großen Fehlern behaftet sein kann. Es ist deshalb zielführender die Unterdruckmessungen bis zum Erreichen des Plateauwerts der Radonkonzentration auszuweiten.

Ist der Raum nicht gelüftet worden und $C_R(0) \gg C_{AL}$, gilt nach der allgemeinen Lösung Gl. (6) für $t < 1/\lambda_{LW}$ näherungsweise

$$C(t) \approx C_R(0) + (Q - C_R(0) \cdot \lambda_{LW}) \cdot t. \quad (18)$$

Die Radonkonzentration im Raum bzw. im Absaugstrom ändert sich linear als Funktion der Zeit, ist aber in diesem Fall abhängig von der beim BDT induzierten Luftwechselrate. Bleibt beim BDT die Radonkonzentration annähernd konstant $C(t) \approx C_R(0)$, ist die Quellstärke durch $Q \approx C_R(0) \cdot \lambda_{LW}$ bestimmt. Fällt oder steigt die Radonkonzentration im Abstrom, ist durch das Produkt $C_R(0) \cdot \lambda_{LW}$ eine obere bzw. untere Grenze der Radonquellstärke gegeben.

3.2 Effekt der Absaugung (Modelluntersuchung)

3.2.1 Vorbemerkung

Bevor die Ergebnisse des BDT ausführlich diskutiert werden, wird anhand von Modellrechnungen zunächst gezeigt, wie sich ein BDT an der Haustür auf die Radonkonzentrationsentwicklung im "Mischkessel" Flur direkt hinter der Haustür auswirkt. Bei der Durchführung des gewöhnlichen BDT werden die Türen innerhalb des Hauses geöffnet und das Haus soweit wie möglich abgedichtet. Die Vorbereitung der Gebäude erfolgte nach DIN EN ISO 9972:2015 [48]. Vorhandene Öffnungen, Lüftungsanlagen usw. werden nach dieser DIN präpariert.

Beim gewöhnlichen BDT [45] spielt praktisch nur der während eines Zeitraums bei einem bestimmten Unterdruck extrahierte Gesamtleckagestrom eine Rolle. Dabei ist völlig unwichtig, ob radonhaltige Luft aus dem Baugrund oder radonarme Luft der Außenatmosphäre in das Haus gesaugt wird. Beim BDT zur Bestimmung der Radondichtheit eines Hauses ist dagegen von Hauptinteresse, wie hoch ist der Luftstrom aus dem Baugrund, wobei der Radonaktivitätsstrom aus der Bodenluft den der angesaugten Außenatmosphäre um mehrere Größenordnungen übertreffen kann. In den praktischen Fällen ist der Radonaktivitätsstrom bei einer Radonaußenluftaktivitätskonzentration $< 15 \text{ Bq/m}^3$ vernachlässigbar gering gegenüber dem aus dem Baugrund kommenden Radonaktivitätsstrom, jedoch wichtig ist zu verifizieren, ob sich bei variierenden Unterdrücken auch das Verhältnis $\beta = \lambda_Q / \lambda_{LW}$ der Bodenlufteintrittsrate Radonintrusionsrate zur Frischlufteintrittsrate annähernd konstant bleibt oder sich wegen eines proportional höheren Frischlufteintritts stark verringert. Im letzten Fall sind mehrere BDT erforderlich, um z.B. die bei vergleichsweise niedrigen Unterdrücken zu veranschlagende Radonquellstärke belastbar bestimmen zu können.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass gemäß des in Kapitel 2.2 konkretisierten Forschungsbedarfs der Luftwechsel im normalen Betriebszustand eines Hauses einen Wert von $0,5 \text{ h}^{-1}$ nicht unterschreiten und gleichzeitig die Radonkonzentrationen in jedem einzelnen Raum im Jahresmittel 300 Bq/m^3 nicht übertreffen sollte. Der erforderliche Luftwechsel sollte dabei in einem nahezu drucklosen Lüftungsregime realisiert werden, d.h. die Luft wird nicht aus dem Haus einfach abgesaugt, sondern es wird gleichzeitig Frischluft zugeführt. Anderenfalls könnte bei erhöhten Unterdrücken mehr Radonbodenluft angesaugt werden als im annähernd drucklosen Regime. Das Vermeiden von zusätzlich angesaugter Bodenluft ist der große Vorteil eines nahezu drucklos arbeitenden Lüftungssystems.

Der Hauptsinn der BD Messung zur Überprüfung der Radondichtheit eines Hauses besteht somit ausschließlich darin, die Radonquellstärke des Hauses für sehr geringe Unterdrücke, die mit geringen Luftwechselraten verknüpft sind, durch erhöhte Unter-

drücke, die deutlich geringere Messzeiten implizieren, zu prognostizieren. In Folgendem werden 2 Szenarien untersucht, um die Wesensmerkmale und Prognosefähigkeit des BDT zu untersetzen.

Wird ein Unterdruck ΔP am Haus angelegt, ändern sich sowohl die Luftwechselrate

$$\lambda_{LW} = \frac{Q_{Luft}^{in}(\Delta P)}{V_0} \quad (19)$$

als auch die Bodenluft Eintrittsrate

$$\lambda_Q = \frac{Q_Q^{in}(\Delta P)}{V_0}, \quad (20)$$

wobei in der Regel eine lineare Abhängigkeit vom Unterdruck ΔP anzunehmen ist. Gegenüber dem Normalbetrieb des Hauses, d.h. unter normalen Nutzungsbedingungen des Hauses, ist beim BDT der Luftaustritt aus dem Haus durch den an der Haustür angelegten Unterdruck vorbestimmt (s. Abbildung 2).

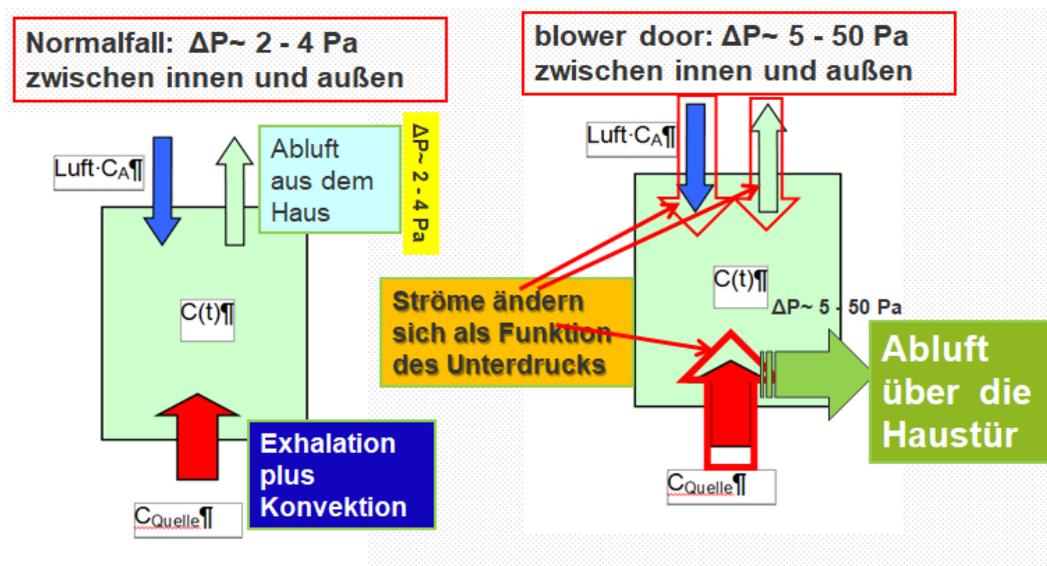


Abbildung 2: Illustration der Luftströme im Modellhaus während normaler Nutzungsbedingungen und während der Absaugung (BDT)

Für die zu erwartende Radonkonzentration des asymptotisch erreichbaren Plateaus nach entsprechend ausreichender Absaugzeit gilt nach Gl. (13)

$$C_{\text{asympt}} \approx C_{\text{AL}} + \frac{Q(\Delta P)}{\lambda_{\text{LW}}(\Delta P)} = C_{\text{AL}} + \frac{\lambda_{\text{Q}}(\Delta P) \cdot C_{\text{Q}}}{\lambda_{\text{LW}}(\Delta P)} \quad (21)$$

Wird proportional genau so viel radonhaltige Luft aus der Quelle wie aus der Außenluft angesaugt, ändert sich das Verhältnis

$$\frac{\lambda_{\text{Q}}(\Delta P)}{\lambda_{\text{LW}}(\Delta P)} = \frac{\lambda_{\text{Q}}}{\lambda_{\text{LW}}} \quad (22)$$

nicht. Bei Vernachlässigung der Radonkonzentration der Außenluft gilt für die sich asymptotisch einstellende Radonkonzentration im Abstrom (s. Gl. (13))

$$C_{\text{asympt}} \approx \frac{\lambda_{\text{Q}}(\Delta P) \cdot C_{\text{Q}}}{\lambda_{\text{LW}}(\Delta P)} \approx \frac{Q(\Delta P)}{\lambda_{\text{LW}}(\Delta P)} = \frac{Q}{\lambda_{\text{LW}}} \quad (23)$$

Somit hängt die asymptotische Radonkonzentration nicht vom Unterdruck ab, wenn sich Luftwechsel- und Infiltrationsrate als Funktion des Unterdrucks im gleichen Maße ändern. Der lineare Anstieg der Radonkonzentration nach dem Lüften des Hauses ist durch

$$C(t < t_0) \approx \lambda_{\text{LW}}(\Delta P) \cdot C_{\text{AL}} + \lambda_{\text{Q}}(\Delta P) \cdot C_{\text{Q}} \cdot t \quad (24)$$

gegeben, d.h. steigt die Infiltrationsrate von radonhaltiger Bodenluft als Funktion eines vergrößerten Unterdrucks an, würde auch je nach Höhe des erreichten Unterdrucks die resultierende Radonkonzentration im Haus deutlich rascher anwachsen. Die Beispiele in den folgenden Kapiteln zeigen jedoch bis auf eine Ausnahme, dass sich $\lambda_{\text{Q}}(\Delta P)$ nur wenig ändert, so dass die Radonkonzentrationen im Abstrom mit Erhöhung des Unterdrucks nicht konstant bleiben, sondern wegen der sich vergrößernden Luftwechselrate je nach Ausgangssituation mehr oder minder stark absinken oder auch unverändert bleiben. Damit signalisieren die Messergebnisse, dass vorwiegend Außen- und nicht radonhaltige Bodenluft angesaugt wird. In diesem Fall geht der große Vorteil einer schnellen Bestimmung der Radonquellstärke Q mittels einer Unterdruckmethode verloren. In den folgenden zwei Szenarien wird dieser Sachverhalt anhand von Modellbeispielen weiter untersetzt.

3.2.2 Szenario (1)

Im Szenario (1) wird angenommen, dass das Haus vor der Durchführung des Unterdruckversuchs zur Bestimmung der Radonquellstärke in Analogie zum gewöhnlichen BDT abgedichtet wurde. Zusätzlich wird unmittelbar vor Beginn der Unterdruckmessphase noch zusätzlich gelüftet, so dass für die allgemeine Modellösung nach Gl. (6) die Radonanfangskonzentration von $C_R(0) = 10 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$ (Außenluftniveau) als Randbedingung fixiert ist. Nach mehreren Stunden Absaugens stellt sich der nach Gl. (11) asymptotisch erreichbare Wert der Radonkonzentration im Haus von

$$C_{\text{asympt}} = \frac{\lambda_{\text{LW}} \cdot C_{\text{AL}} + \lambda_{\text{Q}} \cdot C_{\text{Q}}}{\lambda + \lambda_{\text{LW}} + \lambda_{\text{Q}}} \quad (25)$$

ein. Hierbei ist zu bemerken, dass beim BDT im Abstrom immer die Summe der Infiltrationsraten

$$\lambda_{\text{Abstrom}} = \lambda_{\text{LW}} + \lambda_{\text{Q}} \quad (26)$$

gemessen wird, wobei aber der aus dem Baugrund herrührende Luftstrom gegenüber dem aus der Außenatmosphäre praktisch immer zu vernachlässigen ist. Mit einer beispielhaft gewählten geringen Luftwechselrate von $\lambda_{\text{LW}} = 0,14 \text{ h}^{-1}$ und einer Radonquellstärke von $Q = \lambda_{\text{Q}} \cdot C_{\text{Q}} = 60 \cdot \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}}$, die mit einer angenommenen Radonkonzentration in der Bodenluft von 100 kBq/m^3 mit einer Infiltrationsrate von $\lambda_{\text{Q}} = 0,0006 \text{ h}^{-1}$ kompatibel ist, resultiert ein Plateauwert C_{asympt} von 416 Bq/m^3 , der nach ca. 24 Stunden erreicht wird. Der dazugehörige Unterdruck ΔP beträgt etwa 12 Pa. Der zeitliche Verlauf der Radonkonzentrationsentwicklung ist in der Abbildung 3 (Modell 1) dargestellt.

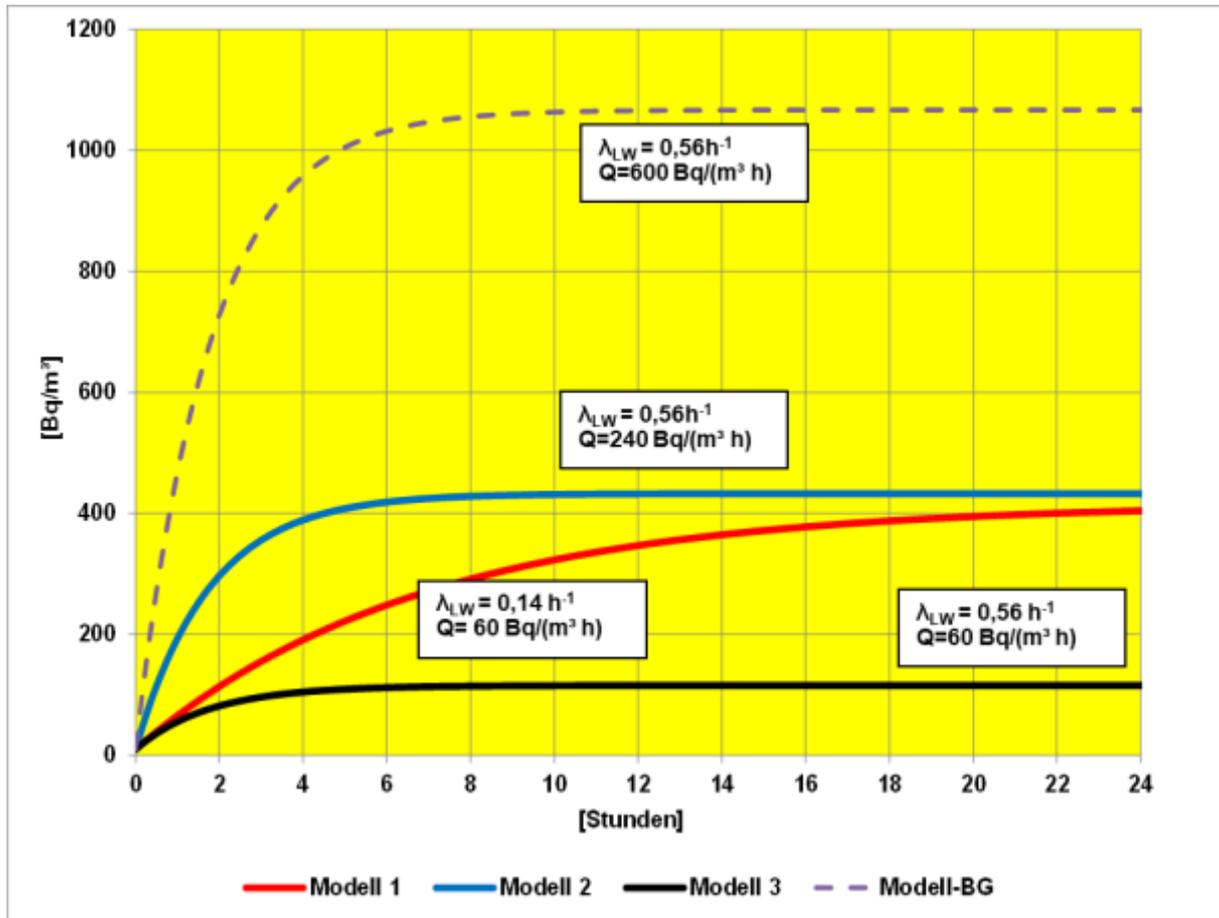


Abbildung 3: Radonkonzentrationsentwicklung in einem Raum mit unterschiedlichen Luftwechselraten und Radonquellstärken des Raums (s. Text für Details)

Wird jedoch der Unterdruck erhöht und gleichzeitig unterstellt, dass sich im Ergebnis des BDT das Verhältnis β der jeweiligen Infiltrationsraten von λ_Q und λ_{LW} (s. Kapitel 3.1) im Abstrom nicht ändert, wird in dieser Situation der nach Gl. (11) definierte asymptotische Wert in einer viel kürzeren Ansaugdauer von wenigen Stunden erreicht. Dieser Umstand wäre ein Vorteil des BDT, wenn sichergestellt ist, dass sich die beim BDT nicht messbare Radoninfiltrationsraten λ_Q bzw. Radonquellstärken Q proportional im gleichen Maße erhöhen, wie die messbaren Luftwechselraten λ_{LW} , d.h. der Parameter β in einem Unterdruckbereich von 2 - 50 Pa annähernd konstant bleibt. Nur in dem Fall ist es möglich, die bei hohen Unterdrücken in vergleichsweise kurzen Zeiträumen gemessenen Radonquellstärken auf die bei deutlich niedrigen Unterdrücken zu erwartenden Radonquellstärken zu extrapolieren.

Beispielhaft sind in der Abbildung 3 (Modell 2) die Ergebnisse für den Fall dargestellt, dass sich im Vergleich zum ersteren Beispiel sowohl die Luftwechselrate als auch die Quellstärke um den Faktor 4 erhöhen ($\lambda_{LW} = 0,56 h^{-1}$, $Q = 240 Bq/(m^3 h)$). Der wichtige Unterschied be-

steht zum ersteren Fall jetzt darin, dass sich der asymptotische Wert bereits in einer viel kürzeren Zeit von ca. 4 Stunden einstellt.

Wird jedoch bei einem bestehenden Unterdruck vorzugsweise mehr Außenluft angesaugt ($\lambda_{LW} = 0,56 \text{ h}^{-1}$), ist der Plateauwert ebenfalls nach wenigen Stunden erreicht, jedoch kann dieser dann je nach Höhe der Infiltrationsrate signifikant geringer als im Fall einer proportionalen Erhöhung der Infiltrationsrate als Funktion des Unterdrucks sein. Dieser Sachverhalt ist in der Abbildung 3 (Modell 3), untersetzt ($\lambda_{LW} = 0,56 \text{ h}^{-1}$, $Q = 60 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \text{ h})$).

Um die im Abstrom gemessenen Radonkonzentrationen bewerten und eine Extrapolation auf bei sehr geringen Unterdrücken herrschenden Radonquellstärken durchführen zu können, ist somit die Kenntnis der Radoninfiltrationsrate bzw. der Radonquellstärke als Funktion des gewählten Unterdrucks bzw. der Luftwechselrate erforderlich. Diese Vorgehensweise ist jedoch mit einem deutlich höheren zeitlichen Mehraufwand verbunden, wobei entsprechende Messungen in etwa 3 - 4 unterschiedlichen Unterdruckregimen, vorzugsweise eher bei geringen Differenzdrücken, durchzuführen sind. Dieser damit verknüpfte vergrößerte Messzeitaufwand schränkt die Einsatzmöglichkeiten des BDT während der Bauabnahme mehr oder minder stark ein. Auf dieses Problem wird noch genauer eingegangen, wenn konkrete BD Messungen ausgewertet werden.

In der Praxis ist davon auszugehen, dass das Verhältnis β der jeweiligen Infiltrationsraten von $\lambda_Q(\Delta P)$ und $\lambda_{LW}(\Delta P)$ im Abstrom nicht unabhängig vom gewählten Unterdruck ist. Es wird im Ergebnis der Fallstudien festgestellt, dass öfters proportional weniger Bodenluft als Luft aus der Außenatmosphäre in das abgedichtete Haus angesaugt werden kann. Die Ursache hierfür ist, dass praktisch keine perfekte Abschottung aller Luftwegsamkeiten (z.B. Fensterrollläden, Küchenabzüge, Fenster, Trockenmauern, Hohlräume zwischen Estrich und Bodengrundplatte, Abdichtungen vom Obergeschoss zum Dach etc.) erreicht wird. Bei einem gewöhnlichen BDT spielt der Umstand, woher die abgesaugte Luft kommt, keine Rolle. Es interessiert nur die bei vorgegebenem Unterdruck erreichte Luftwechselrate bzw. Luftdichtigkeit des Gebäudes. Bei der Erhöhung von Unterdrücken werden auch teilweise Luftwegsamkeiten erschlossen, die bei niedrigen Unterdrücken keine Rolle spielen.

Die in Abbildung 3 angegebene Kurve Modell 3 stellt eine Situation dar, in der trotz vorgenommener Abdichtung durch die noch bestehenden Leckagen im Haus nur vorwiegend Außenatmosphäre angesaugt wird, aber die aus der Bodenluft liefernde Quelle nicht im gleichen Maße bei steigendem Unterdruck entsprechende Radonfrachten nachliefert. Um diesen Sachverhalt zu quantifizieren, müssten mehrere BD Tests durchgeführt werden, was den Messaufwand deutlich vergrößert und die Suche nach Alternativen impliziert.

Von Interesse ist auch der entgegengesetzte Fall, dass bei erhöhtem Unterdruck verhältnismäßig mehr Bodenluft aus dem Baugrund als Außenluft angesaugt wird (Abbildung 3, Modell-BG). In dem Fall steigt die Radonkonzentration im Abstrom innerhalb einer Stunde signifikant an und signalisiert auf diese Weise, dass massive Baumängel zu besorgen sind. Bei unseren Untersuchungen der Radondichtheit von neu gebauten Häusern sind jedoch solche Fälle nicht aufgetreten.

Die im Modell-BG berechnete Anstiegskurve kann jedoch typisch für eine Unterdruckmessung in einem Raum eines Hauses, z.B. Kellerraum bzw. Hausanschlussraum im Haus ohne Keller, sein, der zuvor bereits als Haupteintrittspfad identifiziert worden ist. Wie sich dann das Radon im gesamten Haus verteilt und ob noch weitere Räume ins Kalkül zu ziehen sind, ist nur durch einen zusätzlichen Messaufwand zu klären. Überdies ist durch solch eine einmalige Messung nicht zu erfassen, wie sich die Radonquellstärke als Funktion des Unterdrucks entwickelt. Ein diesbezügliches Beispiel wird im Kapitel 8 diskutiert. In dem Fall wird die gesamte Bodenluft über Leckagen im Heizungsraum des Kellers in das Haus transferiert.

3.2.3 Szenario (2)

Im Unterschied zu Szenario (1) wird im Szenario (2) nach dem Lüften die Radonkonzentrationsentwicklung im Haus über einen Zeitraum von ca. einem Tag unter normalen Druckverhältnissen verfolgt, bevor mit dem eigentlichen BDT begonnen wird.

Bei einer Aufstellung von Radonmonitoren in einer geeigneten Auswahl von Aufenthaltsräumen lassen sich dann aus den über einen gewissen Zeitraum erhaltenen Ergebnissen zu den jeweiligen Radonkonzentrationsentwicklungen direkte Informationen zur Ankopplung der Räume an die jeweiligen Radonquellen gewinnen. Dies wurde in dem Forschungsvorhaben [49] bereits ausführlich untersucht. Werden in allen Räumen gleichzeitig die zeitlichen Entwicklungen der Radonkonzentrationen aufgezeichnet, kann somit auch die Gesamtradonquellstärke des Hauses berechnet und auch Informationen über die während der Messungen herrschenden Luftwechselraten gewonnen werden. Letztere gelten natürlich nur für die zu diesem Zeitpunkt zu berücksichtigenden Randbedingungen.

Die Höhe des sich bei solchen Messungen einstellenden Fließgleichgewichts der Radonkonzentration in einzelnen Räumen oder im gesamten Gebäude liefert somit auch eine zusätzliche aber wichtige Information, die bei der Bewertung eines sich bei einem anschließenden BDT resultierenden Radonkonzentrationsplateauwerts zu berücksichtigen ist. Außerdem kann bereits aus der zeitlichen Entwicklung der Radonkonzentration bis hin zum Fließgleichgewicht die Radonquellstärke und die Luftwechselrate nach der allgemeinen Modelllösung Gl. (6) für die nahezu unterdrucklose Anfangsphase bestimmt werden, so dass auf den BDT vollständig verzichtet werden kann. Denn nach ca. 6 - 12 Stunden kann aus dem linearen

Anstieg die Radonquellstärke gemäß Gl. (17) bestimmt und mittels Gl. (13) die im Normalbetrieb resultierende Radonkonzentration im Raum mit Hilfe der zu betrachtenden Luftwechselrate von $0,5 \text{ h}^{-1}$ sehr genau abgeschätzt werden. Alternativ müsste im Ergebnis der BT Tests berechnet werden, wie hoch die Quellstärke unter normalen Nutzungsbedingungen ist. Ein großer Vorteil der im Forschungsvorhaben [49] entwickelten Anstiegsmethode besteht auch darin, dass über die Radonkonzentrationsentwicklung die Luftwechselrate im Haus sehr genau bestimmt werden kann, ohne dass z.B. Tracergase aufgegeben werden müssten.

Des Weiteren ist hier im Vorgriff auf die noch zu diskutierenden Messergebnisse in den nachfolgenden Kapiteln zu bemerken, dass sich wechselnde Winde praktisch kaum auf die Radoneintrittssituation im Gebäude nachhaltig auswirken, da die Radonintrusion und die Verteilung der Radonfrachten in Abhängigkeit von den Witterungserscheinungen, verglichen zu den Zeitskalen der Luftdruckänderungen ein sehr langsamer Prozess ist. Auffrischende Winde bewirken hauptsächlich eine instantane Änderung des Luftwechsels, die je nach Stärke des Druckanstiegs oder -abfalls zu Radonkonzentrationschwankungen im Gebäude führen können. Wird jedoch die Radonkonzentrationsentwicklung über mehrere Stunden verfolgt, fallen diese nicht mehr ins Gewicht. Es sei denn ein Sturmtief herrscht über mehrere Stunden. Bei solchen extremen Bedingungen sollten entsprechende Messungen zur Radonquellstärke nicht ins Auge gefasst werden. Bei einem klassischen BDT, der üblicherweise nur wenige Minuten dauern kann, sind jedoch Einschränkungen hinsichtlich der kurzzeitig sich ändernden Witterungseinflüsse immer zu beachten (s. z.B. [45]), da in diesem Fall Luftströme als Funktion eines Differenzdrucks gemessen werden und nicht die Änderung von Aktivitätskonzentrationen im Luftstrom.

Wird nach dem Einstellen des Fließgleichgewichts im abgedichteten Haus mit dem BDT begonnen, können die in der Abbildung 4 dargestellten qualitativ unterschiedlichen Radonkonzentrationsentwicklungen im Abstrom resultieren, die ihrerseits richtungsweisende Informationen über das Verhältnis β der jeweiligen Infiltrationsraten von λ_Q und λ_{LW} im Abstrom sowie indirekt auch über die Radonquellstärke Q des Hauses liefern. Quantitative Ergebnisse für die interessierende Radonquellstärke Q bzw. über die dazugehörige Radoninfiltrationsrate λ_Q aus dem Baugrund sind jedoch nur über zusätzliche Unterdruckmessungen und mit Hilfe von Modellrechnungen ableitbar.

In den am häufigsten vorkommenden Fällen von BD Anwendungen ist davon auszugehen, dass nach der Abdichtung des Hauses und mehreren Stunden Anklingzeit in der nahezu unterdrucklosen Anklingphase die erreichte Radonkonzentration mehr oder minder stark absinkt, sobald die Induzierung eines merklichen Unterdrucks einsetzt. Diese Situation wird durch die Ergebnisse in der Abbildung 4 (Modell 1) beschrieben, wobei nach der allgemeinen

Lösung Gl. (6) die Abfallkonstante $\tilde{\lambda} = \lambda + \lambda_{LW} + \lambda_Q$ meistens allein durch den beim BDT induzierten Luftwechsel bestimmt ist, da praktisch immer $\lambda_{LW} \gg \lambda + \lambda_Q$ gilt. Die Radonzerfallskonstante von $\lambda = 0,075 \text{ h}^{-1}$ ist tatsächlich nur im Fall extrem kleiner Luftwechselraten zu berücksichtigen.

Die Radoninfiltrationsrate $\lambda_Q = \frac{Q}{C_0}$ ist bei einer Radonkonzentration in der Bodenluft von

$C_0 = 100 \text{ kBq/m}^3$ bei etwa $10^{-4} - 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ anzusiedeln und somit meistens immer gegenüber λ und λ_{LW} vernachlässigbar. Deshalb kann die Luftwechselrate λ_{LW} über das im BDT bestimmte Abstromvolumen, gemessen in m^3/h , berechnet werden. Somit manifestiert das Absinken der Radonkonzentration, dass sich durch den herrschenden Unterdruck das Verhältnis β der Infiltrationsraten von Außen- und Bodenluft zu Gunsten der Außenluft gegenüber dem der Anfangsphase mehr oder minder stark verändert hat. Dieser Sachverhalt ist bei der Interpretation und Bewertung der Radondichtheit des zu untersuchenden Hauses unbedingt zu beachten und richtungweisend für die Interpretation der BD Ergebnisse.

Zusammenfassend kann somit konstatiert werden: Fällt die Radonkonzentration im Abstrom nach Anlegung eines Unterdrucks mehr oder minder stark ab, ist dies ein direkter Hinweis darauf, dass bei der gewählten Unterdruckstufe proportional mehr Außenluft aus der Außenatmosphäre als aus dem Baugrund abgesaugt wird. Zur Quantifizierung der Radonquellstärke im normalen Nutzungszustand eines Hauses sind somit mehrere BD Messungen erforderlich, um die Abhängigkeit der Quellstärke Q vom Differenzdruck bestimmen und eine belastbare Extrapolation auf die tatsächlich herrschende Radonkonzentration im normalen Nutzungszustand des Hauses durchführen zu können.

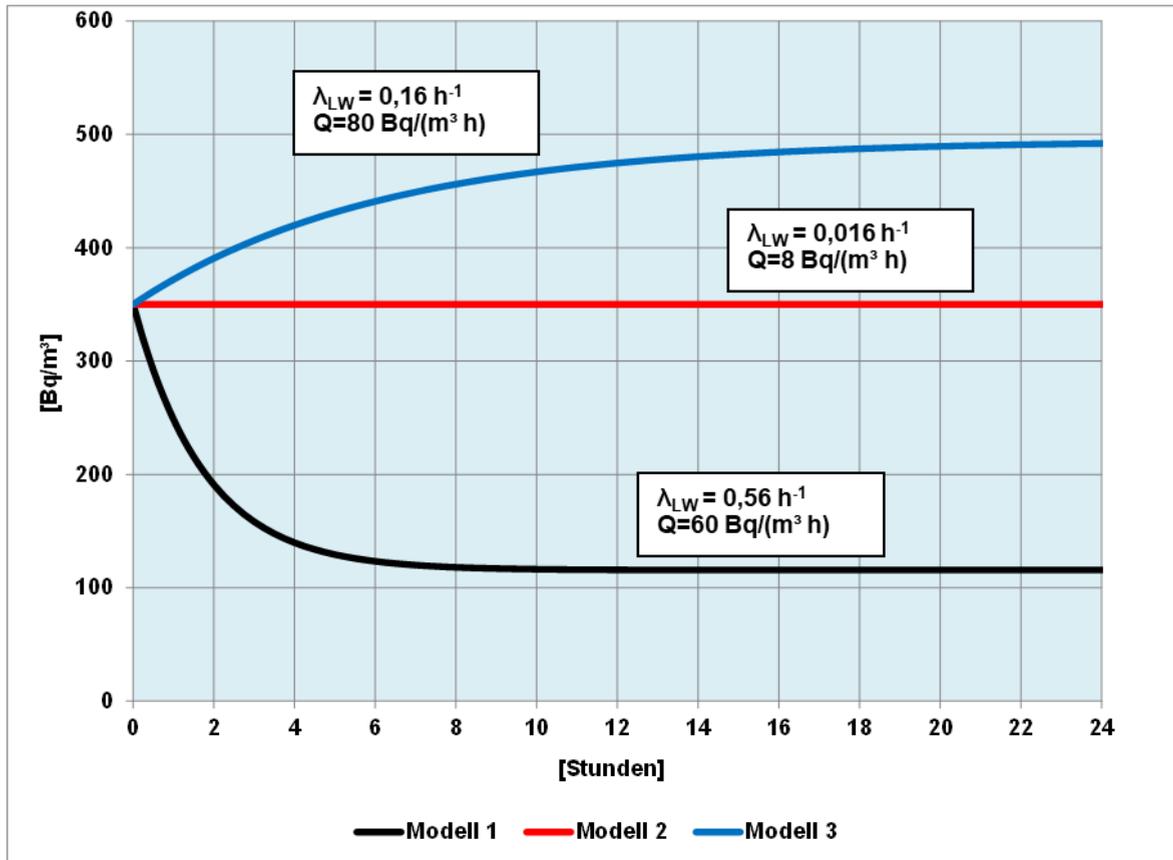


Abbildung 4: Wie Abbildung 3, jedoch die anfänglichen Radonkonzentrationen sind 350 Bq/m³

Ob die Anfangsradonkonzentration im Haus durch das Lüften auf ca. 10 Bq/m³ (Außenluftniveau, Modell 3 in Abbildung 3) abgesenkt wurde oder sich auf 350 Bq/m³ wie im hier diskutierten Fall (Modell 1 in Abbildung 4) in der Anfangsphase erhöht hat, sind die sich im Ergebnis des BDT entwickelnden Radonkonzentrationen nach einigen Stunden Absaugung praktisch identisch. Jedoch wird nur im letzteren Fall ein ausgeprägter exponentieller Abfall beobachtet, der für die Interpretation der BD Ergebnisse von entscheidender Wichtigkeit sein kann. Die Kenntnis der Anfangsbedingungen hinsichtlich der Radonsituation im Haus und die Abfolge der Druckstufen sind somit für eine praktische Anwendung des BDT von großer Bedeutung. Für die Charakterisierung der Radonsituation im Haus sind jedoch problemangepasste Vorabmessungen erforderlich, die ihrerseits gezielte BD Messungen als obsolet erscheinen lassen könnten.

Bleibt dagegen bei einem sehr geringen Unterdruck die im Abstrom gemessene Radonkonzentration annähernd vergleichbar mit der des sich asymptotisch einstellenden Fließgleichgewichts, kann mit der im BDT bestimmten Luftwechselrate die Radonquellstärke unmittelbar deduziert werden. Der in der Abbildung 4 anhand der Kurve Modell 2 diskutierte Fall be-

schreibt die partikuläre Situation, dass durch eine Absaugung mit sehr geringem Unterdruck die sich nach dem Fließgleichgewicht resultierende Radonkonzentration nicht mehr ändert. Einen weiteren in der Praxis vorkommenden Fall beschreibt die in der Abbildung 4 dargestellte Kurve Modell 3. Es ist zu erkennen, dass sich trotz einer vergleichsweise hohen Anfangsradonkonzentration von 350 Bq/m³ die Radonkonzentration im Abstrom noch weiter erhöht, wenn ein Unterdruck angelegt wird. Dieses Verhalten ist ein Indiz dafür, dass sich im betrachteten Unterdruckregime sowohl die Luftwechsel- als auch die Radoninfiltrationsrate proportional im gleichen Maße annähernd vergrößern.

3.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die resultierende Radonquellstärke eines Hauses ist eine Funktion des Unterdrucks, der im BDT angewendet wird. Nur im Idealfall bleibt das Verhältnis von Radoninfiltrations- und Luftwechselrate

$$\beta = \frac{\lambda_Q}{\lambda_{LW}} = \frac{\lambda_Q}{\lambda_{Abstrom} - \lambda_Q} \quad (27)$$

auch bei steigenden Unterdrücken konstant und erlaubt somit die bei sehr hohen Absaugraten ermittelte Radonquellstärke auf die bei niedrigen Unterdrücken existierende Radonquellstärke zu extrapolieren. In der Praxis trifft dies bei Neubauten eher nur sehr selten zu, da beim Erhöhen des Ansaugunterdrucks proportional deutlich mehr Außenluft aus der Atmosphäre als aus der Bodenluft in das Gebäude transportiert wird. Nur wenige Beispiele sind den Autoren aus der Praxis bekannt, in denen die abgesaugte Luft hauptsächlich aus einem Reservoir mit hoher Radonkonzentration (z.B. Medienschächte, an das Haus angekoppelte Hohlräume etc.) stammte. Ist, wie in Abbildung 5 dargestellt, die Abhängigkeit der Quellstärke von der Luftwechselrate λ_{LW} linear, kann unmittelbar von bei großen Unterdrücken gemessenen Radonquellstärken auf die bei kleinen Unterdrücken herrschenden Radoninfiltrationsraten zurückgeschlossen werden. Dies wäre ein großer Vorteil des Unterdruckversuchs, da bei Unterdrücken von 50 Pa und Luftwechselraten λ_{LW} in Bereich von etwa 1 h⁻¹ in der Regel der Plateauwert nach ca. 3 - 4 Stunden erreicht wird. Die Verifizierung der linearen Abhängigkeit erfordert jedoch zumindest weitere 2 - 3 BD Messungen bei unterschiedlichen Unterdrücken, wobei bei geringeren Luftwechselraten, wie anhand der Ergebnisse in den Abbildungen 3 und 4 illustriert, deutlich längere Messzeiten von 12 - 24 Stunden pro Unterdruckstufe ins Auge zu fassen sind, die letztlich auch die Einsatzmöglichkeiten eines einzi-

gen BDT zur Bestimmung der Radonquellstärke im Rahmen der Bauübergabe stark einschränken.

Vielmehr wird häufig der Fall beobachtet, dass mit steigendem Unterdruck die Luftwechselrate λ_{LW} stärker zunimmt als die Radoninfiltrationsrate λ_Q bzw. die dazugehörige Quellstärke (s. Abbildung 5). Dieser Umstand erfordert eine belastbare Umrechnung der bei einem BDT bestimmten Radonquellstärke für die Bewertung der Radondichtheit benötigten tatsächlichen Radonquellstärke. Diese funktionalen Abhängigkeiten sind jedoch wiederum nur durch zusätzliche BD Messungen zu realisieren. Das Ziel der zusätzlichen BD-Messungen besteht darin, den Zusammenhang von Radonquellstärke und Absaugstrom in einem erweiterten Unterdruckbereich zu identifizieren, um daraus eine Quellstärkenbestimmung unter Normalbedingungen durchführen zu können. Zu diesem Zweck sind Messungen bei Unterdrücken von < 10 Pa bis < 5 Pa erforderlich. Unter diesen Vorgaben steigt der zeitliche Messaufwand auf 12 - 24 Stunden an.

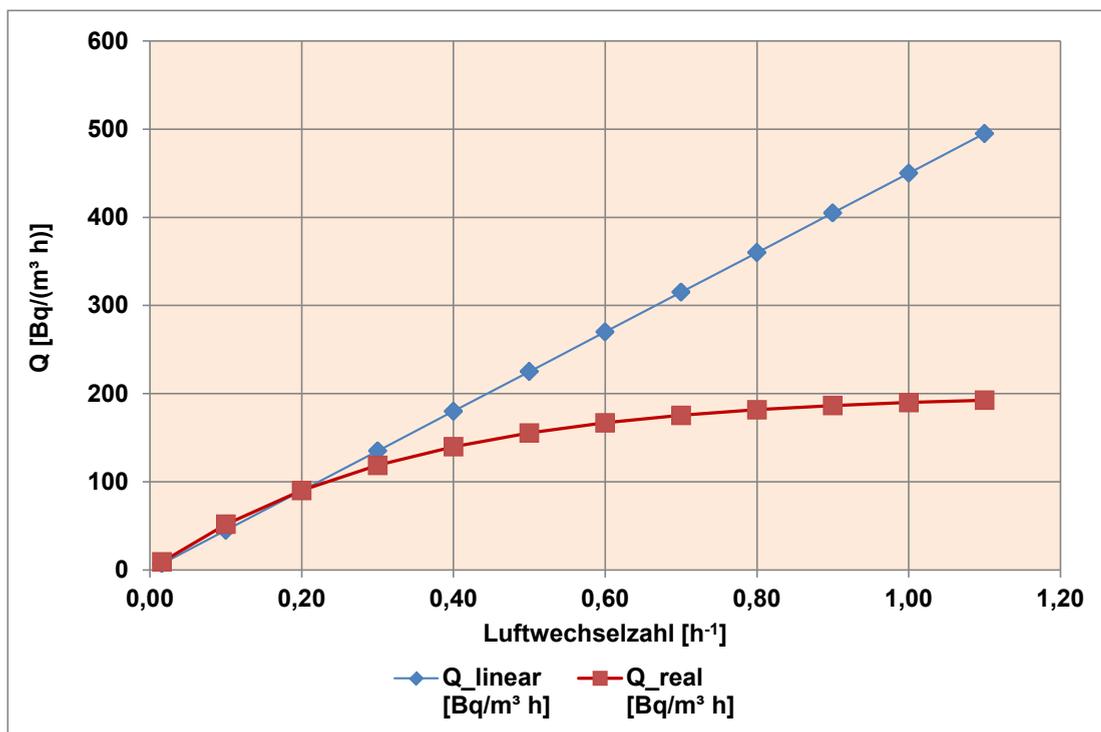


Abbildung 5: Radonquellstärke Q als Funktion der Luftwechselrate für zwei unterschiedliche Abhängigkeiten von λ_{LW} und λ_Q

Neu gebaute Häuser verfügen oftmals über eine technische Lüftung, die den erforderlichen Luftwechsel nicht durch eine erhöhte Absaugungsrate wie im BDT, sondern durch geringe Druckdifferenzen zwischen hohen Zu- und Abluftraten im Bereich von 1 - 3 Pa realisieren (s.

z.B. Ergebnisse im Kapitel 4). In diesem Fall ist die Radonquellstärke Q_{normal} im Niederdruckbereich von etwa 2 Pa zu bestimmen. Die dann im Haus zu erwartende Radonkonzentration C_{normal} ergibt sich nach Gl. (13) durch

$$C_{\text{normal}} \approx \frac{Q_{\text{normal}}}{0,5h^{-1}}. \quad (28)$$

Die Radonquellstärke Q_{normal} im Haus kann nach Abschaltung der Lüfter aus dem linearen Anstieg der Radonkonzentrationen nach dem Lüften des Hauses sehr genau bestimmt werden (s. z.B. Beispiel Objekt 1 in Kapitel 4). Während der Messung kurzzeitig variierende Witterungsbedingungen fallen dabei, wie bereits in Kapitel 3.2.3 (Szenario 2) diskutiert, wegen Messzeiträumen von ca. 2 - 4 Stunden nicht ins Gewicht.

Eine Extrapolation der bei signifikant höheren Unterdrücken gemessenen Radonquellstärke im BDT auf die bei niedrigen Unterdrücken zu erwartende Quellstärke kann mit hohen Unsicherheiten behaftet sein, so dass sich die Frage stellt, ob eine Unterdruckmessung überhaupt bzw. unter welchen Randbedingungen eine zu favorisierende zuverlässige Methode ist, die Radondichtheit eines Hauses zweifelsfrei belegen zu können.

Wird im BDT proportional mehr Luft aus der Außenatmosphäre als aus dem Baugrund angesaugt, fällt die Radonkonzentration im Abstrom rasch exponentiell ab, wenn sich vorher nach der Abdichtung des Hauses und einer Anklingzeit von mehreren Stunden bzw. von einem Tag ein annäherndes Fließgleichgewicht der Radonkonzentration im Haus herausgebildet hat, das zu Beginn des BDT gemessen wird. Hieraus folgt als eine alleinige aber richtungsweisende Schlussfolgerung, dass das Verhältnis β der jeweiligen Infiltrationsraten von λ_Q und λ_{LW} (s. Kapitel 3.1) infolge des induzierten hohen Unterdrucks sich mehr oder minder stark geändert hat. Wird jedoch der BDT bei deutlich geringen Radonanfangskonzentrationen durchgeführt, wird zwar das gleiche asymptotisch erreichbare Radonfließgleichgewicht erhalten, jedoch kann nicht entschieden werden, ob sich λ_Q und λ_{LW} im gleichen Maße entwickeln. Letztlich wird die so bestimmte Radonquellstärke Q wahrscheinlich um ein Vielfaches höher sein als die tatsächlich für den Unterdruckbereich von wenigen Pa zuzuordnende Quellstärke.

Je nach Anfangsradonkonzentration im Haus liefert der BDT eine Radonkonzentrationsentwicklung des Abstroms, dessen Radonaktivitätskonzentration höher, gleich oder niedriger als der Anfangswert ist. Nur im partikulären Fall, dass sich die Radonkonzentration im Vergleich zum Anfangswert kaum ändert, kann die im Abstrom gemessene Radonquellstärke einfach auf die des Hauses unter den Normalbedingungen extrapoliert werden. Im Fall, dass sich die Radonkonzentration stark verringert oder auch erhöht, ist eine Extrahierung der

Quellstärke eines Hauses ohne Zusatzinformationen über das Verhältnis β der jeweiligen Infiltrationsraten λ_Q und λ_{LW} in Abhängigkeit vom Unterdruck nicht möglich. In jedem Fall muss aber garantiert sein, dass die bei hohen Unterdrücken gewonnenen Quellstärken auf eine Situation mit sehr niedrigen Unterdrücken aber hohen Luftwechselraten von $0,5 \text{ h}^{-1}$ belastbar skaliert werden können.

Weitere Unsicherheiten kommen hinzu, wenn sich trotz geöffneter Türen bei BDT die Räume mit höchsten Radoneintrittsraten nur sporadisch mit dem "Mischkessel" Flur austauschen. In dem Fall wird im Abstrom des BD eine deutlich geringere Radonkonzentration gemessen und somit die Radonquellstärke des Hauses mehr oder minder stark unterschätzt bzw. die Radonundichtheit des Hauses als zu gering eingestuft. Diese Situation verschärft sich noch im realen Fall, wenn der Luftaustausch durch geschlossene Türen weiter unterminiert wird.

Wird die aus der Hauptleckage stammende Radonfracht vorwiegend mehr oder minder stark abgesaugt, ehe eine ausreichende Vermischung mit dem restlichen Haus erfolgen kann, kann infolgedessen nur die Quellstärke eines Teilbereichs des Hauses bestimmt werden, die die tatsächlich zu veranschlagende Radonquellstärke für das gesamte Haus im ungünstigsten Fall stark überschätzt.

Die hier beschriebenen Fälle treten in der Praxis auf und werden anhand von Beispielen im Kapiteln 4 - 9 weiter untersetzt. Aus den dort dargestellten Ergebnissen wird folgen, dass nach unserer Kenntnis nur dann eine belastbare Prognose für die Radondichtheit eines Hauses im Sinne einer Unterschreitung $< 300 \text{ Bq/m}^3$ in jedem einzelnen Raum des Hauses im Langzeitmittel gegeben werden kann, wenn zusätzlich zum BDT in allen Räumen die Radonkonzentrationen über einen Zeitraum von 12 - 24 Stunden gemessen werden. Doch dann stellt sich die Frage nach dem Sinn des BDT, da nur mit der alleinigen Kenntnis der Höhe der Radonkonzentration im Abstrom und der Höhe des Abstromvolumens keine belastbare Interpretation der BDT Ergebnisse erzielt werden kann. Ein nur wenig spezifiziertes BD Verfahren könnte wahrscheinlich benutzt werden, um Aussagen zu treffen, ob das Haus mit Sicherheit nicht als radondicht zu bezeichnen ist. Jedoch eine Garantie über eine eventuelle Radondichtheit des Hauses im Sinne der obigen Definition, dass in allen Aufenthaltsräumen das Langzeitmittel der Radonkonzentrationen $< 300 \text{ Bq/m}^3$ ist, kann nicht gegeben werden. Sollten bei niedrigen Unterdrücken von 5 - 15 Pa Doppelmessungen durchgeführt werden, sind immer mehr als 24 Stunden Messzeit insgesamt einzuplanen, um belastbare Ergebnisse zu erhalten.

Man kann alternativ ein fertig gestelltes Haus abends vor der Abnahme am nächsten Tag (Praxis bei IAF) nach dem Abdichten stark lüften und dann die Radonkonzentrationsentwicklung in allen Räumen des Hauses aufzeichnen und somit auch, wie gezeigt, die Ra-

donquellstärke des Hauses sehr genau bestimmen. Am nächsten Tag könnten aus den vorliegenden Ergebnissen die Radondichtheit des Hauses und die zu erwartenden Radonkonzentrationen in jedem einzelnen Zimmer belastbar prognostiziert werden. Diese Vorgehensweise ist in dem BfS Vorhaben [49] an 10 Häusern praktiziert worden. Inwieweit ein nachgeschalteter BDT noch weiterführende Erkenntnisse liefert bzw. dazu führt, dass bereits nach wenigen Stunden ein belastbares Ergebnis vorliegt, wird im Nachfolgenden anhand von Praxisbeispielen ausgelotet. Im Vordergrund steht dabei, unter welchen Bedingungen ein BDT sinnvoll ist und welche Prognosesicherheit mit den alleinigen Kenntnissen über die Radonkonzentration in der abgesaugten Luft und den Luftstrom bei vorgegebenen Unterdruck erreicht werden kann.

4 Ergebnisse eines BDT: Objekt 1 (Haus mit mechanischer Lüftungsanlage)

4.1 Beschreibung des Hauses

Das Untersuchungsobjekt 1 ist ein frei stehendes Einfamilienhaus (Baujahr 2013). Es ist nicht unterkellert und hat keine Hanglage, so dass nur über die Bodenplatte ein erdberührender Kontakt von Gebäudebauteilen besteht. Das Haus hat einen offenen Treppenaufgang zwischen dem Erdgeschoss und dem Obergeschoss. Das Haus verfügt über einen ungeheizten Spitzboden, der über eine Deckenklappe mit integrierter Leiter zu erreichen ist. Dieser Bereich wurde aus allen Untersuchungen ausgegliedert. Diese Vorgehensweise entspricht auch der Prüfvorschrift entsprechend der Energiesparverordnung [46].

Das Haus wird über eine Luftwärmepumpe in Verbindung mit einem Solarpanel beheizt und verfügt über eine mechanische Lüftungsanlage. Die Raumaufteilung und die Installation des Lüftungssystems sind aus der Abbildung 6 zu entnehmen. Die Lüftung arbeitet kontinuierlich und kann zwischen den Stufen $30 \text{ m}^3/\text{h}$ und $60 \text{ m}^3/\text{h}$ für die drei vorhandenen Lüfter geändert werden. Das System wird durch die Eigentümer kontinuierlich in der unteren Stufe betrieben, so dass eine Frischluftzufuhr von $90 \text{ m}^3/\text{h}$ (drei Lüfter mit $30 \text{ m}^3/\text{h}$) vorliegt. Das entspricht bei einem Gesamtvolumen der beheizbaren Hülle des Hauses von 377 m^3 einer Luftwechselrate von $0,24 \text{ h}^{-1}$.

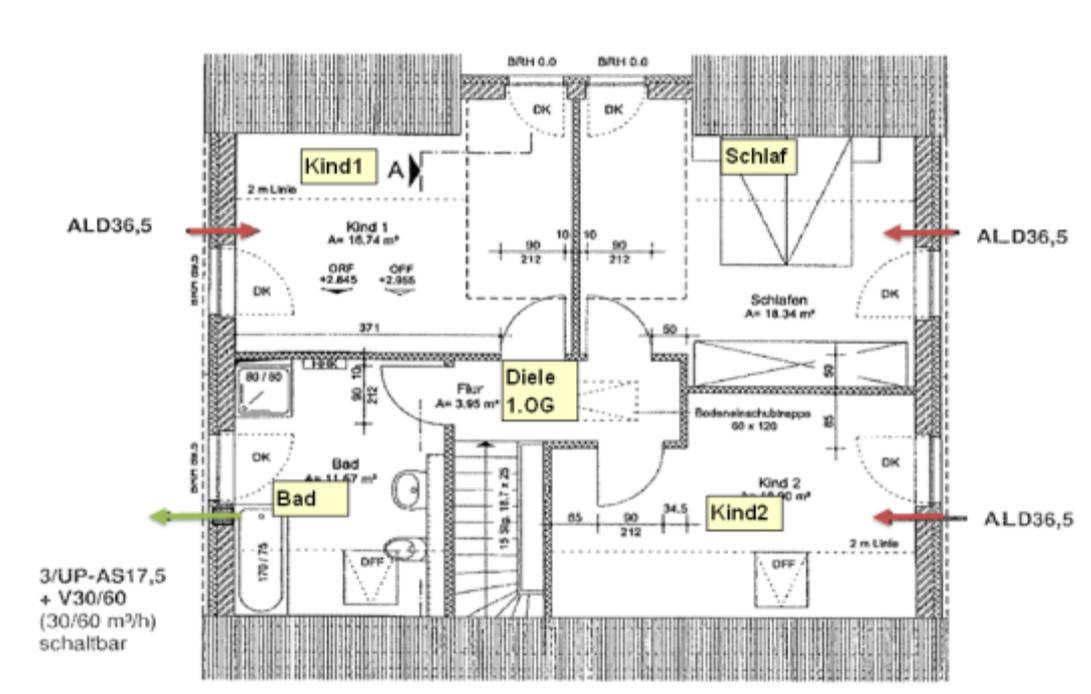
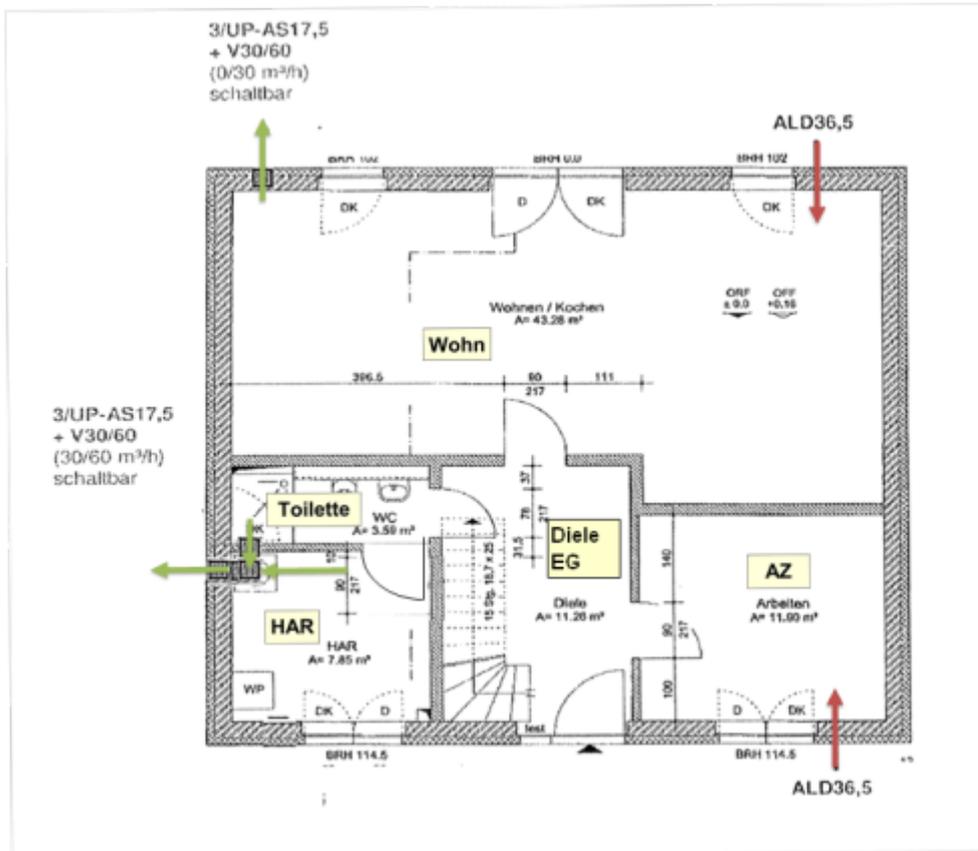


Abbildung 6: Darstellung des Hauses (Erdgeschoss, oberes Bild), (Obergeschoss, unteres Bild) die grünen und roten Pfeile markieren die vorhandenen Luftein- und austrittsöffnungen

Den Eigentümern liegt eine Dichtheitsprüfung im Zuge der Bauabnahme in Form eines Zertifikates vor. Im Zertifikat wurde ein Luftwechsel von

$$n_{50} = 1,06 \text{ h}^{-1}$$

ausgewiesen.

Die Ergebnisse der Dichtheitsmessungen im Rahmen des Projekts sind in der Abbildung 7 zusammengestellt. Die eigenen Messungen am 25.04.2017 führten zu den in der Tabelle 3 zusammengestellten Ergebnissen. Die etwas niedrigeren Werte für die Luftwechselrate der aktuellen Messungen gegenüber der beim ursprünglichen BDT sind auf die verbesserte Abdichtung des mechanischen Lüftungssystems bei Durchführung des BDT zurückzuführen.

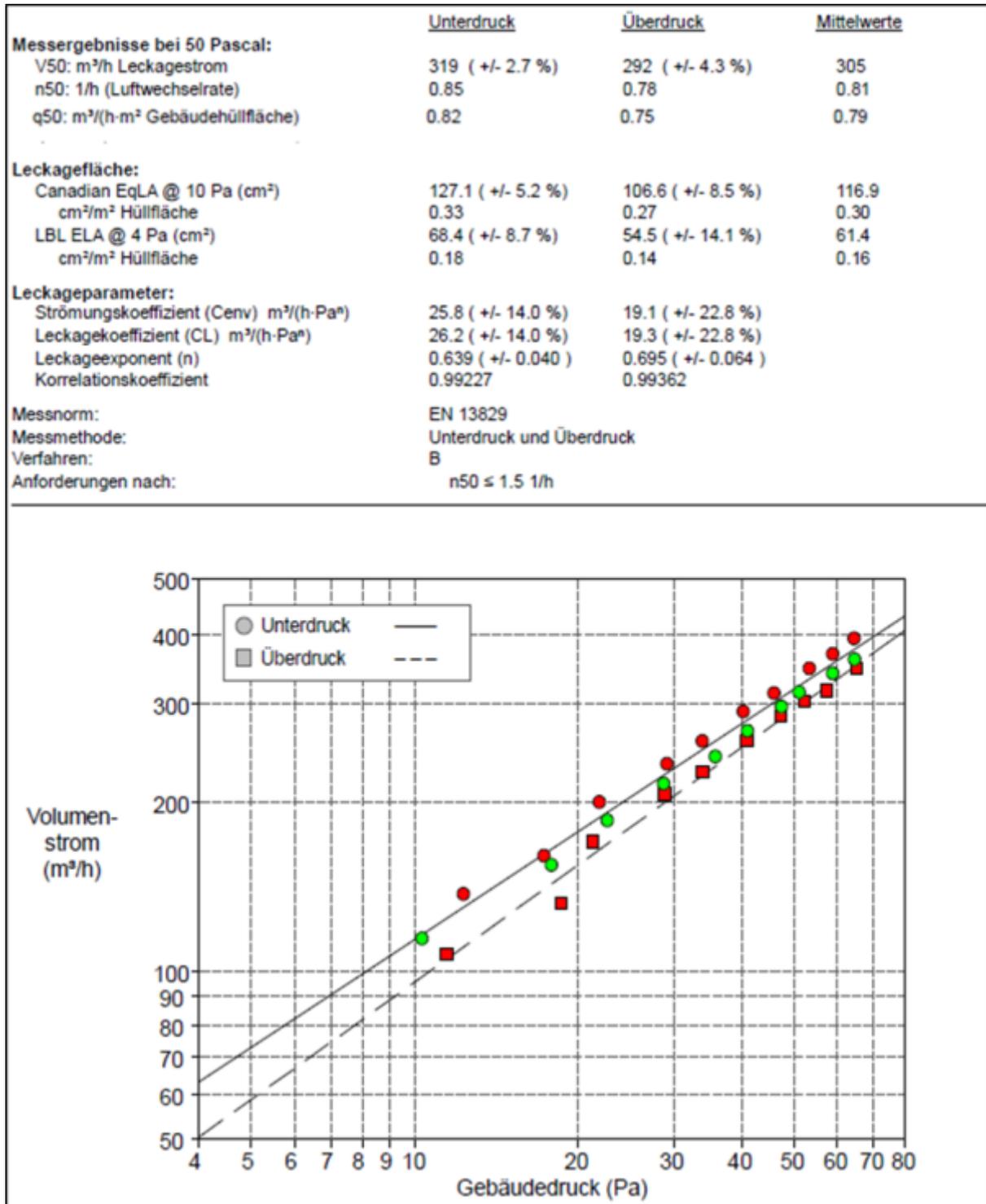


Abbildung 7: Ergebnisse des Blower Door Tests (BDT) im Rahmen des Projekts

Tabelle 3: Übersicht über die Volumenströme und Luftwechselraten, die bei den BDT benutzt wurden.

| Druckverhältnisse | n₅₀ Luftwechselrate [h⁻¹] | Leckagestrom [m³/h] |
|--------------------------|--|---|
| Unterdruck | 0,85 | 319 |
| Überdruck | 0,75 | 292 |
| Mittelwert | 0,81 | 305 |

4.2 Zur Radonsituation des Hauses

Zur Manifestierung der Radonkonzentrationsentwicklung im gesamten Haus wurden im Vorfeld des BDT die jeweiligen Radonkonzentrationen in allen Räumen zeitaufgelöst im 10-Minutentakt gemessen und zusätzlich auch die Druckdifferenzen zwischen den Räumen sowie zur Außenatmosphäre bestimmt. Das Haus verfügt über 10 Räume. Die einzelnen Raumvolumina sind in der Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Übersicht über die Volumina der einzelnen Räume des Hauses

| Raum | Geschoss | Raumvolumen [m³] |
|--------------------------|-----------------|--|
| Arbeitszimmer (AZ) | EG | 31 |
| Wohnzimmer (WZ) | EG | 113 |
| Hausanschlussraum (HAR) | EG | 20 |
| Toilette | EG | 9 |
| Flur | EG | 29 |
| Flur | OG | 11 |
| Bad | OG | 30 |
| Schlafzimmer | OG | 48 |
| Kinderzimmer 1 | OG | 44 |
| Kinderzimmer 2 | OG | 42 |
| Summe Erdgeschoss | | 202 |
| Summe 1.OG | | 175 |
| Gesamt | | 377 |

In der Abbildung 8 sind die Ergebnisse der Radonmessungen (Messintervall 1 Stunde) in dem untersuchten Zeitraum von ca. 9 Tagen dargestellt, wobei zunächst nur die mittleren Radonaktivitätskonzentrationen im gesamten Haus sowie die im Erd- und Obergeschoss und zusätzlich die im Flur, aus dem später beim BDT abgesaugt wurde, betrachtet werden. Während dieser Messungen war die Lüftung des Hauses nicht im Betrieb. Die jeweiligen Einzelmaßnahmen (Aktionen) während der Messungen sind in der Tabelle 5 aufgeschlüsselt.

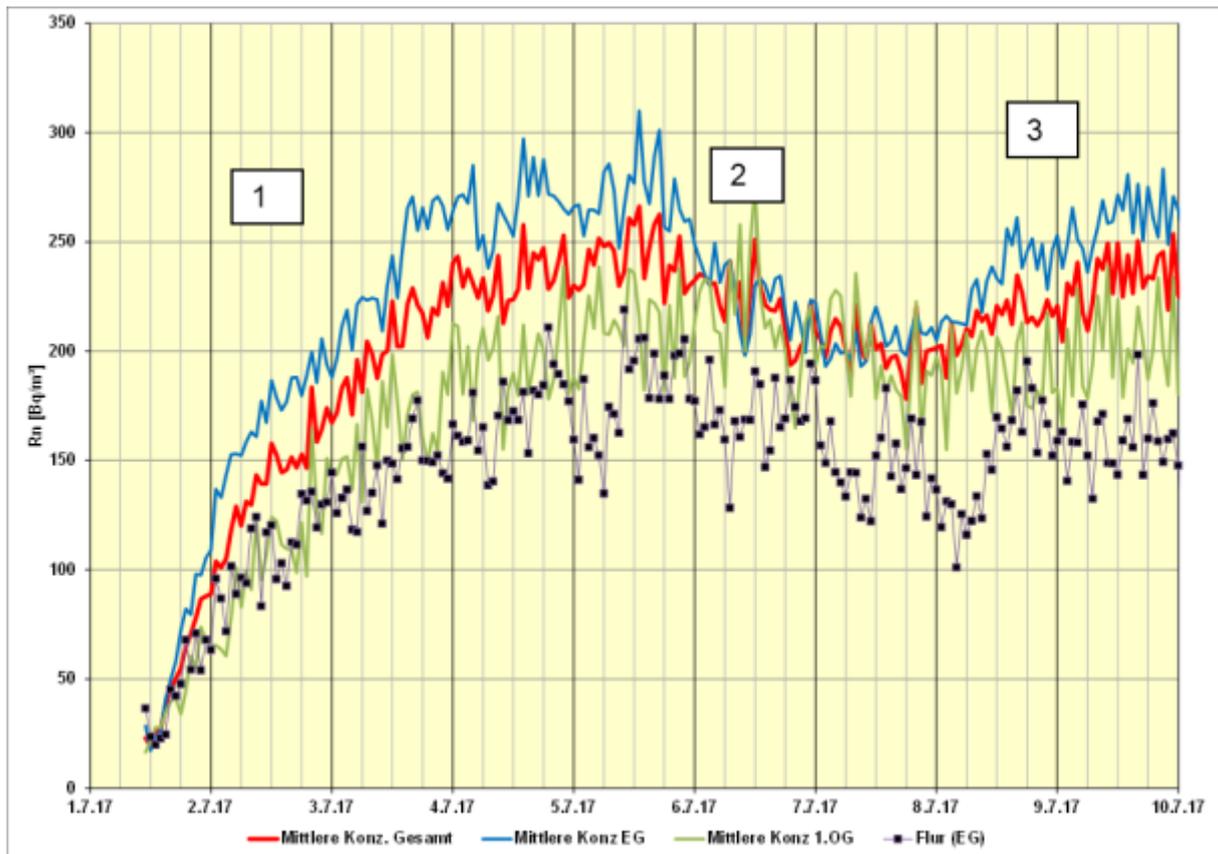


Abbildung 8: Zeitliche Entwicklung der mittleren Radonaktivitätskonzentrationen im gesamten Haus sowie im Erd- und Obergeschoss (Messintervall 10 Minuten, Mittelung über 1 Stunde), Aktionen 1 - 3 s. Tabelle 5

Die im Vorfeld der BDT durchgeführten Messungen der zeitlichen Entwicklung der Radonkonzentration unter unterschiedlichen Nutzungsbedingungen (vgl. Zusammenstellung in Tabelle 5) ermöglichen den Radonquellterm des gesamten Hauses und die individuellen Radonquellstärken der einzelnen Räume sehr genau aus den entsprechenden zeitlichen Anstiegen der Radonkonzentrationen zu extrahieren und die nach Erreichen des Plateauwerts C_{asympt} (vgl. Gl. (11)) herrschende Luftwechselrate zu bestimmen. Unter normalen Nutzungsbedingungen bedeutet hier, dass das Haus ohne Einsatz einer mechanischen Lüftung untersucht wird. Der dabei natürlich vorhandenen Differenzdruck zwischen Innenraumluft und

Außenatmosphäre variiert in solchen Situationen im Bereich von 2 - 4 Pa. Diese ursprünglich von IAF entwickelte und praktizierte Methode wurde z.B. in Rahmen des Forschungsvorhabens [49] vorgestellt und wird auch zur Bestimmung der Radondichtheit eines Hauses genutzt.

Die Ergebnisse in der Abbildung 8 vermitteln folgendes wichtiges Bild, das bei der Interpretation und Durchführung des BDT zu berücksichtigen ist. Obwohl der Luftwechsel durch das Abschalten der Lüfter und Schließen der Lüftungsklappen weitestgehend eingeschränkt wurde und die Türen geschlossen waren, findet in dem Haus während der Aktion 1 (s. Tabelle 5) im Verlauf von ca. 5 Tagen keine Angleichung der Radonkonzentrationen in den beiden Etagen statt.

Erst als die Lüftungsklappen für ca. 2 Tage (s. Aktion 2 Tabelle 5) geöffnet wurden, ist einem zusätzlichen Luftaustausch Vorschub geleistet worden und die Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen der 2 Etagen haben sich angeglichen, wobei sich wegen der Kopplung zur Außenatmosphäre die mittlere Radonkonzentration um etwa 25% reduziert hat.

Als in der Aktion 3 (s. Tabelle 5) die Lüftungsklappen wieder geschlossen wurden, divergierten wiederum die Radonkonzentrationen. Dies Beispiel zeigt, wie wichtig ein Luftaustausch im Haus ist, um annähernd vergleichbare Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen des Hauses zu erreichen.

Die mittlere Radonkonzentration im Erdgeschoss ist in den meisten Zeiträumen immer am höchsten, wohingegen die Radonkonzentration im Flur des EG, der über die Treppe direkt an das Obergeschoss gekoppelt ist, noch eine deutlich niedrigere Radonkonzentration aufweist als das Erdgeschoss insgesamt. Zwischen den beiden Etagen treten mittlere Radonkonzentrationsunterschiede im Bereich von 100 Bq/m^3 auf, wobei die Verfrachtung des Radons aus dem Baugrund in das Obergeschoss über lufttechnische Verbindungen zwischen den Räumen und nur zum Teil über den Treppenflur erfolgt. Diese Ergebnisse dokumentieren somit, dass der Radonaustausch im gesamten Haus ein sehr komplizierter Prozess ist und man von deutlich unterschiedlichen mittleren Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen des Hauses ausgehen muss. Eine für das gesamte Haus geltende Radonquellstärke muss deshalb so definiert sein, dass in einzelnen Aufenthaltsräumen mittlere Radonkonzentrationen von 300 Bq/m^3 nicht übertroffen werden sollten. Auf diesen wichtigen Sachverhalt wird in dem Kapitel 10 detaillierter eingegangen, wenn Vorschläge zur Überprüfung der Radondichtheit eines Hauses unterbreitet werden.

Insbesondere die niedrigere Radonkonzentration im Flur des Hauses, der als "Mischkessel" der Radonverfrachtung von den Radonquellen im Erdgeschoss in die Räume des Obergeschosses fungiert, ist in Bezug auf die Auswertung der BDT Ergebnisse besonders zu beachten. Beim BDT wird die Luft in ca. 40 cm Höhe an der Haustür bei geöffneten Türen ab-

gesaugt und liefert somit, wie in der Abbildung 8 dargestellt, nur bedingt Informationen über die im gesamten Haus herrschende mittlere Radonkonzentration.

Die Ergebnisse in der Abbildung 8 manifestieren auch, dass die existierende Radonquellstärke des Hauses zu mittleren Radonkonzentrationen im Erdgeschoss im Bereich von 300 Bq/m³ führt, wenn die Lüftung nicht in Betrieb ist. Im Folgenden wird gezeigt, dass auch in einzelnen Zimmern des Hauses eine Radonkonzentration von 300 Bq/m³ deutlich überschritten wird. Eine Lüftung muss deshalb dauerhaft im Betrieb sein, um die mittleren Radonkonzentrationen immer deutlich unterhalb von 300 Bq/m³ abzusenken.

Tabelle 5: Zusammenstellung der Maßnahmen während der Radonmessungen

| Aktionen | Datum | Dauer [h] | BD | Lüftung | Lufteinlass | Türen im Haus |
|---------------------|------------------|------------|----------------|-----------------------|--------------|---------------|
| 1 | 01.07.2017 11:00 | 99,0 | | aus | verschlossen | geschlossen |
| | 05.07.2017 14:00 | | | aus | verschlossen | geschlossen |
| 2 | 05.07.2017 14:00 | 47,0 | | aus | geöffnet | geschlossen |
| | 07.07.2017 13:00 | | | aus | geöffnet | geschlossen |
| 3 | 07.07.2017 13:00 | 69,0 | | aus und abgedichtet | abgedichtet | geschlossen |
| | 10.07.2017 10:00 | | | aus und abgedichtet | abgedichtet | geschlossen |
| 4 | 10.07.2017 10:00 | 7,0 | BD 1 Start | aus und abgedichtet | abgedichtet | geöffnet |
| | 10.07.2017 17:00 | | BD 1 Ende | aus und abgedichtet | abgedichtet | geöffnet |
| 5 | 10.07.2017 17:00 | 14,0 | | aus und abgedichtet | abgedichtet | geöffnet |
| | 11.07.2017 07:00 | | | aus und abgedichtet | abgedichtet | geöffnet |
| 6 | 11.07.2017 07:00 | 1,5 | | aus und abgedichtet | abgedichtet | geöffnet |
| | 11.07.2017 08:30 | | | aus und abgedichtet | abgedichtet | geöffnet |
| 7 | 11.07.2017 08:30 | 5,0 | BD 2 Start | abgedichtet | abgedichtet | geöffnet |
| | 11.07.2017 13:30 | | BD 2 Ende | abgedichtet | abgedichtet | geöffnet |
| 8 | 11.07.2017 13:30 | 19,7 | | aus und abgedichtet | abgedichtet | geschlossen |
| | 12.07.2017 09:15 | | | aus und abgedichtet | abgedichtet | geschlossen |
| 9 | 12.07.2017 09:15 | 22,0 | BD 3 Start | angeschaltet, Stufe 1 | abgedichtet | geschlossen |
| | 13.07.2017 07:15 | | BD 3 Ende | angeschaltet, Stufe 1 | abgedichtet | geschlossen |
| 10 | 13.07.2017 07:15 | 88,7 | | angeschaltet, Stufe 1 | geöffnet | geschlossen |
| | 17.07.2017 00:00 | | Ende und Abbau | angeschaltet, Stufe 1 | geöffnet | geschlossen |
| Dauer gesamt | | 373 | | | | |

Die Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen des Hauses, insgesamt 10 Räume, sind im 10-Minutentakt aufgezeichnet und daraus die mittleren Radonkonzentrationen (Stundenmittel) berechnet worden und in der Abbildung 8 dargestellt. In der Abbildung 9 sind dagegen die Originalergebnisse (10-Minutentakt) dargestellt. Die Messergebnisse belegen, dass im gesamten Haus hohe Radonkonzentrationsschwankungen auftreten, die insbesondere im Flur stark ausgeprägt sind.

Diese Schwankungen sind ein Hinweis darauf, dass der Luftaustausch im gesamten Haus als ein stochastischer Prozess zu sehen ist und überdies auch der aus den diversen Radonquellen stammende Radonfluss in das Haus nicht als ein kontinuierlicher Radonaktivitätsstrom mit konstanter Radonkonzentration betrachtet werden kann. Das Haus wurde während der Messungen nicht genutzt. Lediglich zur Durchführung von Aktionen (s. Tabelle 5) wurde die Haustür kurzzeitig geöffnet.

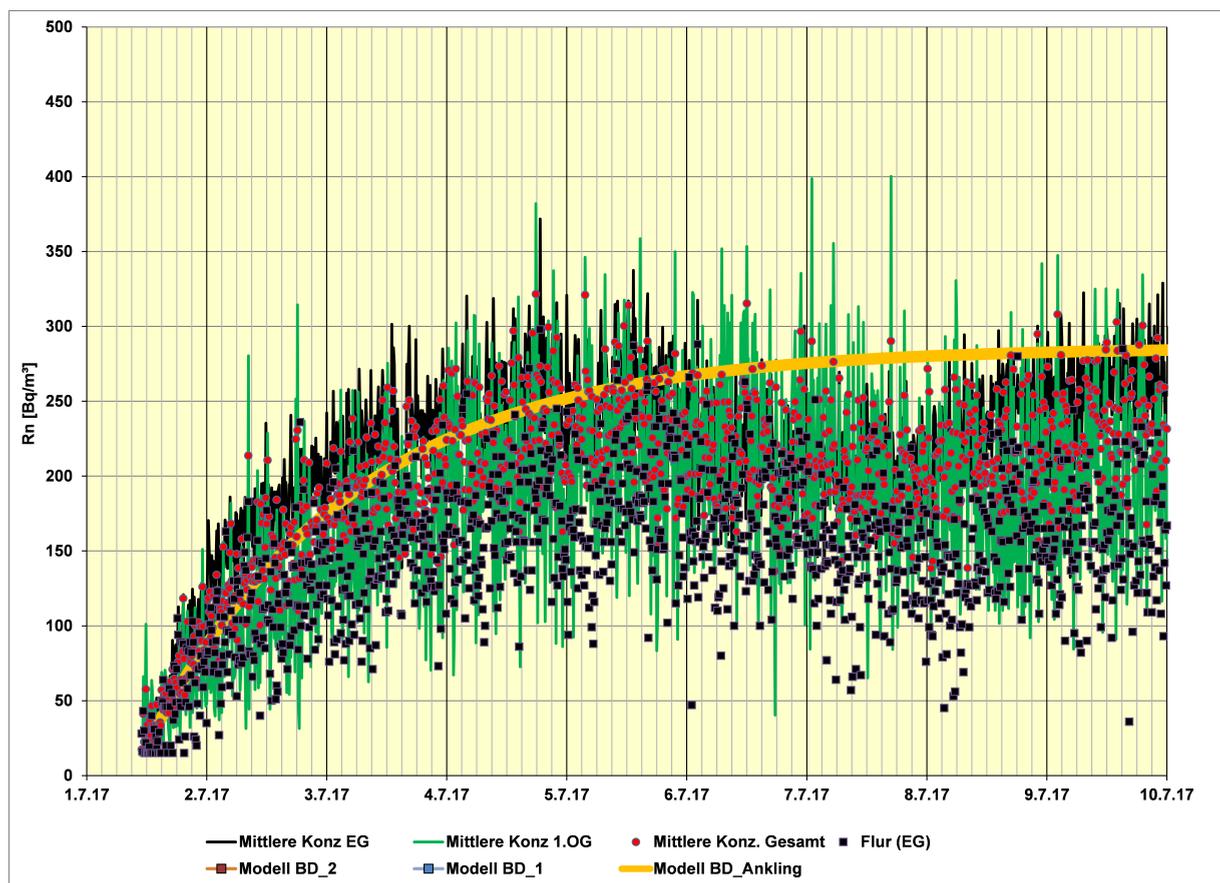


Abbildung 9: Wie Abbildung 8, jedoch Darstellung der im 10-Minutentakt erhaltenen Radonkonzentrationen sowie mit Modellkurve für die ersten 5 Tage Aktion 1 (Lüfter aus, Lüftungsklappen geschlossen, s. Tabelle 5)

Aus den in der Abbildung 10 dargestellten Ergebnissen ([50]) kann aus dem anfänglichen linearen Anstieg der Radonkonzentrationen nach Gl. (17) die Radonquellstärke während der Aktion 1 (Lüfter aus, Lüftungsklappen geschlossen, s. Tabelle 5) mit ca. 10 Bq/(m³ h) abgeschätzt werden. Trotz dieser geringen Quellstärke werden wegen des stark eingeschränkten Luftwechsels mittlere Radonkonzentrationen im Haus im Bereich von 250 - 300 Bq/m³ erreicht. Aus dem resultierenden Plateauwert von ca. 250 Bq/m³ kann nach Gl. (11) eine Luftwechselrate von 0,032 h⁻¹ deduziert werden. Die tatsächlich von den Bewohnern verwendete Luftwechselrate während dieser Jahreszeit ist mit 0,16 h⁻¹ etwa um den Faktor 5 größer¹. Mit dieser im Vorfeld gewonnenen Information könnte bereits auf einen BDT verzichtet werden und die Radondichtheit des Hauses unter den vom Hausbesitzer gewählten Lüftungsbedingungen kategorisiert werden.

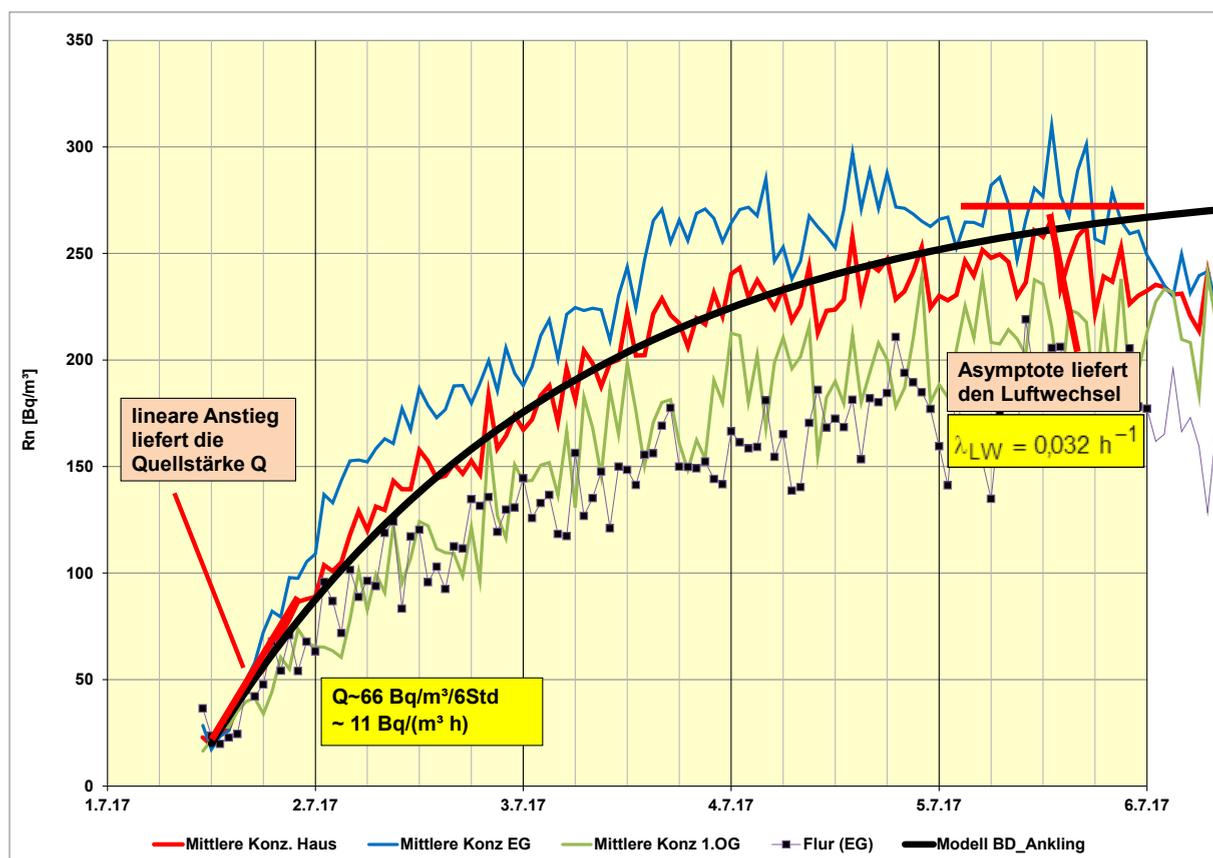


Abbildung 10: Wie Abbildung 8, jedoch mit Modellkurve für die ersten 5 Tage Aktion 1 (Lüfter aus, Lüftungsklappen geschlossen, s. Tabelle 5)

¹ Das Haus wurde zunächst nur mit 2 Lüftern betrieben. Im Zuge der Radonmessungen wurde festgestellt, dass der 3. Lüfter nicht sachgerecht zugeschaltet war.

In der Abbildung 11 sind beispielhaft die Radonkonzentrationsentwicklungen in den einzelnen Räumen des Erdgeschosses dargestellt und zusätzlich der zwischen Flur (EG) und Hausaußenatmosphäre herrschende Differenzdruck mit angegeben. Es ist zu erkennen, dass sich im Arbeitszimmer (AZ) hohe Radonkonzentrationen bis knapp oberhalb von 600 Bq/m³ entwickeln, wenn nach Aktion 1 (s. Tabelle 5) die Lüftung ausgeschaltet, die Tür des AZ geschlossen und der Lufterlass ebenfalls geschlossen ist. Der Luftaustausch kann dann nur noch über nicht identifizierte Leckagen sowie andere Luftwegsamkeiten und z.B. durch Türspalte erfolgen aber auch über durch Wind induzierte Druckveränderungen zusätzlich angetrieben werden.

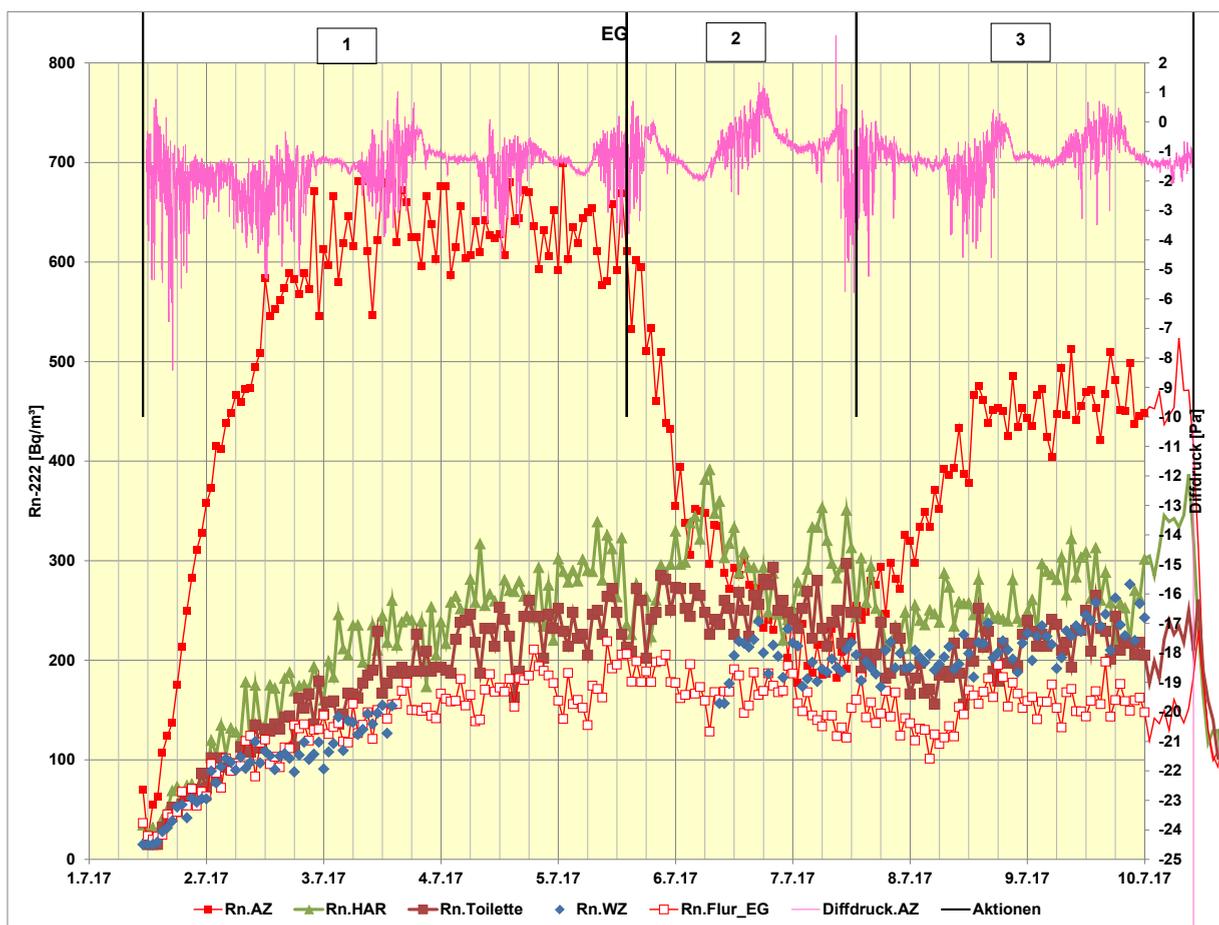


Abbildung 11: Zeitliche Entwicklung der im Erdgeschoß gemessenen Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen des EG. Zusätzlich angegeben sind die Differenzdrücke zwischen dem Arbeitszimmer (AZ) und der Außenatmosphäre

Auch in den anderen Räumen, außer dem Flur (EG), werden Radonkonzentrationen im Bereich von 300 Bq/m^3 erreicht. In dieser herausgenommenen Situation wäre das Haus als radonundicht zu klassifizieren, da in ausgewählten Aufenthaltsräumen 300 Bq/m^3 überschritten wird.

Sobald die Lüftungsklappen geöffnet sind, jedoch die Lüftung nicht in Betrieb ist (Aktion 2, Tabelle 5) verringert sich die Radonkonzentration im Arbeitszimmer sehr rasch, während in den anderen Zimmern des Erdgeschosses nur mehr oder minder marginale Änderungen der Radonkonzentrationen zu beobachten sind. Im Verlauf der Aktion 3, in der das gesamte Haus für den BDT abgedichtet wurde, steigt vor allem die Radonkonzentration im Arbeitszimmer wieder an. Dieses Bild untersetzt die These, dass trotz einer mittleren Radonkonzentration im Erdgeschoss von teils deutlich $< 300 \text{ Bq/m}^3$ die Situation in den einzelnen Räumen stark unterschiedlich sein kann. Überdies ist die Radonkonzentration im Flur des EG am niedrigsten. Gerade beim BDT wird jedoch die Luft aus diesem Raum abgesaugt.

Da nach der Durchführung des BDT nur die Informationen über die Radonkonzentrationsentwicklung im abgesaugten Luftstrom und über die abgesaugte Luftmenge zur Verfügung stehen, ist, wie noch gezeigt wird, eine Prognose über den Grad der Radonundichtheit eines Hauses, der zu Radonkonzentrationen in einzelnen Räumen des Hauses führen könnte, mit hohen Unsicherheiten verknüpft, sofern man im Bereich kleiner Gesamtquellstärken des Hauses liegt. Dies wurde bereits auch anhand von Beispielen im Kapitel 3 dokumentiert.

Des Weiteren ist zu bemerken, dass die vergleichsweise hohe Radonquellstärke von $40 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \text{ h})$ im Arbeitszimmers (AZ), verglichen zur mittleren Quellstärke des Hauses von ca. $10 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \text{ h})$, nicht bedeutet, dass in diesem Raum der Hauptradoneintrittspfad zu identifizieren wäre. Auch in das Wohnzimmer, das etwa ein 4-mal größeres Volumen V_{WZ} als das Arbeitszimmer aufweist, tritt eine etwa vergleichbare Radonfracht wie in das Arbeitszimmer ein.

Die Suche nach den existierenden Leckagen zum Baugrund ist nach Fertigstellung des Fußbodenaufbaus praktisch nicht mehr möglich. In vielen neu gebauten Häusern befindet sich über der Bodenplatte zur Wärmedämmung eine etwa 15 cm mächtige Schicht aus Styropor, auf die der Estrich aufgetragen ist. Im untersuchten Haus sind in der Styroporschicht auch die wichtigsten Elemente der Fußbodenheizung eingebaut. Die in das Haus eindringenden Radonfrachten werden somit unterhalb der Estrichschicht im gesamten Haus verteilt und dringen dann über die Randfugen in die einzelnen Räume ein. Diese Art der Verfrachtung der radonhaltigen Bodenluft ist typisch für moderne Häuser. Im Fall des untersuchten Hauses treten möglicherweise die Luftwegsamkeiten aus dem Radonreservoir unter dem Estrich besonders bevorzugt im Arbeitszimmer auf.

Hier wird deutlich, dass u.E. ein BDT zur Prüfung der Radondichtheit eines Gebäudes im Rahmen der Gebäudeübergabe nicht zielführend ist, um die Leckagen im Gebäude zu identifizieren, sondern nur um die eventuelle Radondichtheit zu belegen. Die Praxis zeigt, dass eine Leckagensuche erfolgen sollte, wenn der Fußbodenaufbau noch nicht abgeschlossen ist und auch die diversen Medieneinbindungen noch zugänglich sind. Deshalb sollten erste Radondichtheitsprüfungen nicht im Zuge der Bauübergabe, sondern während der Bauphase nach Fertigstellung der Gebäudehülle erfolgen. Dies sind auch unsere Erfahrungen, die im Verlauf von solchen Prüfungen gewonnen wurden. Im Kapitel 10 wird auf diese Thematik in Hinblick auf eine Radondichtheitsprüfung eingegangen.

Die in der Abbildung 11 dargestellten Differenzdrücke zwischen Flur (EG) und Hausaußenatmosphäre dokumentieren, dass die Unterdrücke in der Phase der unterschiedlichen Aktionen 1 - 3 sehr gering und im Mittel bei etwa -1 bis -2 Pa anzusiedeln sind. Dieser permanente Unterdruck ist die Folge des Temperaturunterschieds zwischen dem Hausinneren und der Außenatmosphäre und wirkt sich mehr oder minder stark auch auf die Radonkonzentrationen bzw. auf das Radontransportverhalten im Haus aus.

Es ist jedoch nicht zu verkennen, dass teilweise auch hohe momentane Schwankungen der Differenzdrücke auftreten. Diese Schwankungen werden durch aufrischende und abflauende Winde induziert und durch das Bernoulli Gesetz erfasst. Der Zusammenhang ist in der Abbildung 12 illustriert.

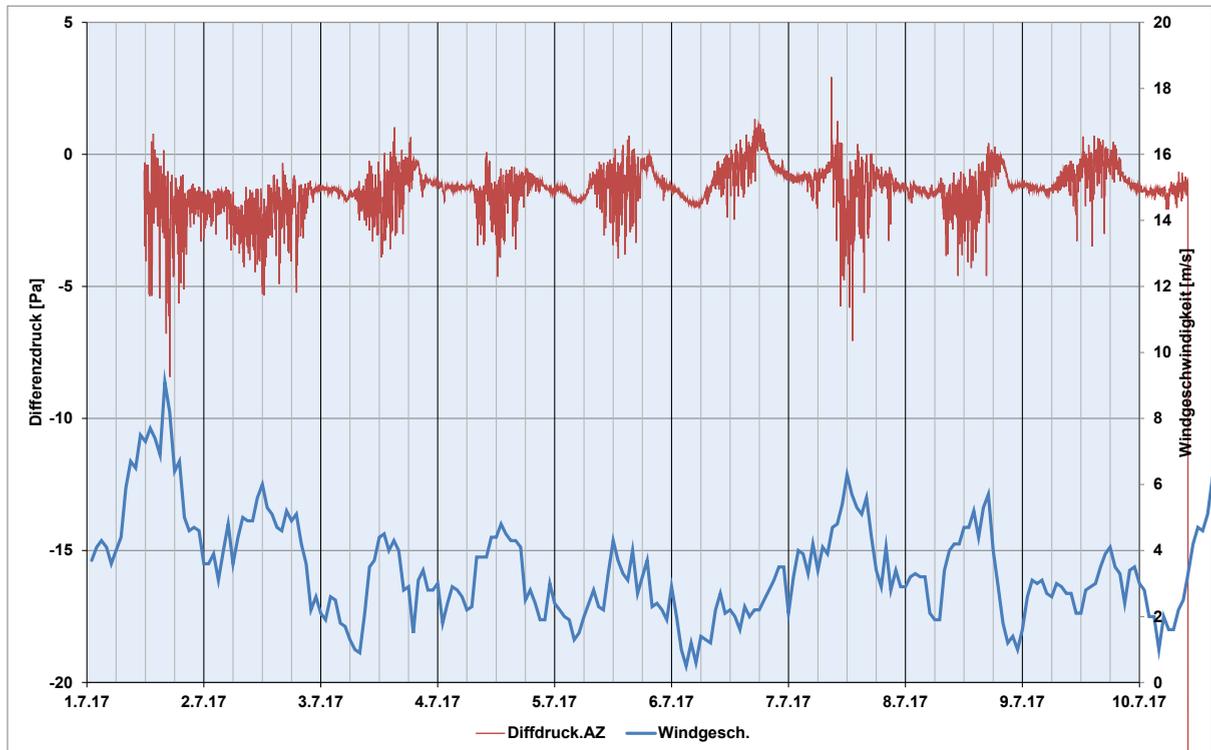


Abbildung 12: Zeitliche Entwicklung der Differenzdrücke zwischen dem Inneren des Hauses und der Hausaußenatmosphäre sowie die Windgeschwindigkeiten außerhalb des Hauses

Es ist klar zu erkennen, dass bei Windgeschwindigkeiten von < 2 m/s die Differenzdrücke kaum variieren und bei etwa -1 Pa anzusiedeln sind. Jedoch bei Windgeschwindigkeiten von > 2 m/s treten verstärkt auch merkliche Schwankungen der Differenzdrücke auf. Bei Windgeschwindigkeiten bis 10 m/s erreichen die induzierten Differenzdrücke ca. -10 Pa.

Die aus den erhöhten Differenzdrücken resultierende Luftwechselraten können nach den Ergebnissen der BD Messungen bei bis etwa $0,15$ h^{-1} liegen und führen in dem Untersuchungsbeispiel nicht zu erhöhten Innenraumradonkonzentrationen. Das Gegenteil ist eher der Fall. Durch den zusätzlich induzierten Luftwechsel wird die Radonkonzentration im Haus abgesenkt. Nachts sind im gewählten Messzeitraum wegen der niedrigen Windgeschwindigkeiten auch nur geringe Schwankungen der Differenzdrücke zu beobachten.

In Abbildung 13 sind beispielhaft die zeitlichen Entwicklungen der Differenzdrücke zwischen dem Inneren des Hauses und der Hausaußenatmosphäre sowie zwischen den einzelnen Räumen des Erdgeschosses dargestellt. Es ist offensichtlich, dass sich die vergleichsweise höheren Differenzdrücke zwischen dem Inneren des Hauses und der Hausaußenatmosphäre nur im geringeren Maße auf die Differenzdrücke zwischen den einzelnen Räumen im Haus durchpausen. Interessant ist aber zu beobachten, dass sich der Differenzdruck zwischen

dem HAR und WZ von positiv zu negativ ändern kann. Dies weist auf komplizierte Transportvorgänge innerhalb des Hauses hin, deren Ursachen hier nicht aufgeklärt werden.

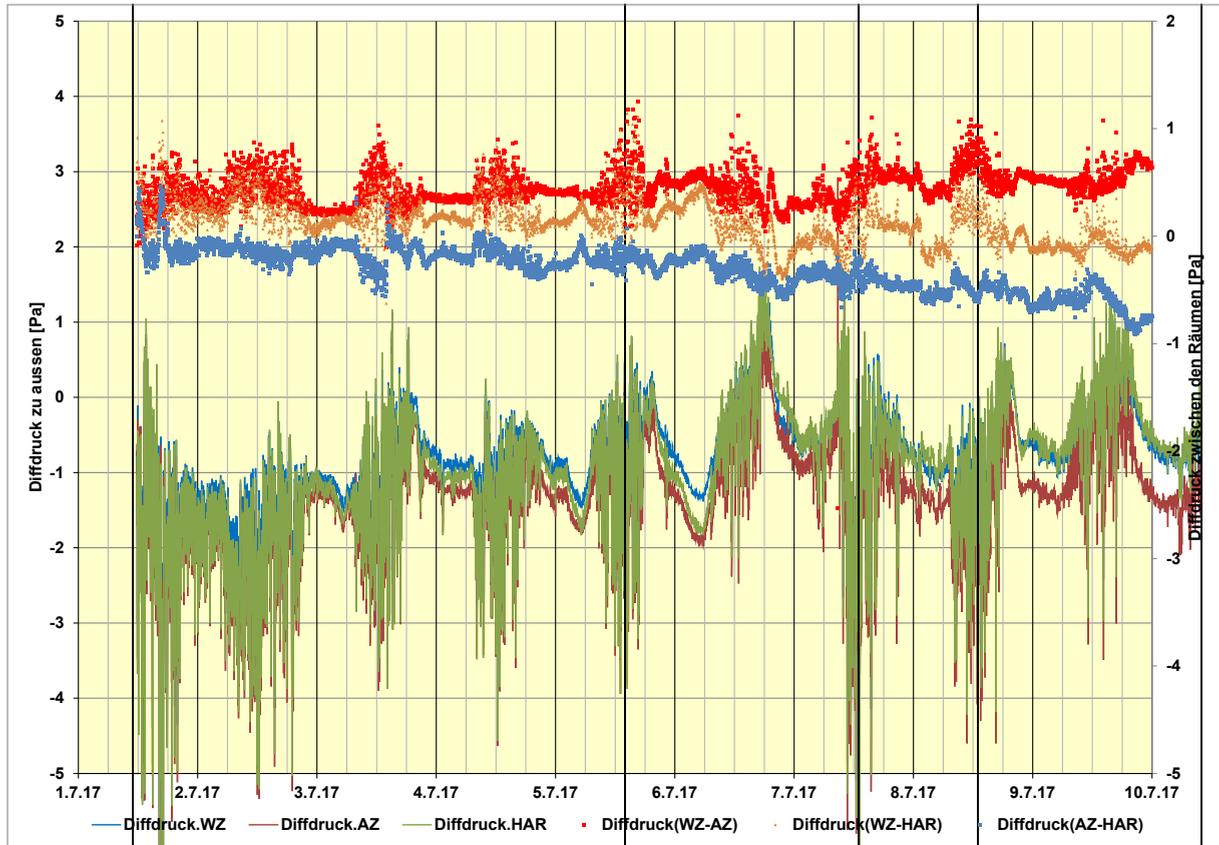


Abbildung 13: Zeitliche Entwicklungen der Differenzdrücke zwischen dem Inneren des Hauses und der Hausaußenatmosphäre sowie zwischen den einzelnen Räumen des Erdgeschosses

4.3 Ergebnisse der BDT Unterdruckmessungen

4.3.1 Beschreibung der einzelnen Aktionen im Rahmen der BD Messungen

Insgesamt sind in dem Haus 3 BD Tests (BD 1 bis BD 3) durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 14, dargestellt und geben einen Überblick über die Radonkonzentrationsentwicklung in den einzelnen Räumen des Erdgeschosses sowie über die berechnete mittlere Radonkonzentration für das gesamte Erdgeschoss. Während der 3 BD Tests wurde im Flur des Hauses abgesaugt. Die zeitliche Abhängigkeit des Differenzdrucks zwischen dem Flur und der Außenatmosphäre bei den verschiedenen Aktionen (s. Tabelle 5) ist mit dargestellt. Am 10.7.2017 ist der 1. BDT (BD 1) im Haus durchgeführt worden, nachdem sich im abgedichteten Haus quasi ein Fließgleichgewicht der Radonkonzentration eingestellt hatte, obwohl sich die Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen des Hauses deutlich unterschieden.

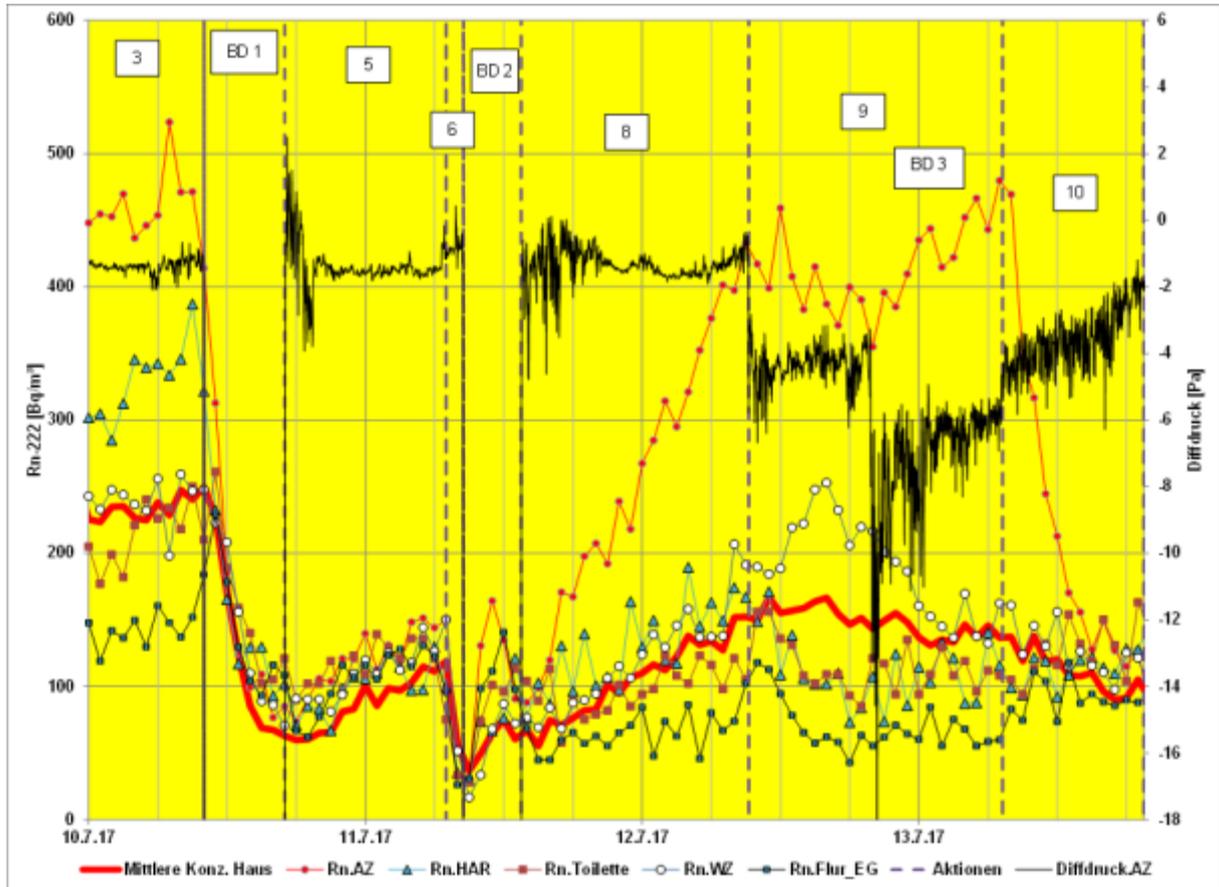


Abbildung 14: Zeitliche Entwicklung der im Erdgeschoß gemessenen Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen sowie die daraus berechnete mittlere Radonkonzentration. Zusätzlich angegeben sind die Differenzdrücke zwischen dem Flur und der und der Außenatmosphäre.

Für den Unterdruck wurde beim 1. und 2. BDT ein Wert von etwa 50 Pa gewählt, wobei auch die Türen innerhalb des Hauses geöffnet wurden (s.a. Tabelle 5). Der hohe Unterdruck von 50 Pa entspricht einer Luftwechselrate (LWR) von $0,8 \text{ h}^{-1}$ und wird vorzugsweise zur Quantifizierung der Luftdichtheit eines Hauses angewendet. Ein solch hoher Unterdruck ist unter der Prämisse gewählt worden, dass, wie im Kapitel 3 gezeigt, nur bei vergleichsweise hohen Unterdrücken zu erwarten ist, dass sich bereits nach 2 - 4 Stunden ein Radonkonzentrationsplateau im abgesaugten Luftstrom herausbilden wird. Bei deutlich niedrigeren Unterdrücken können die entsprechenden Saugzeiten bis 12 Stunden und mehr betragen. Ein Anwenden eines so hohen Unterdrucks wie beim gewöhnlichen BDT ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn das Verhältnis $\beta = \lambda_Q / \lambda_{LW}$ von Radoninfiltrationsrate zu Frischluft Eintrittsrate aus der Atmosphäre annähernd konstant bleibt. Für eine problemangepasste Vorgehensweise, z.B. Auswahl der zu verwendenden Unterdruckstufen zum Nachweis der Radondichtheit

eines Gebäudes, liegen gegenwärtig noch keine belastbaren Ergebnisse aus der Praxis vor. Bisherige Untersuchungen sind vor allem mit dem Ziel durchgeführt worden, Radoneintrittspfade bzw. -raten in einzelne Räume eines Gebäudes zu untersuchen (s. z.B. [51], [52], jedoch nicht, um die Radondichtheit eines gesamten Gebäudes im Zuge der Bauabnahme einzuschätzen.

Es ist klar aus den Ergebnissen in der Abbildung 14 zu erkennen, dass zu Beginn der Unterdruckversuche in allen Räumen deutlich unterschiedlich hohe Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen des Erdgeschosses herrschten, wobei signifikant niedrigere Radonkonzentrationen im "Mischkessel" Flur gemessen wurden, von dem die Absaugung erfolgte.

Die mittleren Radonkonzentrationen im Erdgeschoss verringerten sich infolge des Unterdrucks von ca. 250 Bq/m³ anfangs exponentiell bis ein Plateauwert von knapp 100 Bq/m³ erreicht wurde. Es ist jedoch auch zu erkennen, dass z.B. die Radonkonzentration im Flur zunächst ansteigt, da infolge des Unterdrucks verstärkt Radonfrachten aus anderen Räumen des Hauses in den Flur transportiert wurden, der anfänglich die niedrigsten Radonkonzentrationen aufwies. Dieser 1. Unterdruckversuch verdeutlicht auf anschauliche Weise, dass, wie bereits anhand der Modellrechnungen in Kapitel 3.2.3 gezeigt, proportional deutlich mehr Außenluft als radonhaltige Bodenluft angesaugt wird. Eine detailliertere Auswertung des BDT erfolgt im Kapitel 4.3.2.

Nach Beendigung des BDT wurde das Haus wieder mit der originalen Haustür verschlossen. Die Türen innerhalb des Hauses blieben geöffnet (Abbildung 14, Aktion 5). In dieser Situation stiegen die Radonkonzentrationen im Haus etwa linear als Funktion der Zeit an, wobei die Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen wegen der geöffneten Türen innerhalb des Hauses annähernd gleich hoch waren.

Es ist auch zu erkennen, dass die Differenzdruckschwankungen zwischen dem Inneren des Hauses und der das Haus umgebenden Atmosphäre sofort deutlich zunahm, sobald die Haustür geöffnet wurde, um Messtechnik ein- bzw. auszubauen.

Am 11.7. 2017 wurde von 7:00 bis 8:30 das gesamte Haus gelüftet (Abbildung 14, Aktion 6), um dann den zeitlichen Anstieg der Radonkonzentration nach Anlegen des Unterdrucks, ausgehend von sehr niedrigen Anfangsradonkonzentrationen im Haus, im Abstrom nachverfolgen zu können. Erst nach einer vergleichsweise langen Lüftungszeit von ca. 90 Minuten (Querlüftung) wurde eine mittlere Radonkonzentration von ca. 20 Bq/m³ erreicht.

Im nachfolgenden 2. BDT stiegen die Radonkonzentrationen im Abstrom zunächst linear an und erreichten rasch ein Maximum (Abbildung 14, Aktion 7, BDT 2). Nach ca. 1,5 Stunden sanken sie etwas ab. Dies ist eine Folge dessen, dass der Konsolidierungsprozess bezüglich der Radonkonzentration im "Mischkessel" Flur erst nach mehreren Stunden erreicht wird. Eine detaillierte Auswertung des 2. BDT erfolgt im Kapitel 4.3.3.

Nach Beendigung der 2. BD Messungen und wurde das Haus und die Türen im Haus wieder verschlossen. Folglich stiegen die Radonkonzentrationen innerhalb des Hauses wieder unterschiedlich stark an. Insbesondere hoch war der Anstieg im Arbeitszimmer (AZ). Eine Auswertung der Messergebnisse erfolgt im Kapitel 4.3.4

Der folgende 3. BDT wurde mit Hilfe der im Haus installierten Lüfter durchgeführt (Aktion 9, BDT 3, Abbildung 14). Die Türen im Haus blieben jedoch, wie im Normalbetrieb, geschlossen. Wegen des induzierten Luftwechsels stieg die Radonkonzentration im Arbeitszimmer (AZ) nicht weiter an. Sie verringerte sich jedoch im Wohnzimmer nach einer kurzen Anstiegsphase.

Die Messkampagne wurde am 13.7.2017 beendet und die normalen Nutzungsbedingungen (Aktion 10) wieder hergestellt, d.h. die Lufteinlässe wurden geöffnet, die Lüfter blieben eingeschaltet und die Türen innerhalb des Hauses wurden nicht geöffnet. Infolgedessen verringerten sich die Radonkonzentrationen exponentiell, bis ein Plateauwert annähernd erreicht wurde (s. Abbildung 14). Die weitere Radonkonzentrationsentwicklung im Haus konnte aus Termingründen (Rückkehr der Bewohner aus dem Urlaub) nicht weiter verfolgt werden.

Die Messergebnisse für die Differenzdrücke zwischen dem Arbeitszimmer (AZ) und der Außenatmosphäre zeigen, dass im Haus ohne eingeschaltete Lüftung ein Unterdruck von annähernd -2 Pa herrscht. Wird die Lüftung in Betrieb gesetzt, vergrößert sich der Unterdruck bis etwa -4 Pa, wobei die starken Druckvariationen auf die auffrischenden und abflauenden Winde zurückzuführen sind. Dies wurde anhand der Ergebnisse in der Abbildung 12 dokumentiert. Bereits bei dieser geringfügigen Erhöhung des Unterdrucks im Haus wird praktisch nur Außenluft und kaum zusätzlich radonhaltige Bodenluft angesaugt. Andererseits wären die deutlich erkennbaren exponentiellen Abfälle der Radonkonzentrationen im Arbeitszimmer und im gesamten Erdgeschoss nicht erklärbar.

4.3.2 Auswertung der 1. BDT Messung (BD1, Aktion 4)

Die Ergebnisse der Modellierung der 1. BD Messung (Modell BD_1) sind in der Abbildung 15 dargestellt. Zusätzlich dargestellt sind die berechneten mittleren Radonkonzentrationen im Flur sowie die Ergebnisse Modellrechnung. Es ist zu erkennen, dass die Radonkonzentrationen im EG zu Beginn des BDT exponentiell absinken. In Hinblick auf die Auswertung der Modellergebnisse in Kapitel 3.2 bedeutet dies, dass in das abgedichtete Haus als Folge des Unterdrucks von ca. 50 Pa proportional deutlich weniger Radon über die Leckagen aus dem Baugrund als Radonreservoir eindringt als im Fall niedrigerer Differenzdrücke (Luftwechselraten).

Die mit Flur (EG) bezeichneten experimentellen Werte beschreiben dabei die im Abstrom des BD Versuchs bestimmten Radonkonzentrationen direkt vor dem BD Ventilator. Die Ra-

donkonzentration fällt nach Gl. (6) exponentiell ab, wobei die Abfallkonstante der Modellkurve $\tilde{\lambda} = \lambda + \lambda_{LW} + \lambda_Q$ praktisch allein durch die gemessene Luftwechselrate $\lambda_{LW} = 0,82 \text{ h}^{-1}$ bestimmt ist, die mit der aus dem BDT gewonnenen Wert (s. Tabelle 3) übereinstimmt.

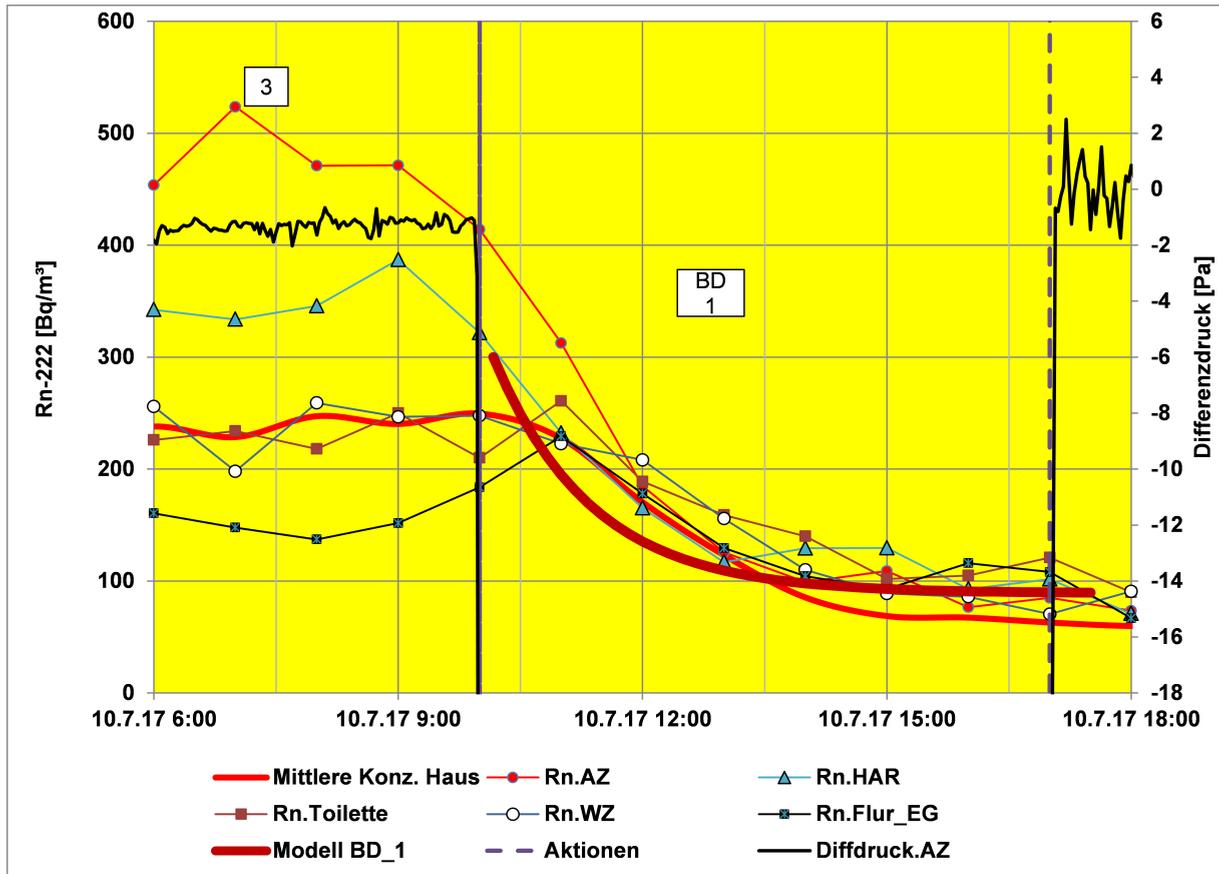


Abbildung 15: Zeitliche Entwicklung der im Haus gemessenen mittleren Radonkonzentrationen vor und während des 1. BDT. Zusätzlich dargestellt sind die berechneten mittleren Radonkonzentrationen im Flur sowie die Ergebnisse Modellrechnung.

Nach einer Saugzeit von ca. 3 Stunden wird ein Plateauwert der Radonkonzentration im Abstrom erreicht, der bei etwa 90 Bq/m^3 anzusiedeln und signifikant kleiner als der sich bei Unterdrücken von etwa $1 - 2 \text{ Pa}$ herausbildende Plateauwert von ca. 250 Bq/m^3 ist. Die Modellierungsergebnisse belegen somit, dass in dem abgedichteten Haus (Aktion 3) aufgrund des Unterdrucks die Luftwechselrate etwa um den Faktor 25 ansteigt, während sich die der Radoninfiltrationsrate λ_Q nur etwa um den Faktor 6,6 erhöht. Dieser Vergleich dokumentiert zweifellos, dass bei dem angelegten hohen Unterdruck die Radonkonzentration im Abstrom (Flur (EG)) durch zusätzlich entstandene Luftwegsamkeiten dominiert wird, wobei anzunehmen ist, dass diese Luftwegsamkeiten vorrangig über Fenster, Türen, Rollläden sowie Küchenabluft- und Heizungszuluftinstallationen entstehen. Solch hohe Unterdrücke sind des-

halb eher im Sinne einer Leckagensuche in Einzelräumen als zur Radondichtheitsprüfung anzuwenden.

Würde, der Unterdruck auf 10 Pa bzw. 20 Pa verringert werden, ändert sich diese Situation nicht, wenn das Verhältnis $\beta = \lambda_Q/\lambda_{LW}$ der Radoninfiltrationsrate und der Frischlufteintrittsrates annähernd konstant bleibt. Man müsste jedoch wegen des geringeren Unterdrucks deutlich länger saugen, um letztlich einen Plateauwert zu erreichen. In diesem Fall schlägt der Vorteil eines BDT bei hohen Unterdrücken in Hinblick auf verkürzte Messzeiten nicht mehr zu Buche. Bei Unterdrücken von ca. 4 Pa müssten Messzeiten bis ca. 8 - 12 Stunden ins Auge gefasst werden.

In der Abbildung 15 ist noch ein weiteres wichtiges Detail zu erkennen. Die im Flur (EG) gemessenen Radonkonzentrationen sind vor Durchführung des 1. BDT teils signifikant niedriger als die jeweiligen mittleren Radonkonzentrationen des EG und des OG. Dieser Sachverhalt ist typisch für ein Haus und ein Indiz dafür, dass die Radonintrusion in das Haus nicht über Leckagen in den Flur, sondern in diesem Fall hauptsächlich über Leckagen in die anderen Räumen des Hauses erfolgt und die Verteilung der eingedrungenen Radonfracht im gesamten Haus ein äußerst kompliziertes Transportproblem darstellt, das anhand eines einfachen Radon-Blower-Door-Tests nicht erfasst werden kann. Das Arbeitszimmer ist dafür ein Beispiel (s. Ergebnisse in Abbildung 11). Nach Beginn des 1. BDT gleichen sich die jeweiligen Radonkonzentrationen, dargestellt in Abbildung 14, zunächst an. In der Tendenz ist jedoch die Radonkonzentration im Flur etwas höher als die in den anderen Etagen. Die Ursache hierfür ist, dass durch die Absaugung ein Strömungsgradient im Haus entsteht, der der völligen Vermischung von radonhaltiger Bodenluft mit der Außenatmosphäre entgegensteht.

Im Ergebnis des 1. BDT, der als Standardsituation angesehen werden kann, stehen für die Beurteilung der Radondichtheit eines Hauses praktisch nur 2 gemessene Größen zu Verfügung:

- die Luftwechsel- bzw. Abstromrate von $\lambda_{LW}^{BD} = 0,82 \text{ h}^{-1}$ und
- der erreichte Plateauwert der Radonkonzentration im BD Abstrom von

$$C_{\text{asympt}}^{BD} \approx 90 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}.$$

Mit Hilfe der Gl. (11) kann mit

$$C_{\text{asyp}}^{\text{BD}} = \frac{\lambda_{\text{LW}}^{\text{BD}} \cdot C_{\text{AL}} + Q^{\text{BD}}}{\lambda + \lambda_{\text{LW}}^{\text{BD}} + \lambda_{\text{Q}}} \approx 90 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \quad (29)$$

die aus dem BDT folgende Radonquellstärke Q^{BD} nach Gl. (13)) durch

$$Q^{\text{BD}} = \lambda_{\text{Q}} C_{\text{Q}} \approx C_{\text{asyp}} \cdot \lambda_{\text{LW}}^{\text{BD}} - \lambda_{\text{LW}}^{\text{BD}} \cdot C_{\text{AL}} \quad (30)$$

abgeschätzt werden, da $\lambda_{\text{LW}}^{\text{BD}} \gg \lambda + \lambda_{\text{Q}}$ gilt. Diese so ermittelte Radonquellstärke Q^{BD} bei einem Unterdruck von ca. 50 Pa beträgt bei einer angenommenen Radonkonzentration der Außenluft von 10 Bq/m³ ca. $Q^{\text{BD}} = 65,6 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{h}}$ und ist somit etwa um den Faktor 6,6 größer

als die über den Anstieg der Radonkonzentration bestimmte Quellstärke von $Q = 10 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{h}}$ des abgedichteten Hauses (s. Abbildung 10), in dem bei einem sehr geringem Unterdruck von etwa 1 - 2 Pa folglich auch ein sehr geringer Luftwechsel herrschte.

Würde sich im abgedichteten Haus das Verhältnis $\beta = \lambda_{\text{Q}} / \lambda_{\text{LW}}$ der Radoninfiltrationsrate aus dem Baugrund und der Zuluft aus der Außenatmosphäre praktisch nicht ändern, müsste die Radonkonzentration im Plateaubereich bei ca. 300 Bq/m³ anzusiedeln sein. Da dies im vorliegenden Fall bei einem Unterdruck von ca. 50 Pa nicht zutrifft, bedeutet dies, dass signifikant mehr Zuluft aus der Atmosphäre als radonhaltige Bodenluft angesaugt wurde. Die mit dem BDT bestimmte Quellstärke ist somit deutlich geringer und ermöglicht keine belastbare Rückrechnung (Extrapolation) auf die tatsächlich bei niedrigen Unterdrücken und vergleichsweise hohen Luftwechselraten herrschenden Verhältnisse, die z.B. bei einer nahezu drucklos arbeitenden Zu- und Entlüftung angetroffen werden.

Der Vorteil der Benutzung eines höheren Unterdrucks gegenüber einem weit geringeren Unterdruck besteht vor allem darin, dass sich die Absaugzeiten bis zum Erreichen des Plateauwerts entsprechend mit Erhöhung des Unterdrucks auf schätzungsweise 2 - 3 Stunden reduziert werden kann. Bei Luftwechselraten im Bereich von 0,15 h⁻¹ ist bereits von einer Absaugdauer von mehr als 12 Stunden auszugehen, um den Plateauwert der Abstromradonaktivitätskonzentration zu erreichen.

Verringert sich jedoch bei den im BDT angelegten Unterdrücken das Verhältnis $\beta = \lambda_{\text{Q}} / \lambda_{\text{LW}}$ der Radoninfiltrationsrate aus dem Baugrund und der Zuluft aus der Außenatmosphäre vergleichsweise stark, ist eine Prognose über die Radondichtheit des Hauses

mit einer einzigen Unterdruckmessung praktisch nicht möglich. Um die Abhängigkeit des Parameters als Funktion des Unterdrucks quantifizieren zu können, sind mehrere BD Tests durchzuführen, wobei die dafür erforderlichen Messzeiten auf 12 Stunden und mehr anwächst und der Vorteil einer Kurzzeitmessung bei hohen Unterdruck von ca. 50 Pa, der in etwa 2 - 4 Stunden absolviert werden könnte, nicht genutzt werden kann.

4.3.3 Auswertung der 2. BDT Messung (BD2, Aktion 7)

Am 11.7.2017 wurde ein 2. BDT durchgeführt, nachdem die Radonkonzentration im abgedichteten Haus durch Querlüften auf ein Niveau von ca. 20 Bq/m³ abgesenkt worden war. Es wurde wiederum bei einem Unterdruck von ca. 50 Pa abgesaugt. Die Ergebnisse des 2. BDT sind in der Abbildung 16 zusammen mit dem des 1. BDT dargestellt.

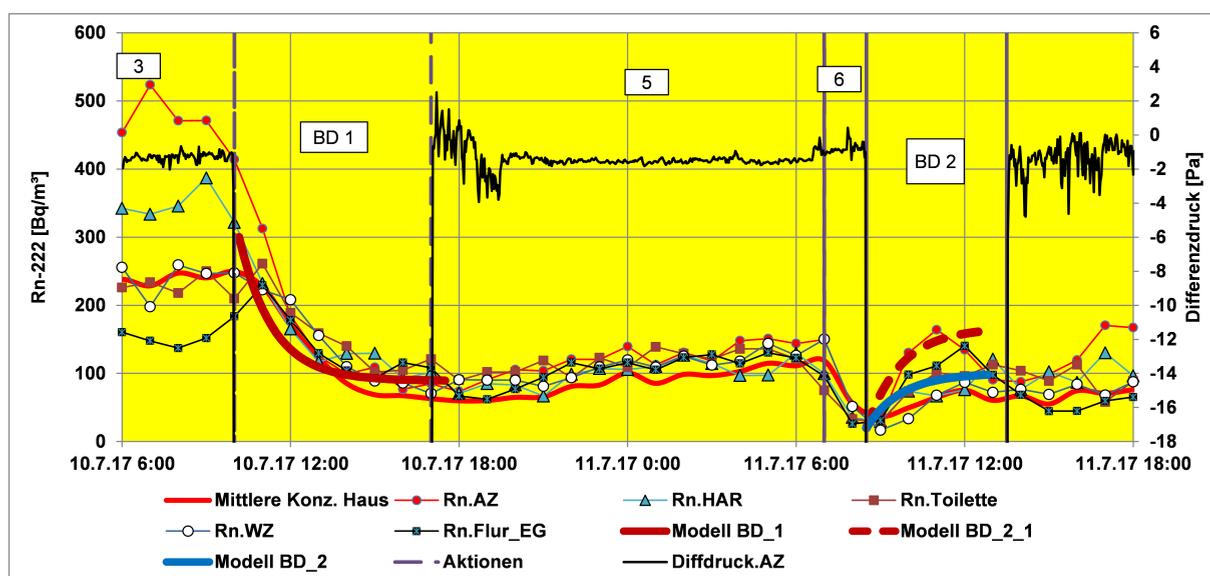


Abbildung 16: Wie Abbildung 15, jedoch für den Zeitraum des 1. und 2. BDT

Auch in diesem Fall war zu erwarten, dass sich im Plateaubereich vergleichbar hohe Radonkonzentrationen wie im 1. BDT entwickeln sollten. Im Ergebnis dieses 2. BDT, der unter anderen Randbedingungen wie beim 1. BDT, ebenfalls als Standardsituation angesehen werden kann, stehen für die Beurteilung der Radondichtheit eines Hauses wiederum nur die 2 gemessenen Größen

- die Luftwechselrate und
- der erreichte Plateauwert der Radonkonzentration im BD Abstrom

zu Verfügung. Die Luftwechselrate λ_{LW}^{BD} beträgt wie im 1. BDT 0,82 h⁻¹. Es ist in der Abbildung 16 zu erkennen, dass die Zeitverläufe (Anstiege) der mittleren Radonkonzentrations-

verläufe durch die Modelle erfasst werden. Speziell im Flur des EG, aus dem die radonhaltige Luft in ca. 40 cm Höhe über dem Fußboden abgesaugt wird (Modell BD_2_1), ist der zunächst nach ca. 2,5 Stunden Ansaugdauer erreichte Plateauwert von

$$C_{\text{asympt}}^{\text{BD}} = \frac{\lambda_{\text{LW}}^{\text{BD}} \cdot C_{\text{AL}} + Q^{\text{BD}}}{\lambda + \lambda_{\text{LW}}^{\text{BD}} + \lambda_{\text{Q}}} \approx 166 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \quad (31)$$

signifikant höher als der 1. BDT (Modell BD_1) gemessene Wert.

Die daraus resultierende Radonquellstärke beträgt nach $Q^{\text{BD}} \approx (C_{\text{asympt}} - C_{\text{AL}}) \cdot \lambda_{\text{LW}}^{\text{BD}}$ etwa 128 Bq/(m³ h). In der Folgezeit sinkt die Radonkonzentration im Abstrom wieder deutlich auf ca. 100 Bq/m³ und die Radonquellstärke auf ca. 65 Bq/(m³ h) ab. Dieses zunächst nicht erwartete Ergebnis ist hauptsächlich eine Folge der ungenügenden Vermischung von radonhaltiger Bodenluft mit der angesaugten Frischluft aus der Außenatmosphäre sowie der im Haus bereits vorhandenen Atmosphäre in dem als "Mischkessel" fungierenden Flur. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass auch bei hohen Unterdrücken ausreichend lange abgesaugt werden muss, damit eine Konsolidierung der Radonkonzentration im Mischkessel Flur erreicht wird. Wird dagegen bei bereits bestehenden erhöhten Radonkonzentrationen von ca. 300 Bq/m³ im Haus, wie im 1. BDT (BD_1) Luft abgesaugt, sinkt die Radonaktivitätskonzentration als Folge der Verdünnung mit radonarmer Außenluft anfänglich exponentiell, so dass die Radonzufuhr aus dem Baugrund nicht so ins Gewicht fällt. Dieser sich manifestierende signifikant große Unterschied zwischen den zwei Vorgehensweisen ist dem BDT immanent, da beim alleinigen Messen der Radonkonzentration im Absaugstrom prinzipiell nicht zu erkennen ist, auf welche Weise das Radon in den "Mischkessel" Flur gelangt und wie groß die tatsächlichen Ankopplungen aller anderen Räume an den "Mischkessel" Flur ist. Nur durch eine gleichzeitige Messung der Radonkonzentrationsentwicklung in allen Räumen des Hauses während der Unterdruckphase werden weitere wichtige Informationen gewonnen, um die Ergebnisse der im Abstrom gemessenen Radonkonzentrationsentwicklungen einordnen und auch die erforderlichen Schlussfolgerungen ziehen zu können.

Nimmt man die mittlere Radonkonzentration im Erdgeschoss als Maßstab für die Interpretation der Ergebnisse des 2. BDT (Modell BD_2_2), würde aus der Anpassung eine Modellkurve resultieren, die auf der gleichen Radonquellstärke von 65 Bq/(m³ h) basiert, wie die im 1. BDT (Modell BD_1) abgeleitet. Dieser Wert wird, wie in der Abbildung 16 dokumentiert, auch nach einer Ansaugdauer von ca. 5 Stunden im 2. BDT erreicht. Dieser Sachverhalt belegt somit in anschaulicher Weise, dass die oftmals angenommenen kurzen Messzeiten für eine Favorisierung des BDT zur Bestimmung der Radondichtheit eines Gebäudes

nicht zutreffen, da die Konsolidierung der Radonkonzentration im "Mischkessel" Flur außer Acht gelassen wird.

4.3.4 3. BDT sowie Modellierung der Radonkonzentrationsentwicklung bei weiteren Aktionen

4.3.4.1 Aktion 8

Nachdem der 2. BDT abgeschlossen war, wurde die BD Messtechnik abgebaut und das Haus mit der Originaltür wieder verschlossen. Wegen des damit verknüpften Luftwechsels hat sich die Radonkonzentration im Flur kurzzeitig auf ca. 50 Bq/m³ reduziert. Dies ist in der Abbildung 17 deutlich zu erkennen.

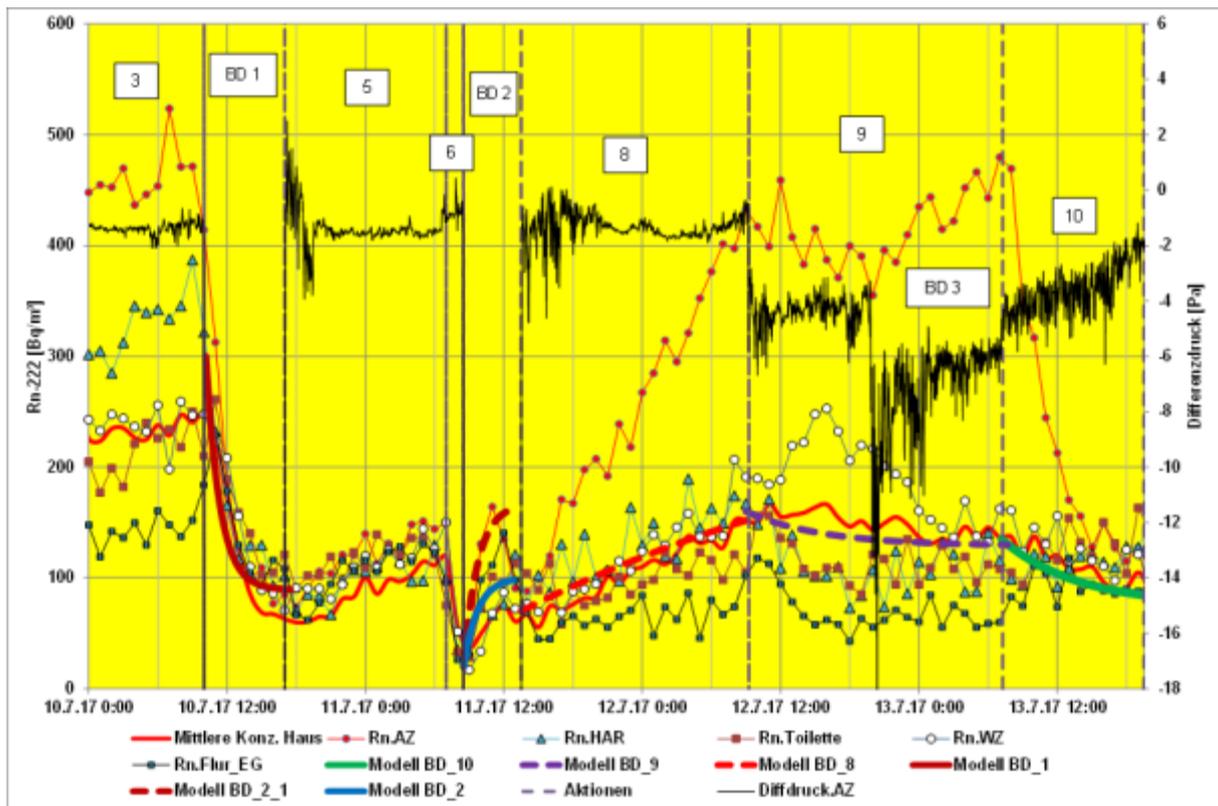


Abbildung 17: Wie Abbildung 15, jedoch für weitere Aktionen und dem 3. BDT

Anschließend (vom 11.7. 13:30 bis 12.7.2017 9:15) entwickelte sich die mittlere Radonkonzentration in dem abgedichteten Haus (Aktion 8, Tabelle 5) bei abgeschalteter Lüftung vergleichbar mit den Aktionen 1 und 3, d.h. die mittlere Radonkonzentrationen stieg im gesamten Haus auf etwa 200 Bq/m³ linear an, wobei sich die Radonkonzentrationen im Flur über einen Zeitraum von knapp 24 Stunden wenig änderten und nur ca. 100 Bq/m³ erreichten. Die Ursache hierfür ist, wie bereits diskutiert, dass vor allem größere Radonfrachten vorrangig in Wohn- und Arbeitszimmer gelangten und der Radonkonzentrationsaustausch mit den ande-

ren Räumen wegen der geschlossenen Türen mehr oder minder stark eingeschränkt war. Auffällig ist wiederum, dass, wie zu Beginn der Untersuchungen festgestellt und diskutiert, die Radonkonzentration im AZ am stärksten ansteigt. Dies ist auch so im Normalbetrieb (normale Nutzungsbedingungen) des Hauses.

Die zeitliche Entwicklung der mittleren Radonkonzentration im Haus (linearer Anstieg) wird durch die gleichen Modellparameter wie in der Anfangsphase (vgl. Ergebnisse in Abbildung 10) gut erfasst, so dass in dieser Situation bei einem resultierenden mittleren Unterdruck von ca. 2 Pa eine Radonquellstärke von ca. 11 Bq/(m³ h) zu veranschlagen ist.

4.3.4.2 3. BDT (Aktion 9)

Am 12.07.2017 wurde ein weiterer Unterdruckversuch (3. BDT) durchgeführt, wobei die im Haus installierten Ventilatoren benutzt wurden, die einen Luftwechsel λ_{LW} von 0,16 h⁻¹ im Haus induzieren. Der Unterdruck erhöhte sich jetzt bis auf ca. 6 Pa. Bei diesem immer noch vergleichsweise niedrigen Unterdrücken wird das Verhältnis der Infiltrationsraten $\beta = \lambda_Q/\lambda_{LW}$ noch nicht stark zu Gunsten von λ_{LW} verschoben, so dass, wie im Kapitel 3.2.3 ausgeführt, kein stark ausgeprägter exponentieller Abfall der sich entwickelnden mittleren Radonkonzentration im Erdgeschoss eintritt. Die Modellkurve in der Abbildung 17 illustriert diesen Sachverhalt. Die Radonquellstärke beträgt 20 Bq/(m³ h), so dass der mittlere Radonkonzentrationswert des sich herausbildenden Plateaus bei etwa 130 Bq/m³ anzusiedeln ist. Der Radonkonzentrationsverlauf im Arbeitszimmer (AZ) zeigt, dass unter diesen Randbedingungen keine ausgeprägte Änderung des hohen Radonkonzentrationsniveaus zu beobachten ist, der jedoch nach Beginn der Aktion 10 rapide beendet wird. Beim 1. BDT wurde dagegen im Vergleich zu Aktion 9 noch ein starker exponentieller Abfall festgestellt, da wegen des gewählten hohen Unterdrucks von ca. 50 Pa sich der Parameter $\beta = \lambda_Q/\lambda_{LW}$ im Ergebnis der überwiegenden Zufuhr von atmosphärischer Außenluft stark verringerte. Die in der Aktion 9 erhaltenen Ergebnisse belegen des Weiteren, dass bei niedrigen Absaugunterdrücken deutlich längere Messzeiten von mehreren Stunden ins Kalkül zu ziehen sind, um belastbare Ergebnisse zu erhalten.

4.3.4.3 Normale Nutzungsbedingungen (Aktion 10)

Am 13.7.2117 um 7:15 Uhr wurden nach Aktion 9 (s. Tabelle 5) die Lüftungsklappen geöffnet und das Haus so betrieben, wie es im Normalfall auch genutzt wird. Durch das Öffnen der Lüftungsklappen wird im Haus kein zusätzlicher Unterdruck aufgebaut und der Luftwechsel von $\lambda_{LW} = 0,16 \text{ h}^{-1}$ wird jetzt nahezu drucklos bei ca. 2 Pa Unterdruck realisiert. Im Unterschied zu Aktion 9 (3. BDT) wird jetzt das Verhältnis der Infiltrationsraten von λ_Q / λ_{LW} zu Gunsten von λ_{LW} verändert, da wegen der geöffneten Lüftungsklappen signifikant mehr Außenluft angesaugt wird. Die im Arbeitszimmer (AZ) und im übrigen Haus existierenden Radonkonzentrationen werden rasch verdünnt, so dass sich der in Kapitel 3.2 beschriebene exponentielle Abfall manifestiert und ein Plateauwert von etwa 100 Bq/m^3 am Ende der Aktion 10 erreicht wird. Die Modellkurve BD_10 wurde mit der Quellstärke $Q = 11 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{h}}$ be-

rechnet, die auch für das Haus aus dem anfänglichen linearen Anstieg der Radonkonzentrationen nach Gl. (17) in der Aktion 1 (Lüfter aus, Lüftungsklappen geschlossen, s. Tabelle 5) mit ca. $11 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \text{ h})$ abgeschätzt wurde (s. Ergebnisse in Abbildung 8). Bei einem eingeschränkten Luftwechsel von $\lambda_{LW} = 0,038 \text{ h}^{-1}$ wurden mittlere Radonkonzentrationen im Haus im Bereich von $250 - 300 \text{ Bq/m}^3$ erreicht. Wird jedoch der bei geringen Unterdruck von 2 Pa herrschende Luftwechsel von $\lambda_{LW} = 0,038 \text{ h}^{-1}$ durch Öffnen der Lüftungsklappen und Einschalten der Lüfter auf $\lambda_{LW} = 0,16 \text{ h}^{-1}$ erhöht, strömt in das Haus vorrangig nur radonarme Außenluft, während sich die Radoninfiltrationsrate λ_Q wegen des unverändert geringen Unterdrucks praktisch nicht ändert. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, d.h. um die Radonkonzentrationen im Haus nicht ansteigen zu lassen, sollte immer die Erhöhung des Luftwechsels drucklos erfolgen. In diesem Fall wird nicht noch zusätzlich Bodenluft angesaugt, wie dies grundsätzlich immer beim gewöhnlichen BDT erfolgt, um die Dichtigkeit der Gebäudehülle zu testen.

4.4 Fazit der BD Messungen im Objekt 1

Es wurde festgestellt, dass bei einer vergleichsweise niedrigen Quellstärke und Luftwechselraten von $\lambda_{LW} = 0,16 \text{ h}^{-1}$ unter normalen Nutzungsbedingungen des Hauses, die mittlere Radonkonzentration trotz der ständigen und weitestgehend drucklosen Lüftung bei oberhalb von 100 Bq/m^3 anzusiedeln ist. Da jedoch die Radonverfrachtung im Gebäude meistens bei geschlossenen Türen durch Türspalte erfolgt, entwickeln sich die Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen sehr unterschiedlich, so dass die durch die BD Tests gewonnenen Informationen die Situation in den einzelnen Räumen nur bedingt widerspiegeln können.

Die Prognostizierung der aus den BD Messungen gewonnenen Informationen auf die der einzelnen Räume ist eine Herausforderung, die u.E. nur mit Hilfe eines extrem konservativen Szenarios (s.u.) zu begegnen ist. Im Unterschied zum gewöhnlichen BDT, bei dem nur eine instantane (sofortige) Reaktion von Systemvariablen (z.B. Volumenströme) auf eine Druckänderung registriert wird, und bei dem alle Räume des Hauses involviert sind, ist dagegen die Änderung der Radoncharakteristiken ein vergleichsweise langsamer Prozess, der von der Lage und der Art der Radonquelle, dem Intrusionsverhalten des Radons in das Haus und vor allem auch von der Vermischung sowie dem Radontransport innerhalb des Hauses im starken Maße abhängt. Deshalb können Radondichtheitsprüfungen von vornherein nicht nach wenigen Minuten Unterdrückanlegung bereits schlüssige Ergebnisse liefern, wie es beim BDT der Fall ist.

In der Abbildung 18 ist zunächst unter normalen Nutzungsbedingungen die zeitliche Entwicklung der Radonkonzentrationen einzelner Räume des Erdgeschosses ca. 3 Wochen vor Beginn der 1. BT Messung dargestellt. Diese für das untersuchte Haus typischen Ergebnisse zeigen, dass die entsprechenden Mittelwerte der Radonkonzentrationen zwischen 126 Bq/m^3 und 211 Bq/m^3 (s. Tabelle 6) variieren und Spitzenwerte im Arbeitszimmer (AZ) von 249 Bq/m^3 erreicht wurden. Ob dies im Langzeitmittel ebenfalls so zutrifft, kann nur durch entsprechende Messungen sicher erkundet werden.

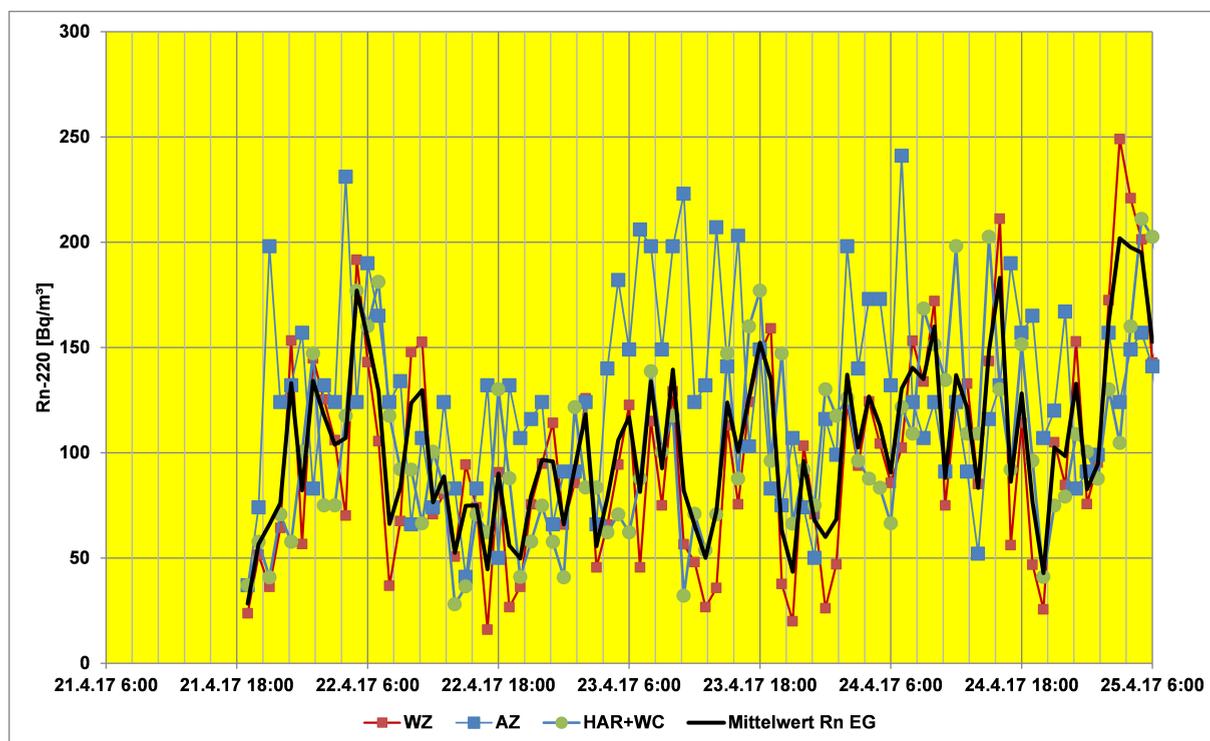


Abbildung 18: Radonkonzentrationsentwicklung im Erdgeschoss des Hauses unter normalen Nutzungsbedingungen (Lüftungsventilatoren eingeschaltet mit $60 \text{ m}^3/\text{h}$, Luftwechselrate $\lambda_{\text{LW}}=0,16 \text{ h}^{-1}$, Unterdruck etwa 1 - 2 Pa)

Tabelle 6: Übersicht über die mittleren Radonkonzentrationen im Erdgeschoss des Hauses

| Raum | [Bq/m ³] |
|-----------------------------------|----------------------|
| WZ (Wohnzimmer) | 126 |
| AZ (Arbeitszimmer) | 211 |
| Hausanschlussraum und WC (HAR+WC) | 141 |
| Erdgeschoss (EG) | 144 |

Nach der Durchführung des BDT stehen jedoch nur die Informationen über die Radonkonzentrationsentwicklung im Abstrom und den Luftwechsel zur Verfügung. Nicht bekannt ist, ob die gemessene Radonquellstärke die des gesamten Hauses reflektiert oder nur die des "Mischkessels" Flur, von dem abgesaugt wurde. Deshalb kann nach den vorliegenden Ergebnissen allein durch die Messung der Radonkonzentration im Abstrom und der ermittelten Luftwechselrate nur belastbar prognostiziert werden, ob im Jahresmittel die Radonkonzentration im gesamten Haus, d.h. bezogen auf das Hausvolumen, $< 300 \text{ Bq/m}^3$ sein wird. Ob dies jedoch für jeden einzelnen Raum des Hauses gilt, kann nicht prognostiziert werden. Dies ist

u.E. eine wichtige Feststellung, deren Konsequenzen für die Auswahl eines Verfahrens zur Radondichtheitsbestimmung eines Hauses zu berücksichtigen sind. Ein sehr konservatives Szenario wäre, dass z.B. die gemessene Radonquellstärke nur einem Raum, z.B. nur dem Wohnzimmer, zuzuordnen ist. In dem Fall müssten die Radonquellstärken einen vergleichsweise sehr geringen Wert nicht überschreiten.

Für eine einzelne Unterdruckmessung zur Bestimmung der jeweiligen Radonquellstärke sind in Abhängigkeit vom gewählten Unterdruck folgende Messzeiten ins Kalkül zu ziehen:

- Unterdruck 50 Pa, Messdauer ca. 2 - 5 Stunden,
- Unterdruck 20 Pa, Messdauer ca. 5 - 7 Stunden,
- Unterdruck 10 Pa, Messdauer ca. 12 Stunden

Das Schema für eine Auswertung einer BDT Messung kann verkürzt durch Absolvierung folgender 2 Schritte umschrieben werden:

1. Extrapolation der bei einer Druckstufe gemessenen Radonquellstärke auf eine Situation, die unter normalen Nutzungsbedingungen des Hauses anzunehmen ist.
2. Prognose der Radoninnenraumkonzentration für die Aufenthaltsräume unter Berücksichtigung der bei der Planung zugrunde gelegten Luftwechselrate von z.B.

$\lambda_{LW} = 0,5 h^{-1}$, wobei z.B. ein Unterdruck von 2 - 4 Pa bei einer drucklosen Lüftung nicht überschritten werden sollte. Ist keine technische Lüftung installiert, sind weitere Annahmen zum Nutzungsverhalten zu treffen, um die Luftwechselrate zu erreichen.

Die Prognose für die zu erwartende Radoninnenraumkonzentration der Aufenthaltsräume kann nur auf sehr konservativen Annahmen beruhen, da praktisch nur Informationen über die Menge der abgesaugten Luft und die dabei herrschende Radonkonzentration im Abstrom zur Verfügung stehen. Ein extrem konservatives Szenario stellt die Berechnung der mittleren Radonkonzentration für einen ausgewählten Aufenthaltsraum c_{Raum} unter der Annahme dar, dass die aus der BD Messung extrahierte Radonquellstärke nur allein diesem Raum zuzuordnen ist. In dem Fall (extremes Szenario) wäre anzunehmen, dass

$$c_{Raum} = \frac{V_{Haus}}{V_{Raum}} c_{Haus} \quad (32)$$

gilt, wobei V_{Haus} und V_{Raum} die Raumvolumina des gesamten Hauses bzw. des betrachteten Aufenthaltsraums sind und c_{Haus} die aus der BD Messung resultierende mittlere Radonkonzentration für das Haus unter normalen Nutzungsbedingungen erfasst.

Ein Weg zur Verbesserung der Prognosesicherheit eines BDT wäre die Durchführung von gestaffelten Tests im Bereich von 4 bis 50 Pa Unterdruck. Messungen bei niedrigen Unterdrücken sind jedoch viel langwieriger (> 8 - 12 Stunden), um einen Plateauwert der Radonkonzentrationsentwicklung erreichen zu können. Deshalb entsteht die Frage, wie sinnvoll ist es überhaupt, einen BDT durchzuführen, um die Radondichtheit eines Hauses nachzuweisen.

Konkurrenzlos erscheint hier die zur Kontrolle praktizierte Messung der Radonkonzentrationsentwicklungen in allen Räumen eines Hauses über ca. einen Tag im Vorfeld der Bauabnahme zu sein. Damit steht ein vollständiges Spektrum an Informationen zur Verfügung, um eine belastbare Prognose erstellen zu können. Die im Arbeitszimmer herrschende erhöhte Radonkonzentration könnte sofort nachgewiesen und nach wenigen Stunden Messzeit dessen Radonquellstärke bestimmt werden. Gleichzeitig können auch die Radonquellstärken in den anderen Räumen extrahiert werden. Dies ist in der Abbildung 19 illustriert. Vor Beginn der Messungen wurde das gesamte Haus gelüftet.

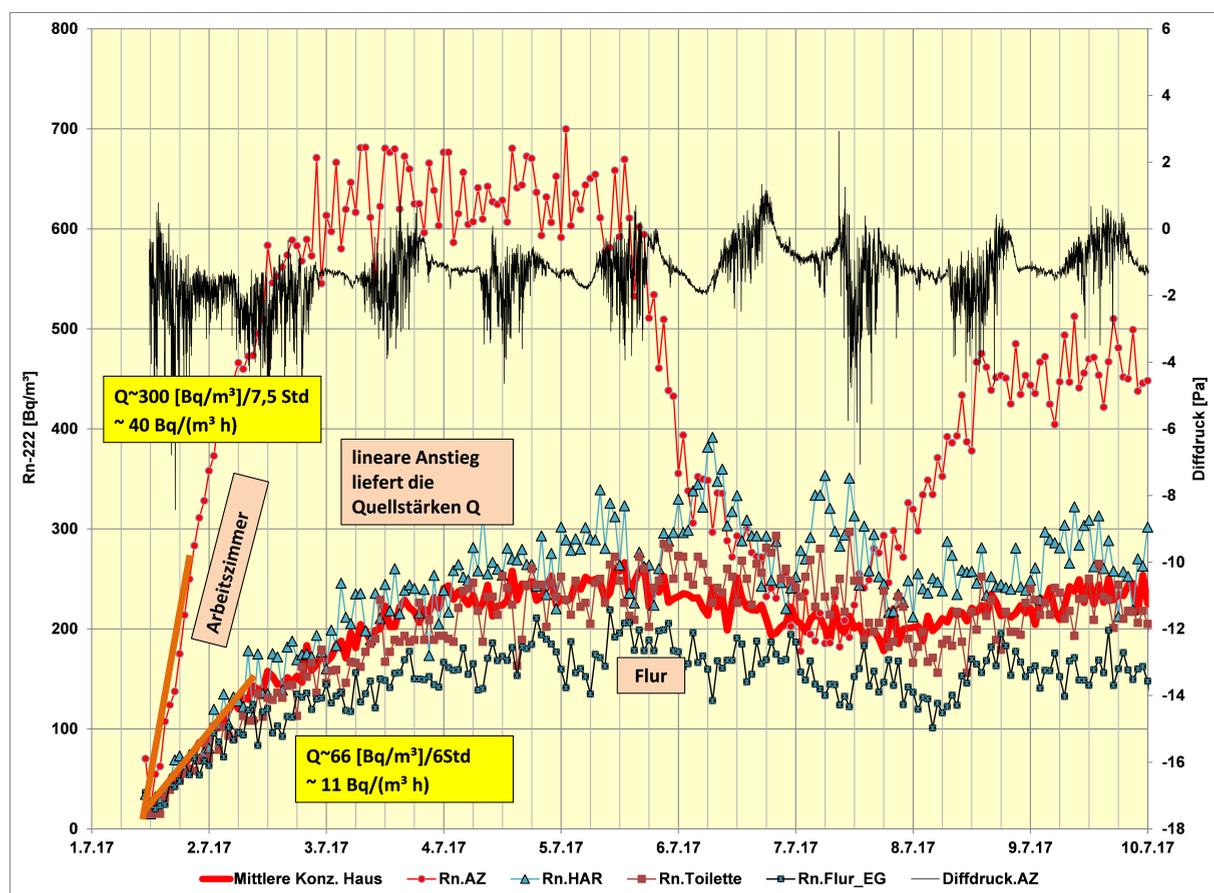


Abbildung 19: Bestimmung der Radonquellstärke nach der Anstiegsmethode

Der eigentliche Vorteil einer BD Messung besteht darin, bereits in ca. 2 - 3 Stunden einen Plateauwert der Radonkonzentrationsentwicklung im Abstrom zu erreichen, wenn vergleichsweise hohe Unterdrücke von ca. 50 Pa zielführend sind. Hinzu kommt die Arbeitszeit für das Abdichten des Hauses und den Aufbau der BD Technik. Letzteres ist in etwa 1 Stunde zu schaffen. Die Zeitdauer für die Abdichtung des Hauses ist immer schwer zu prognostizieren. In der Regel sollte mindestens von 1 Stunde ausgegangen werden. Auch für den Abbau und die Entfernung der Abdichtung ist etwa von einer Stunde auszugehen. Alles in allem sollte für eine BDT eine Untersuchungsdauer von ca. 6 - 8 Stunden ins Auge gefasst werden, wenn bei Unterdrücken im Bereich von 50 Pa gearbeitet wird.

In der Praxis ist jedoch davon auszugehen, dass das Verhältnis β der jeweiligen Infiltrationsraten von $\lambda_Q(\Delta P)$ und $\lambda_{LW}(\Delta P)$ im Abstrom nicht unabhängig vom gewählten Unterdruck ist. Deshalb müssen nachgeschaltete Unterdruckteste durchgeführt werden, so dass sich die Messdauer auf 2 Tage ausdehnen könnte. Die Qualität der mit der Anstiegsmethode erreichten Prognosesicherheit in Hinblick auf eine Aussage, ob das untersuchte Haus radondicht ist, kann mit der Unterdruckmethode u.E. nur in Spezialfällen erreicht werden. Das Vorliegen eines solchen Spezialfalls kann aber mit einfachen Messungen nicht nachgewiesen werden. Auch hierfür wären umfangreichere Messungen mit gestaffelten Unterdruckverhältnissen erforderlich.

Als kurzes Zwischenfazit wäre deshalb zu ziehen, dass ein BDT dann sinnvoll ist, wenn im Ergebnis der Radonmessungen bei unterschiedlichen Unterdrücken sofort anhand resultierender sehr niedriger Quellstärken belastbar ausgesagt werden kann, dass das Haus als radondicht einzuschätzen ist. Anderenfalls ist das Haus zunächst als radonundicht zu bezeichnen, jedoch durch umfangreichere Zusatzmessungen könnte dann die tatsächliche Situation realistischer eingeschätzt werden.

Hilfreich sind hierbei baubegleitende Radondichtheitsprüfungen, die in der praktischen Umsetzung der Radondichtheitsprüfung ohne Alternative sind, durchzuführen. Auf keinen Fall sollten die Radondichtheitsprüfungen im Rahmen der Bauübergabe ausgeführt werden, da bei einem negativen Ausgang die Leckagensuche etc. sehr aufwendig und die Reparaturarbeiten sehr kostspielig sind. Die bei IAF etablierte praxisnahe Vorgehensweise ist, die Radondichtheitsprüfung nach Fertigstellung der Gebäudehülle bzw. des Kellers durchzuführen, ehe z.B. der Fußboden in Einfamilienhäusern ohne Keller aufgebaut oder der Keller weiter ausgebaut wird.

Für den Zeitpunkt der Untersuchung ist letztlich mitentscheidend, wer einen Radondichtheits-test beauftragt bzw. einfordert. Mit der Vorgabe, dass ein solcher Test nach weitgehender Fertigstellung im Vorfeld der Übergabe erfolgt, also der Bauherr einen Nachweis zur Radon-

dichtheit verlangt oder die Baufirma (Hauptauftragnehmer) sichergehen will, das erhöhte Radonkonzentrationen nicht auf die Bauausführung zurückzuführen sind.

5 Ergebnisse eines BDT: Objekt 2 (Messung im Souterrain)

5.1 Zum Hausaufbau und Randbedingungen für den BDT

Die Abbildung 20 zeigt die Lage der einzelnen Räume im Souterrain (Objekt 2) eines neugebauten Hauses. Über dem (Souterrain) befindet sich etwas versetzt der Wohnbereich. Nur das Souterrain hat direkten Kontakt zum Baugrund, der vor allem aus Granit bzw. Granitzeratz besteht und durch Radonkonzentrationen in der Bodenluft von 50 - 100 kBq/m³ charakterisiert ist.

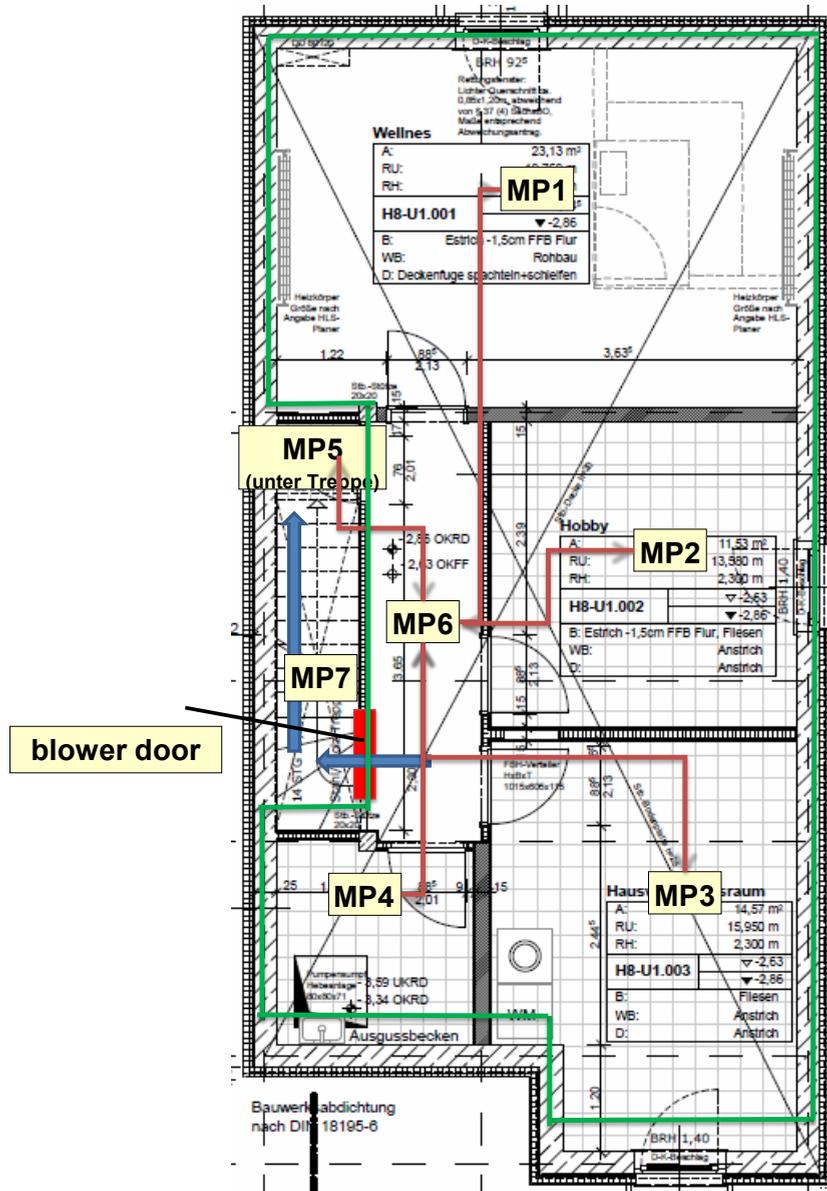


Abbildung 20: Schematische Darstellung des Grundrisses vom Souterrain und der Lage der einzelnen Räume, der Ort für die Installation der Tür für den BDT ist eingezeichnet

Das Souterrain kann über eine Treppe (links in Abbildung 20) vom Wohnbereich betreten werden. Unterhalb der Treppe befindet sich ein fensterloser Raum (MP5). Der BD Unterdruck wird am Ende der Treppe, d.h. am Zugang zum Flur des Souterrain mit dem alle Räume über Türen verbunden sind, realisiert. Durch den Unterdruck wird die Luft aus allen Räumen in den Flur abgesaugt und über den Treppenaufgang und ein offenstehendes Fenster direkt am Übergang von der Treppe zum Wohnbereich in die Außenatmosphäre abgelei-

tet. In allen 7 Räumen wurden sowohl die Radonkonzentrationen als auch die entsprechenden Differenzdrücke, wie skizziert in Abbildung 20, während des BDT gemessen.

Alle Räume im Testbereich sind zwar durch Türen verschlossen, jedoch kann wegen des Fehlens von Schwellen ein mehr oder minder starker Luftwechsel mit dem Flur des Souterrains erfolgen, der sehr genau gemessen wurde. Des Weiteren ist zu bemerken, dass in allen Räumen der Fußbodenestrich, der auf einer ca. 12 cm mächtigen Styroporschicht (Fußbodendämmung) aufgebracht wurde, "schwimmend" verlegt ist. Über die dabei entstehenden Randfugen kann das in das Haus eindringende Radon durch Leckagen in alle Räume migrieren, wobei sich in auch in allen Räumen ein annähernd gleich hohes Radonkonzentrationsniveau entwickelt.

5.2 Radonkonzentrationsentwicklung im Souterrain

Im Vorfeld der BDT Messungen wurden über einen Zeitraum von ca. 3 Wochen die Radonkonzentrationen in allen Räumen gemessen, wobei vor Messbeginn das gesamte Souterrain gelüftet wurde. Aus dem Anstieg der Radonkonzentrationen kann dann sehr genau der Radonquellterm unter normalen Nutzungsbedingungen bestimmt werden. Diese praxisorientierende Methode wurde z.B. in Rahmen des Forschungsvorhabens [49] vorgestellt.

In der Abbildung 21 ist dieser Sachverhalt dargestellt. Es ist zu erkennen, dass nach Beendigung der Querlüftung die Radonkonzentration im Flur (MP6, Abbildung 20), der mit allen Räumen über die Türspalte lufttechnisch verbunden ist, zunächst linear ansteigt und dann annähernd ein Plateau erreicht. Die sporadisch auftretenden Radonminima sind durch die beim Betreten des Souterrains induzierten zusätzlichen Luftwechsel bedingt. Aus den Ergebnissen in der Abbildung 21 ist ersichtlich, dass eine Messdauer von ca. 12 Stunden (Messung über Nacht) bereits ausgereicht hätte, sowohl die Radonquellstärke als auch über den erreichten Plateauwert die bei den Messungen herrschende Luftwechselrate sehr genau zu bestimmen.

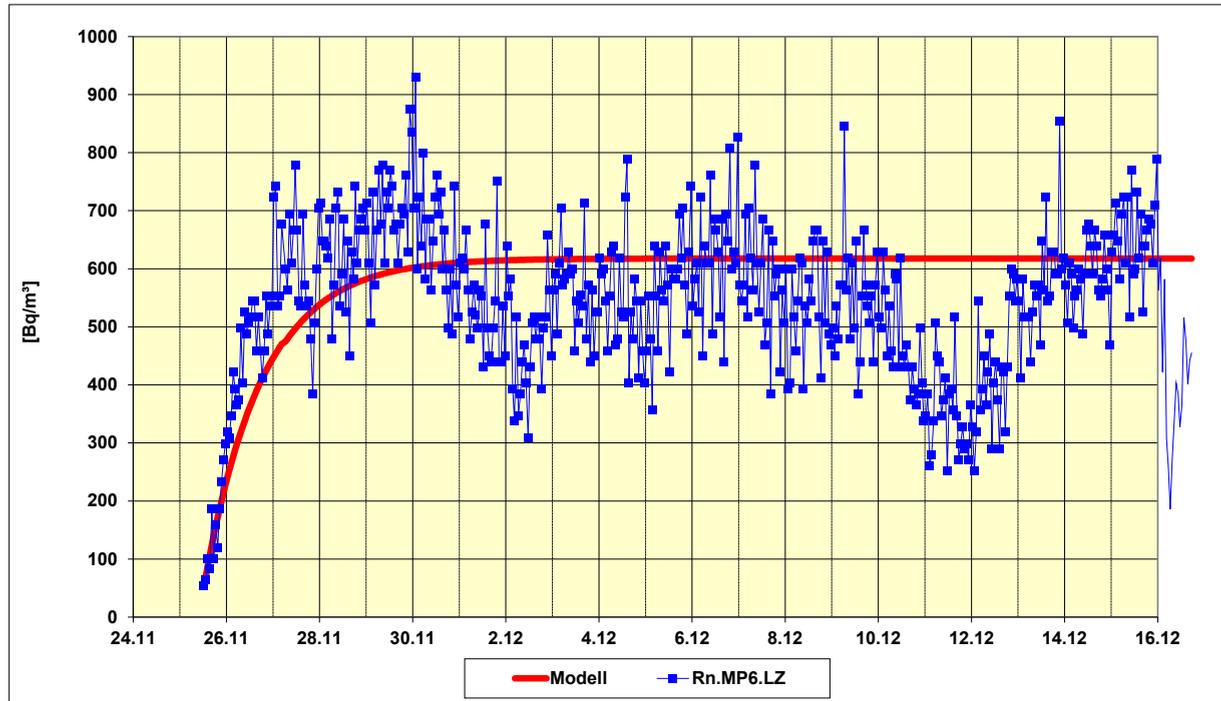


Abbildung 21: Zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration im Flur des Souterrains (Messpunkt MP6), der mit den anderen Räumen lufttechnisch (Türspalte) verbunden ist

Die Modellkurve beschreibt die charakteristischen Merkmale des Radonplots sehr gut, wobei die abgeleitete Luftwechselrate λ_{LW} im Souterrain von ca. $0,027 \text{ h}^{-1}$ aus der Anpassung an die experimentell bestimmte Radonkonzentration im Flur nach Gl. (11) extrahiert wurde und einen wesentlichen Systemparameter darstellt. Damit lässt sich der Radonquellterm nach Gl. (14) mit $Q \approx 20 \text{ Bq}/(\text{m}^3\text{h})$ ausreichend genau bestimmen. Die Ergebnisse dokumentieren, dass im Souterrain ein extrem niedriger Luftwechsel herrscht.

Auch die Radonkonzentrationen im großen Seitenraum des Souterrains (MP1) und im Raum 2 (MP2) zeigen eine Radonkonzentrationsentwicklung, die mit der im lufttechnisch verbundenen Flur praktisch übereinstimmt. Dies ist anhand der vorliegenden Ergebnisse in der Abbildung 22 illustriert.

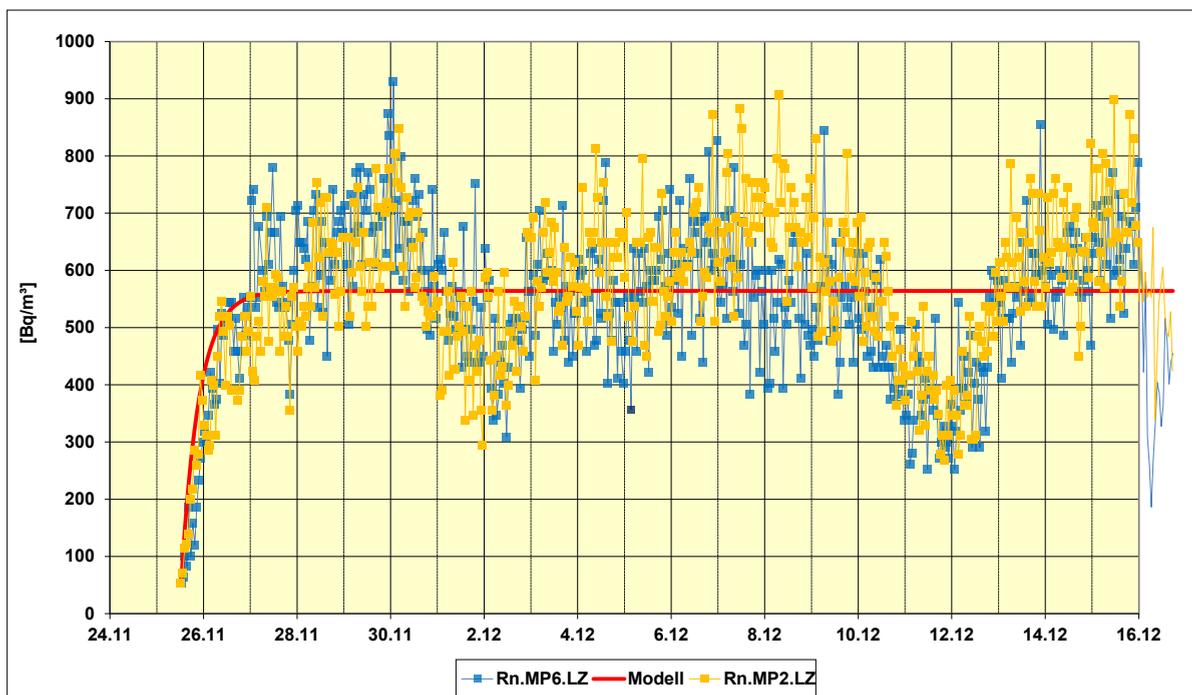
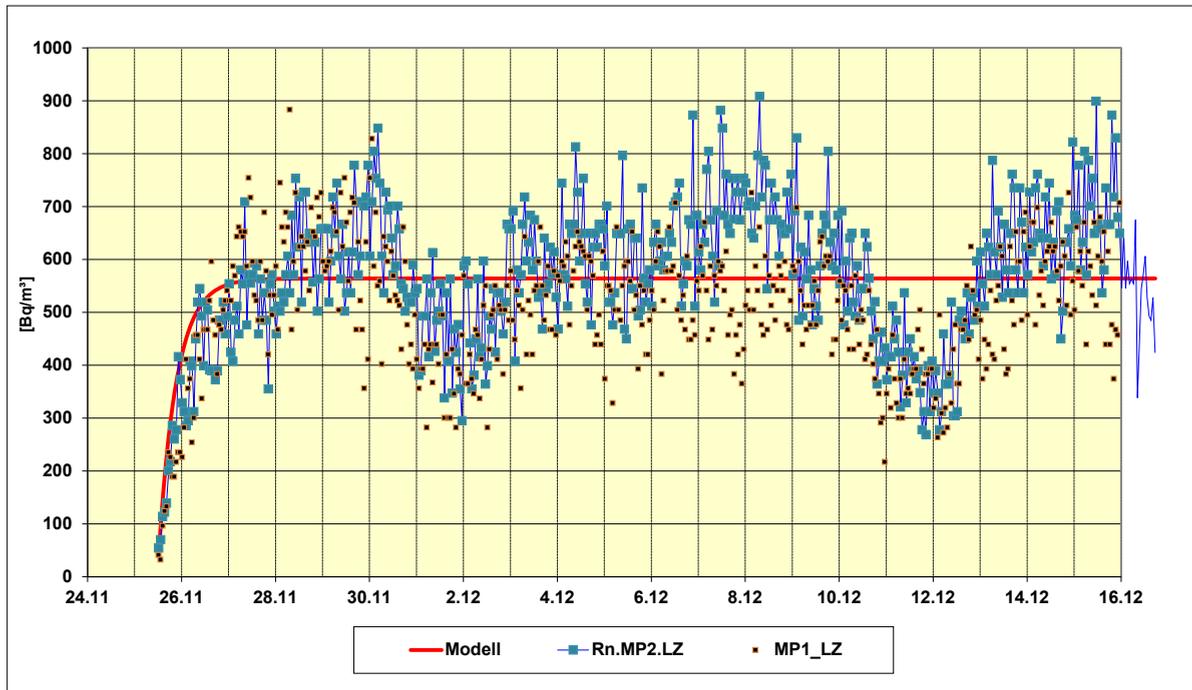


Abbildung 22: Wie Abbildung 20, jedoch für die Messpunkte MP1, MP2 (oberes Bild) und MP2, MP6 (unteres Bild)

Die Situation stellt sich etwas anders für den Hauswirtschaftsraum (MP4) dar (s. Abbildung 23). Hier ist zu erkennen, dass nach der Lüftung des Souterrains die Radonkonzentration auf höhere Werte als im Flur ansteigt. Auch die über den gesamten Messzeitraum resultierende mittlere Radonkonzentration ist mit 662 Bq/m^3 etwa um 120 Bq/m^3 höher als die im Flur (MP6). Dies bedeutet, dass Radon aus dem Baugrund möglicherweise bevorzugt über den Hauswirtschaftsraum, der über unterschiedliche Ein- und Ausgänge der Medien verfügt, in das Gebäude migriert. Im Kapitel 5.3 wird anhand des BDT verifiziert, dass sich im Hauswirtschaftsraum eine andere Charakteristik des Radonkonzentrationsverlaufs herausbildet, wenn an der Flureingangstür ein Unterdruck angelegt wird.

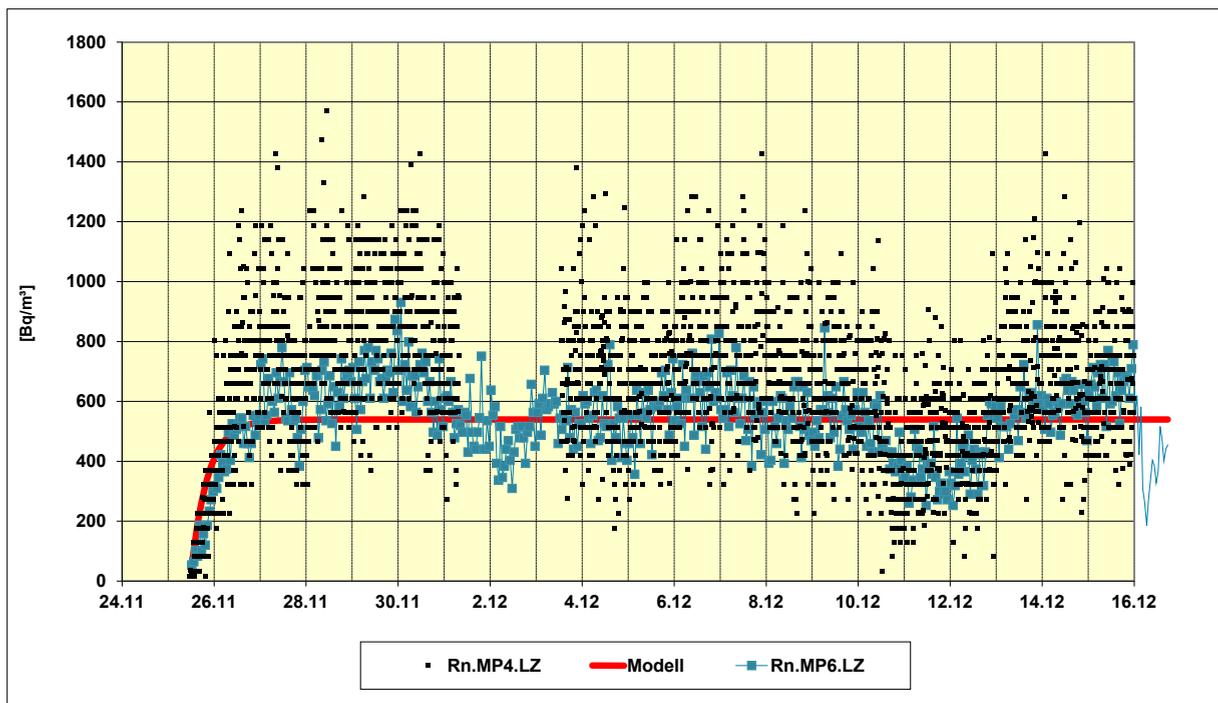


Abbildung 23: Wie Abbildung 20, jedoch für den Hauswirtschaftsraum (MP4) im Vergleich zum Flur (MP6) (oberes Bild) und gleitender Mittelwert für den MP4 im unteren Bild

Die Auswertung der zeitaufgelösten Radonmessungen im Souterrain haben somit gezeigt, dass, wie bereits im Forschungsvorhaben [49] dargelegt, die Radonquellstärke des Hauses sehr genau bestimmt werden kann, wenn nach dem Lüften des Hauses die zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration über einen gewissen Zeitraum solange verfolgt wird, bis sich ein Fließgleichgewicht von Radonintrusion und Radonabführung eingestellt hat. Aus dem linearen Anstieg kann nach den im Kapitel 3.1 abgeleiteten Gleichungen die Quellstärke und mit Hilfe des Plateauwerts die Luftwechselrate bestimmt werden. Im Kapitel 5.3 wird anhand

dieser Ergebnisse dargelegt, was zu erwarten ist, wenn infolge eines Unterdrucks die Radonfrachten, die in ein Gebäude eindringen, mehr oder minder stark modifiziert werden.

5.3 BD Messungen im Souterrain des Hauses

5.3.1 Vorbemerkung zu den Messungen

Die Absaugung für die BDT Messungen wurde im Flur (MP6) installiert (s. Abbildung 20). In den Abbildungen 24 und 25 sind die bei dem BDT benutzten Unterdrücke, Volumenströme und Luftwechselraten als Funktion der Zeit dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass etwa in jedem Unterdruckregime ca. eine Stunde gesaugt wurde und die jeweiligen Volumenströme bzw. Luftwechselraten durch die automatisch arbeitende BDT Technik sehr gut konstant gehalten wurden.

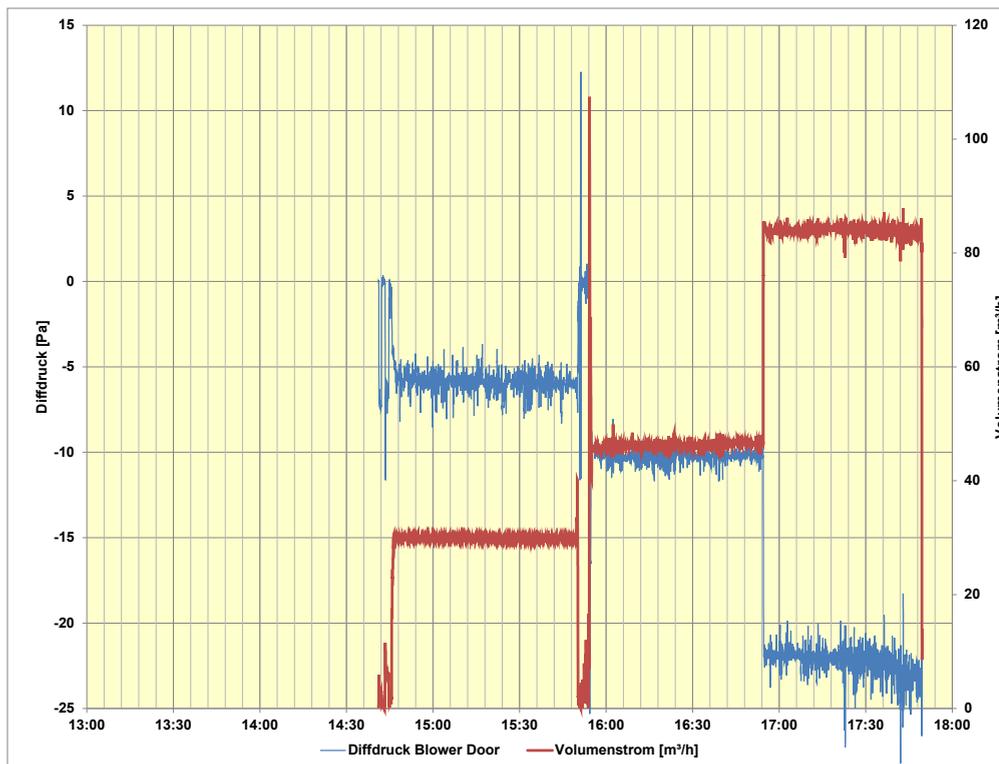


Abbildung 24: Zeitliche Staffelung von Differenzdruck und resultierenden Volumenströmen für den BDT in Abhängigkeit von der gewählten Saugzeit

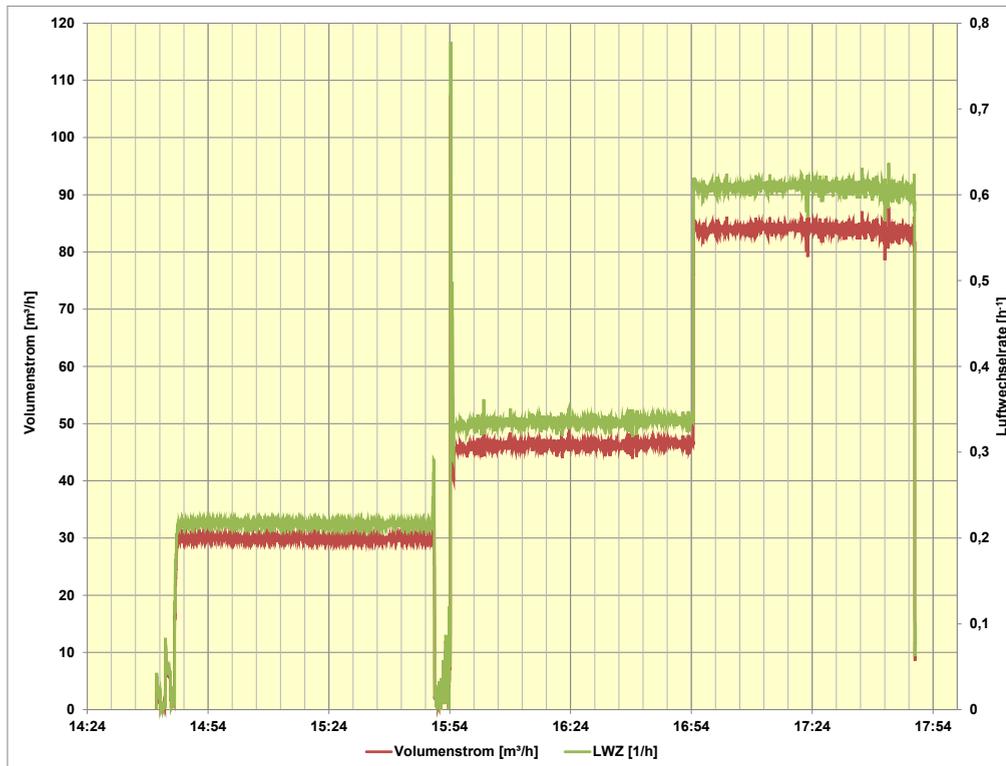


Abbildung 25: Wie Abbildung 24, jedoch für Luftwechselraten

In der Tabelle 7 sind die angelegten mittleren Volumenströme und die daraus folgenden Luftwechselraten zusammengestellt. Zum Beispiel wird in der Unterdruckstufe mit einem Volumenstrom von ca. 30 m³/h ($\lambda_{LW}=0,22 \text{ h}^{-1}$), nur etwa 20 % des Gesamtvolumens des Souterrains von ca. 138 m³ in einer Stunde und in der höchsten Unterdruckstufe mit einem Absaugstrom von 84,4 m³/h nur etwa 60% des Luftvolumens ausgetauscht. Bei einem Unterdruck von ca. 2 Pa, der etwa dem des Normalzustands entspricht, müsste man mindestens etwa 15 Stunden absaugen, um einen Plateauwert der Radonkonzentration im Abstrom zu erhalten.

Tabelle 7: Übersicht über die Volumenströme, Unterdrücke und Luftwechselraten, die bei den BDT benutzt wurden, sowie die abgeschätzten Zeiträume für das Erreichen eines Plateauwerts.

| $V_{in} [\text{m}^3/\text{h}]$ | $\lambda_{in} [\text{h}^{-1}]$ | Unterdruck [Pa] | Zeitraum zum Erreichen des Plateauwerts [h] |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|---|
| 84,3 | 0,61 | 23 | 2 - 4 |
| 46,7 | 0,34 | 10 | 4 - 6 |
| 29,9 | 0,22 | 5 | 6 - 8 |
| 13,8 | 0,03 | 2 | 15 |

5.3.2 Ergebnisse der Differenzdruckmessungen für einzelne Räume

Wie in Abbildung 20 dargestellt, wurden parallel zu den BDT Messungen auch die Differenzdrücke zwischen dem Flur (MP6) und allen anderen Räumen des Souterrains gemessen, um eine Information über die lufttechnische Ankopplung der einzelnen Räume zu erhalten. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 8 beispielhaft für einen Volumenstrom von 84,4 m³/h zusammengestellt.

Tabelle 8: Übersicht über die Anteile der einzelnen Volumenströme aus den unterschiedlichen Räumen, die zum Gesamtvolumenstrom des BDT beitragen.

| Raum | Volumenstrom [m³/h] | Anteil [%] |
|--------------|---|-----------------------|
| MP1 | 28,8 | 33,60% |
| MP2 | 10,1 | 11,76% |
| MP3 | 13,1 | 15,32% |
| MP4 | 15,6 | 18,15% |
| MP5 | 18,1 | 21,17% |
| Summe | 85,7 | - |

Wegen der unterschiedlichen Breite der Türspalte sind die Räume unterschiedlich stark an den Flur, von dem aus die Absaugung erfolgte, lufttechnisch angekoppelt. Der so ermittelte Gesamtvolumenstrom von 85,7 m³/h stimmt sehr genau mit dem durch den BDT extrahierten Wert von 84,3 m³/h (s. Tabelle 8) überein.

Die in der Tabelle 8 zusammengestellten Ergebnisse sind typisch für ein Haus, da die Ankopplung an jeden einzelnen Raum praktisch immer unterschiedlich ist und somit sich auch in den einzelnen Räumen die Radonkonzentrationen unterschiedlich entwickeln.

5.3.3 Messung der Radonkonzentration im Absaugstrom des BDT

In der Abbildung 26 sind für einen Zeitraum von ca. 3 Stunden die im Absaugstrom aus dem Flur (MP6) gemessenen Radonkonzentrationen bei verschiedenen Unterdrücken dargestellt. Der Flur fungiert dabei als "Mischkessel" aller aus den unterschiedlichen Räumen abgesaugten Radonkonzentrationsströme. Es ist zu erkennen, dass die jeweiligen Radonkonzentrationen vergleichsweise stark im gewählten Messintervall von 10 Minuten variieren, wobei jedoch eine Abnahme der Radonkonzentrationen mit der Erhöhung des Absaugunterdrucks bzw. des Absaugstroms um ca. 30% zu beobachten ist. Dies bedeutet, dass sich durch die Erhöhung des Unterdrucks das Verhältnis $\beta = \lambda_Q / \lambda_{LW}$ zu Gunsten der Luftwechselrate λ_{LW} ändert, d.h. es strömt im Verhältnis zur Bodenluft mehr Zuluft aus der Außenatmosphäre in das Gebäude. Ob dies tatsächlich der Fall ist oder eine Folge dessen, dass sich die aus den unterschiedlichen Räumen angesaugten Luftströme nicht gleichmäßig und rasch im "Mischkessel" Flur (MP6) vermischen, kann nur spekuliert werden. Zudem muss auch beachtet werden, dass die Radonfrachten aus den einzelnen Räumen sehr unterschiedlich hoch sein können, was ebenfalls zu mehr oder minder hohen Fluktuationen der resultierenden Radonkonzentrationen im Abstrom führen kann. Dieser Sachverhalt manifestiert sich in einer deutlichen Zunahme der Höhe der Radonkonzentration in den Räumen MP2 und MP4 während der 3 Unterdruckphasen (s. Abbildung 27).

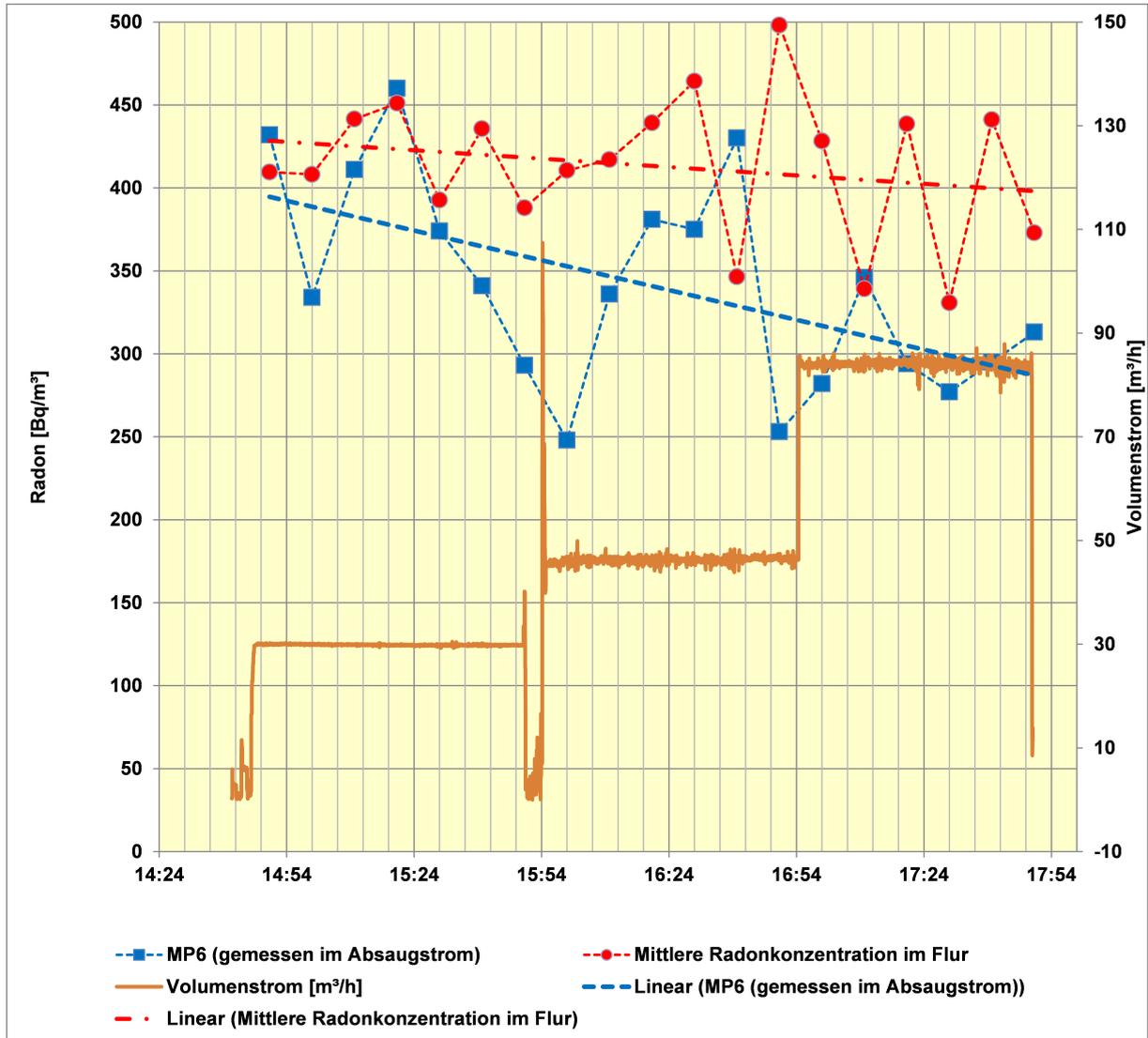


Abbildung 26: Wie Abbildung 25, jedoch zusätzlich zu den Volumenströmen V_{in} und Luftwechselraten λ_{in} sind die Ergebnisse der Radonmessungen im Absaugstrom und der mit Hilfe der gemessenen Volumenströme aus den angekoppelten Räumen berechneten mittleren Radonkonzentrationen im Souterrain mit angegeben

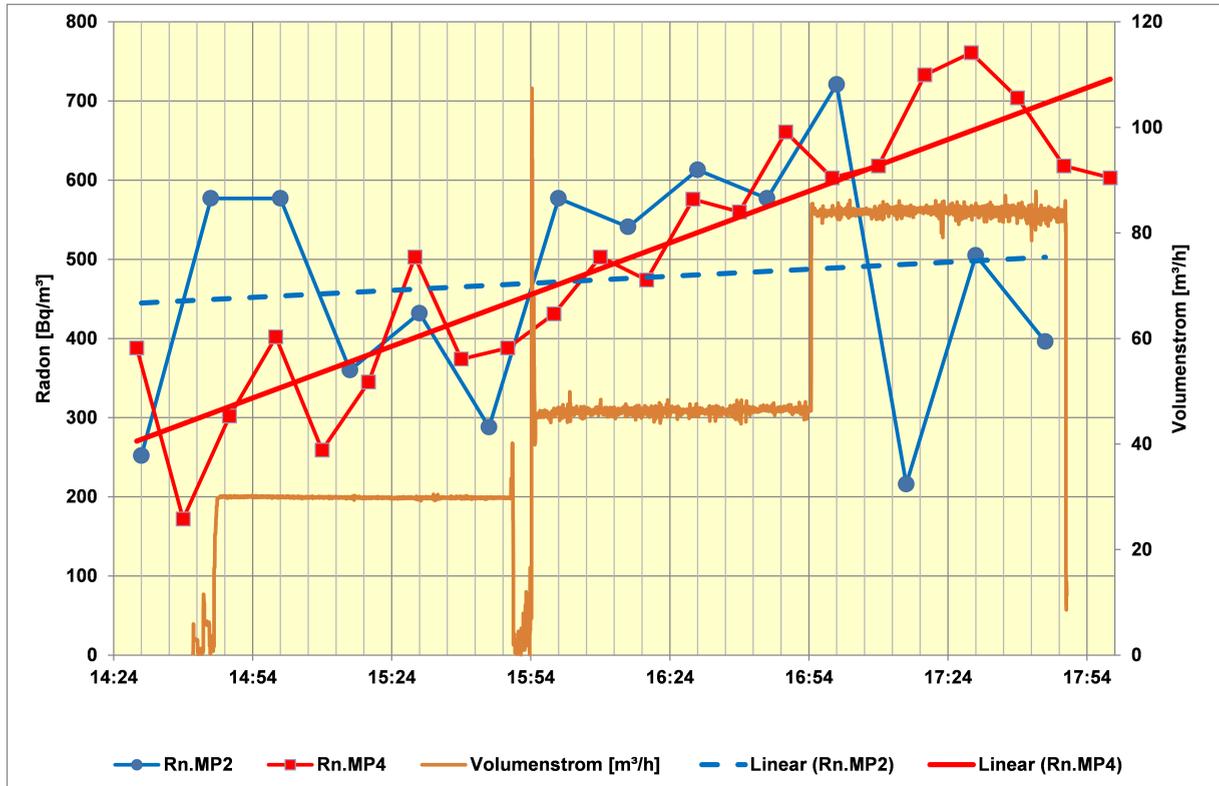


Abbildung 27: Wie Abbildung 25, jedoch für die Räume MP2 und MP4 (Hauswirtschaftsraum)

Die Zunahme der Höhe der Radonkonzentration in den Räumen MP2 und MP4 während der 3 Unterdruckphasen (s. Abbildung 27) signalisiert, dass auch die Radonquellstärken in entsprechender Weise in diesen Räumen anwachsen. Dies ist ein klarer Hinweis darauf, dass vorzugsweise radonhaltige Bodenluft über diese 2 Räume in das Souterrain einströmt. In andere Räume dringt verstärkt Außenluft ein, so dass im Endeffekt die Radonkonzentration in der Abluft nicht ansteigt, sondern deutlich absinkt. Zum besseren Verständnis sind in der Abbildung 26 die Ergebnisse einer Wichtung aller in den Flur eintretenden Radonaktivitätsströme (Bez. Mittlere Radonkonzentration im Flur), die explizit während des BDT gemessen wurden (s. Tabelle 8), mit dargestellt. Diese Ergebnisse dokumentieren, dass auch in diesem Fall abfallende Radonkonzentrationen als Funktion des Unterdrucks erhalten werden, jedoch die Fluktuationen deutlich geringer ausfallen. Hauptursache für diese offensichtliche Diskrepanz ist, dass sich bei der Absaugung Vorzugsströmungsrichtungen herausbilden, die einer ausreichenden Vermischung aller aus unterschiedlichen Räumen in den "Mischkessel" Flur eintretenden Radonfrachten entgegenstehen. Dieses Phänomen ist praktisch immer bei den BD Messungen zu beachten und desto stärker ausgeprägt, je höher der Unterdruck ist. Dieses Phänomen ist auch anhand eines Praxisbeispiels in Kapitel 4 diskutiert worden. Dort

wurde explizit nachgewiesen, dass erst eine längere Konsolidierungsphase zu betrachten ist, ehe sich eine belastbare mittlere Radonkonzentration im "Mischkessel" Flur herausgebildet hat. Für gewöhnliche BDT zur Luftdichtigkeitsprüfung ist dieser Umstand nicht von Bedeutung, da nur die ausgetauschte Luftfracht insgesamt eine Rolle spielt und nicht ihre mittlere Radonaktivitätskonzentration.

Im Idealfall sollte bei Verdoppelung des Absaugstroms auch eine Verdoppelung der Radonquellstärke resultieren, wobei die Radonkonzentration im Abstrom annähernd unverändert bleibt. Diese günstige Konstellation erlaubt dann sofort die bei einem hohen Unterdruck deduzierte Radonquellstärke auf eine Situation bei weit niedrigeren Unterdrücken zu extrapolieren und somit zu bewerten, ob letztlich das Haus als radondicht zu bezeichnen ist oder nicht. Um jedoch diesen Sachverhalt zu prüfen bzw. zu manifestieren, sind mehrere BD Messungen bei unterschiedlich hohen Unterdrücken erforderlich.

In der Abbildung 28 ist dieser Sachverhalt anhand von Modellrechnungen untersetzt. In beiden Modellkurven ist sowohl für den berechneten Mittelwert der Radonkonzentration im Flur als auch für die tatsächlich im Abstrom gemessene mittlere Radonkonzentration angenommen worden, dass als Funktion des Unterdrucks das Verhältnis $\beta = \lambda_Q / \lambda_{LW}$ konstant bleibt. Die aus der Anpassung an die experimentellen Ergebnisse resultierenden Quellstärken unterscheiden sich dabei etwa um den Faktor 2. Dies dokumentieren auch die in der Abbildung 29 dargestellten Ergebnisse der aus der Modellierung folgenden Abhängigkeit der jeweiligen Quellstärken von der gemessenen Luftwechselrate.

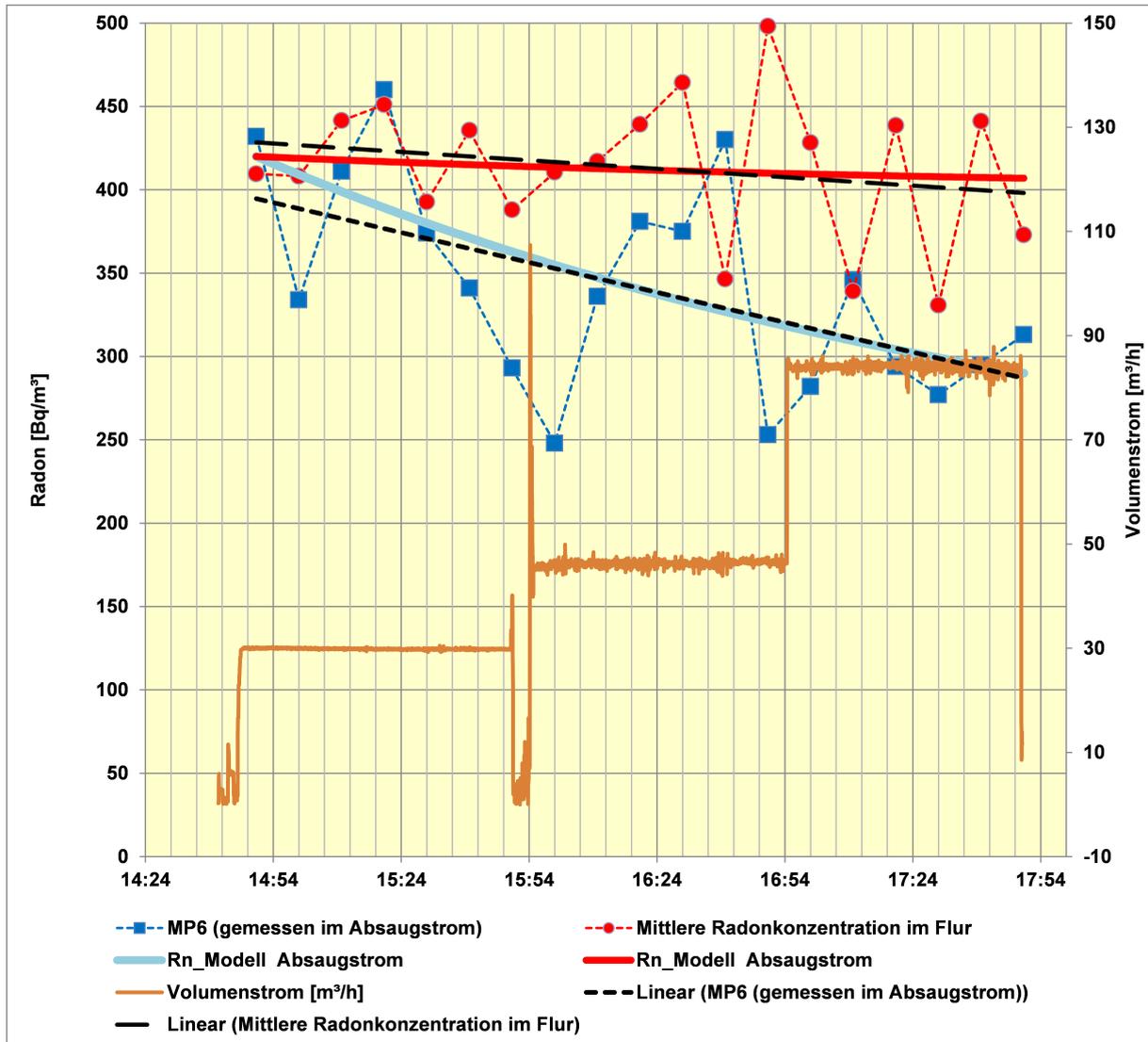


Abbildung 28: Wie Abbildung 26, jedoch zusätzlich sind die Ergebnisse der Modellierung mit angegeben

Eine Extrahierung der Radonquellstärke allein aus den gemessenen Radonkonzentrationen im Absaugstrom mit Hilfe von Gl. (14) führt wegen der gemessenen hohen Radonkonzentrationsfluktuationen und der nicht ausreichend genauen Kenntnis über den zu diesem Zeitpunkt im gesamten Souterrain gespeicherten Radonaktivitätsinhalt zu weniger belastbaren Ergebnissen. Dies dokumentieren die in Abbildung 29 dargestellten Ergebnisse, wobei anstelle des Unterdrucks die resultierende Luftwechselrate angegeben ist. Man könnte jedoch durch Installation von Ventilatoren in jedem Raum während der Absaugperiode einer Vermischung der aus unterschiedlichen Räumen stammenden Radonfrachten Vorschub leisten, so dass insgesamt die Radonfluktuationen im "Mischkessel" Flur reduziert werden. Die berechneten mittleren Radonkonzentrationen liefern deshalb ein etwas schlüssigeres Bild. Diese

dafür benutzten zusätzlichen Messergebnisse stehen jedoch bei einem alleinigen Bezug auf die Ergebnisse der BD Messungen nicht zur Verfügung.

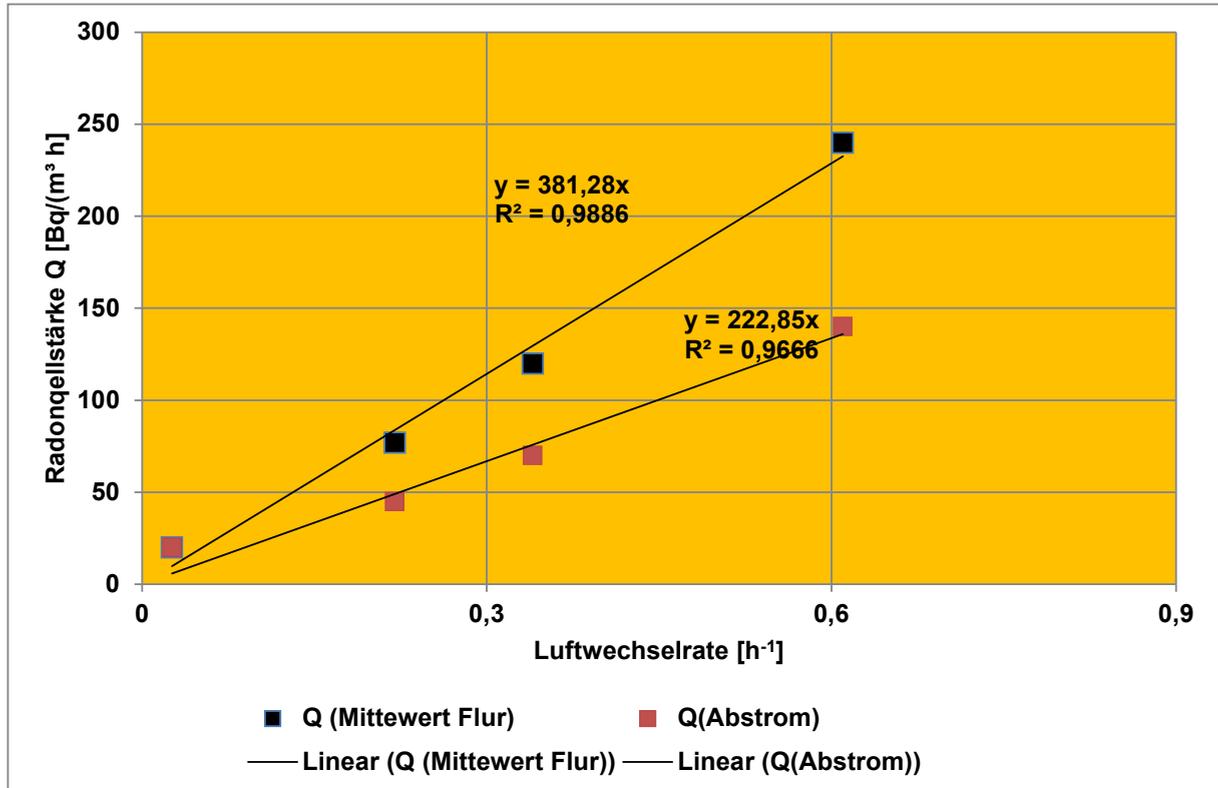


Abbildung 29: Abhängigkeit der berechneten Quellstärken Q von der gemessenen Luftwechselrate

5.4 Fazit der BDT Messungen im Objekt 2

Die im Vorfeld der BDT Messungen durchgeführten zeitaufgelösten Radonmessungen in allen Räumen des Souterrains haben gezeigt, dass, wie bereits im Forschungsvorhaben [49] dargelegt, die Radonquellstärke des Hauses sehr genau bestimmt werden kann, wenn nach dem Lüften des gesamten Hauses die zeitliche Entwicklung der Radonkonzentrationen in allen Räumen gleichzeitig über einen gewissen Zeitraum verfolgt wird, bis sich eventuell ein Fließgleichgewicht von Radonintrusion und Radonabführung eingestellt hat. Die daraus gewonnene Radonquellstärke von ca. 20 Bq/(m³ h) implizierte, dass im Jahresmittel im Souterrain des Hauses wegen der extrem niedrigen Luftwechselrate mit einer mittleren Radonkonzentrationen von > 300 Bq/m³ sicher zu rechnen ist.

Die Frage war, ob mit Hilfe eines BDT eine Kurzzeitmessung von ca. 1 - 3 Stunden die erforderlichen Informationen über die Radondichtheit des Hauses liefern kann, d.h. ob die zu prognostizierende Radonkonzentration des Souterrains im Normalzustand allein durch die im Abstrom gemessenen Radonkonzentrationen möglich ist. Infolge des Unterdrucks kann je

nach Situation die zu Beginn der Messungen im Haus vorhandene Gesamtradonaktivität teils stark abgesenkt werden, wenn das Verhältnis $\beta = \lambda_Q / \lambda_{LW}$ zu Gunsten der Außenluftinfiltrationsrate λ_{LW} verschoben wird. Allein die Tatsache, dass die Radonkonzentration als Folge des Unterdrucks stark abfällt, ist ein wichtiges Indiz dafür, dass mehr Außen- als Bodenluft angesaugt wird, wobei nicht auszuschließen ist, dass ein gewisser Anteil an Außenluft aus dem über den Souterrain liegenden Wohnbereich stammt. Bleibt das Verhältnis $\beta = \lambda_Q / \lambda_{LW}$ annähernd konstant, müsste sich die Radonkonzentration im Abstrom kaum ändern oder eher erhöhen (s. Ausführungen in Kapitel 3.2).

Werden nur die tatsächlich im Abstrom des BDT gewonnenen Informationen für eine Prognose zugrunde gelegt, wird für das Souterrain eine mittlere Radonkonzentration von ca. 200 Bq/m³ als Langzeitwert prognostiziert. Das würde bedeuten, dass die Radonquellstärke ausreichend gering wäre, so dass keine weiteren Maßnahmen zur Reduzierung der Radonkonzentration erforderlich wären. Werden jedoch die in allen Räumen des Souterrains während des Absaugversuchs resultierenden Radonkonzentrationsentwicklungen mit ins Kalkül gezogen, würden sich etwa um den Faktor 2 höhere Prognosewerte für die Radonquellstärken ergeben und überdies deutlich unterschiedlich hohe Prognosewerte für die mittleren Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen extrapoliert werden. Dieses Praxisbeispiel zeigt, dass vielleicht nur in Sonderfällen eine belastbare Rückrechnung der bei höheren Unterdrücken gewonnenen Informationen auf die tatsächlich herrschenden Zustände möglich ist. Andererseits ist man gezwungen, sehr konservative Schätzungen für die Radonquellstärke vorzunehmen.

Abschließend sei zu diesem Objekt noch bemerkt, dass zur Durchführung dieser sehr kurzen BD Tests mit 3 Unterdruckstufen in jeweils einer Stunde, ein Gesamtzeitaufwand von knapp 6 Stunden einschließlich Aufbau und Abbau erforderlich war. Einen wesentlich genaueren und für Prognosen signifikant belastbareren Datenpool lieferte die im Vorfeld durchgeführten Messungen der Radonkonzentrationsentwicklung im Sinne der im Forschungsvorhaben [49] dargestellten Methode der gleichzeitigen Messung der Radonkonzentrationsentwicklungen in allen Räumen des Souterrains. Bei der nachfolgenden BD Messung wurde von den dabei erhaltenen Ergebnissen profitiert. Ohne diese wäre belastbare Prognose über die Radongesamtsituation nicht möglich gewesen.

6 Ergebnisse eines BDT: Objekt 3

6.1 Zum Hausaufbau und Randbedingungen für den BDT

Das Untersuchungsobjekt 3 ist ein frei stehendes Einfamilienhaus mit Baujahr 2017. Es ist nicht unterkellert und hat keine Hanglage, so dass nur über die Bodenplatte ein erdberührter Kontakt von Gebäudebauteilen besteht. Das Haus wird über eine Luftwärmepumpe beheizt. Das Haus verfügt jedoch über keine mechanische Lüftungsanlage. Die Lüftung des Hauses über das natürliche Maß hinaus erfolgt ausschließlich durch aktives Lüften der Bewohner und die Hausnutzung. Das Haus wird von einer Familie genutzt, die beide werktätig sind und wochentags zwischen 7:00 Uhr und 17:00 Uhr abwesend sind.

Das 2-etagige Haus ist im Stil einer Stadtvilla gebaut, d.h. das Obergeschoss hat keine schrägen Wände und besitzt volle Raumhöhe. Das Haus verfügt über einen ungeheizten Spitzboden, der über eine Deckenklappe mit integrierter Leiter zu erreichen ist. Dieser Bereich wurde aus allen Untersuchungen ausgegliedert. Diese Vorgehensweise entspricht auch der Prüfvorschrift entsprechend der Energiesparverordnung [46].

Das Erdgeschoss ist mit dem Obergeschoss über einen offenen Treppenaufgang verbunden. Die Flächen und Volumina der einzelnen Räume bzw. Bereich sind in der Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 9: Übersicht zu den Flächen und Volumina des Hauses

| Bereich | Fläche [m²] | Höhe [m] | Volumen [m³] |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------------------|
| Wohn | 39,07 | 2,51 | 98,1 |
| HAR | 7,01 | 2,51 | 17,6 |
| Arbeit | 9,87 | 2,51 | 24,8 |
| Toilette | 2,5 | 2,51 | 6,3 |
| Diele EG | 10,44 | 2,51 | 26,2 |
| Treppen EG | 3,9 | 2,51 | 9,8 |
| Kind2 | 16,11 | 2,65 | 42,7 |
| Kind1 | 15,07 | 2,65 | 39,9 |
| Bad | 16,97 | 2,65 | 45,0 |
| Diele 1. OG | 4,87 | 2,65 | 12,9 |
| Schlaf | 13,96 | 2,65 | 37,0 |
| AR | 2,74 | 2,65 | 7,3 |
| Treppen 1. OG | 4,6 | 2,65 | 12,2 |
| Summe EG | 72,79 | | 182,7 |
| Summe 1. OG | 74,32 | | 196,9 |
| Summe Haus | 147,11 | | 379,6 |

In den Abbildungen 30 und 31 sind die Räume und Bereiche des Untersuchungsobjektes dargestellt.

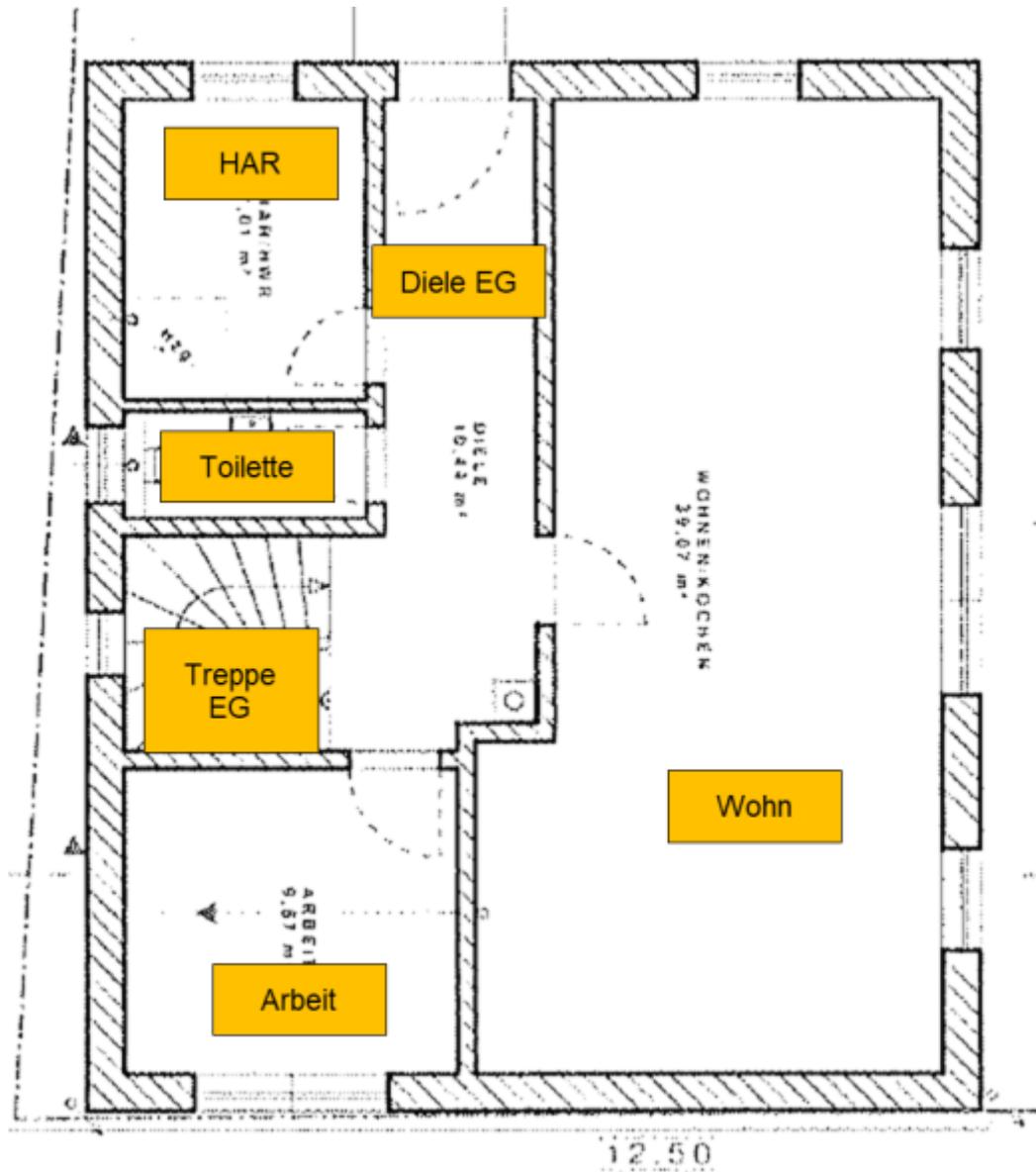


Abbildung 30: Darstellung des Objektes im Erdgeschoss

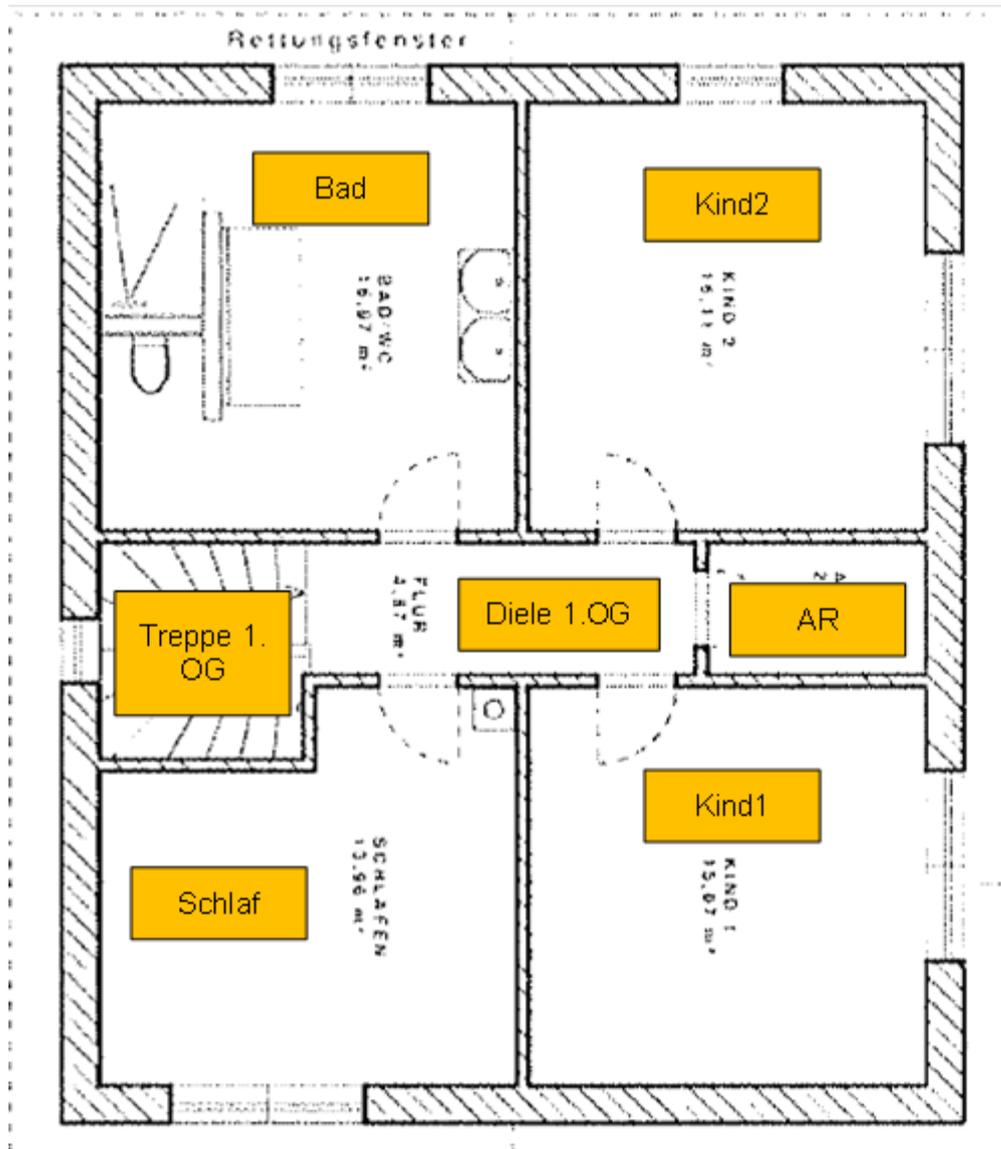


Abbildung 31: Darstellung des Objektes im Obergeschoss

6.2 Untersuchungsergebnisse bezüglich Luftdichtheit des Gebäudes

Den Eigentümern lag keine Dichtheitsprüfung im Zuge der Bauabnahme vor. Die im Rahmen der Untersuchungen durchgeführten BDT führten zu den aus Tabelle 10 folgenden Ergebnissen.

Tabelle 10: Übersicht über die Volumenströme und Luftwechselraten, die bei den BDT benutzt wurden.

| Druckverhältnisse | Leckagestrom [m ³ /h] | n ₅₀ Luftwechselrate [h ⁻¹] |
|-------------------|----------------------------------|--|
| Unterdruck | 288 | 0,76 |
| Überdruck | 281 | 0,74 |
| Mittelwert | 284 | 0,75 |

6.3 Radonkonzentrationsentwicklung im Haus

Im Vorfeld der BDT Messungen wurden über einen Zeitraum von ca. 2 Wochen die Radonkonzentrationen in allen Räumen gemessen. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 32 und 33 für das Erd- und das Obergeschoss dargestellt. Vom 1. bis 4.10.2017 war das Haus nicht bewohnt (Urlaub der Bewohner).

Die Messungen zeigten, dass unterschiedlich hohe Radonkonzentrationen auftreten, die mit dem Nutzungsverhalten der Bewohner stark gekoppelt sind. Besonders auffällig ist dieser Zusammenhang während des Urlaubs der Bewohner ausgeprägt. Aus den jeweiligen Anstiegen der Radonkonzentrationen kann der Radonquellterm unter den im Haus herrschenden Normalbedingungen sehr genau bestimmt werden. Die Ergebnisse in den Abbildungen 32 und 33 für das Erd- und das Obergeschoss zeigen, dass als Folge der allein durch die Hausnutzung induzierten zusätzlichen Lüftung die Radonkonzentrationen in keinem der Räume 300 Bq/m³ übersteigen. Dies ist so, weil trotz fehlender Lüftung die Radonquellstärke des Hauses nicht ausreicht, dass sich innerhalb von ca. 12 Stunden die Radonkonzentrationen auf Werte > 300 Bq/m³ entwickeln könnten. Über Nacht und am Tage, wenn die Bewohner auf Arbeit außer Haus sind, steigen zwar die Radonkonzentrationen in allen Räumen stetig an, doch mit der im Zuge der normalen Bewohnung induzierten Belüftung in den Abendstunden (Öffnen von Fenstern, Öffnen der Haustür, Dunstabzug in der Küche etc.), wird dieser Anstieg unterbrochen und die mittlere Radonkonzentration deutlich abgesenkt. Dies ist nicht so im Urlaub, da sich in den jetzt bestehenden längeren Zeiträumen ohne zusätzlich induzierte Lüftung die Radonkonzentrationen auf die jeweiligen Plateauwerte in den einzelnen Räumen C_{asympt} (s. Gl. (11)) entwickeln können.

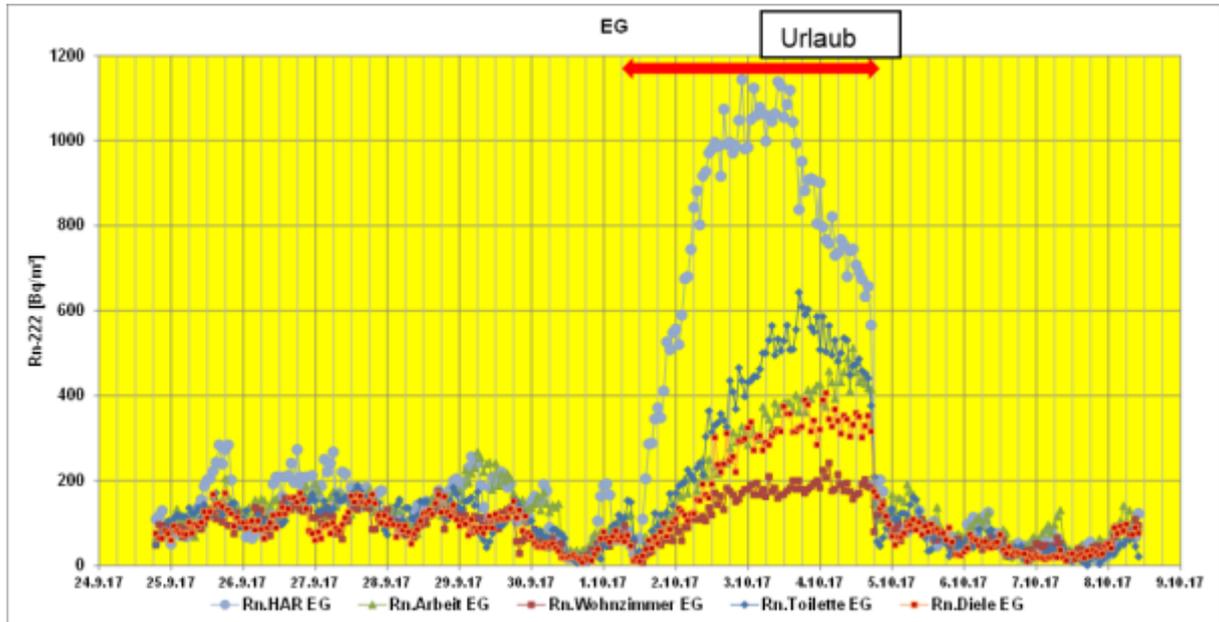


Abbildung 32: Zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration in allen Räumen des Erdgeschosses (Haus, Objekt 3)

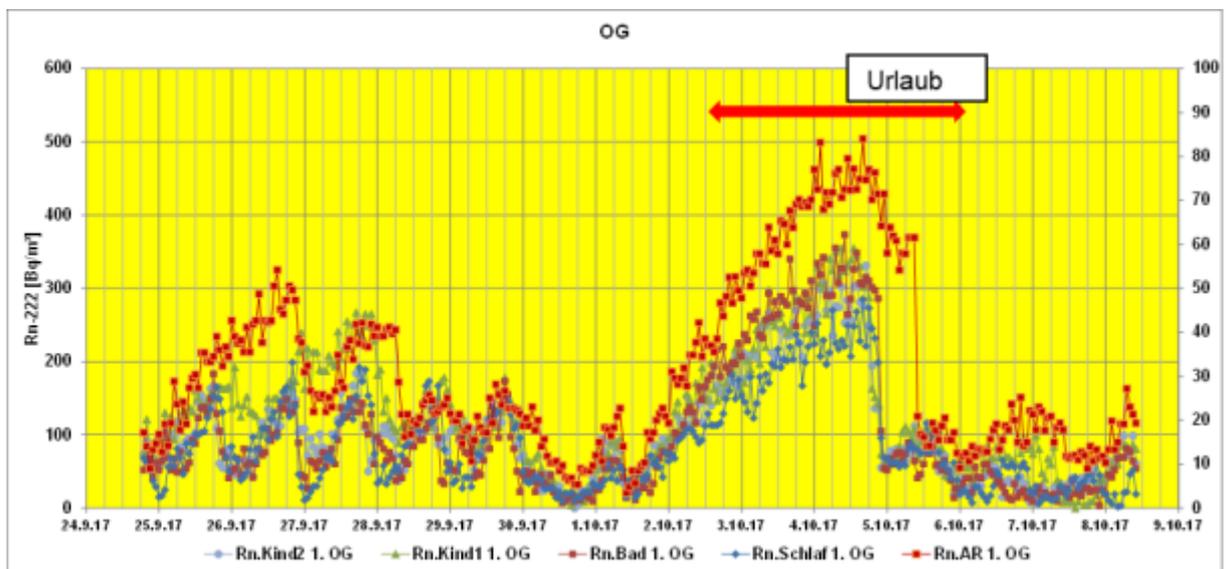


Abbildung 33: Wie Abbildung 32, jedoch für das Obergeschoss

Die sich in den Etagen des Hauses entwickelnden mittleren Radonkonzentrationen sind in der Abbildung 34 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im Erdgeschoss, wie zu erwarten, etwas höhere Radonkonzentrationen als im Obergeschoss herrschen. Insbesondere stark ausgeprägt ist dieser Effekt während der Urlaubszeit, da die fehlende bzw. geringere Ventilation im Haus dem Vermischen der gesamten Raumluft im Haus keinen Vorschub leistet. Diese Messung während der Urlaubszeit belegt auch offenkundig, dass die im Haus herrschende Lüftungssituation und die vergleichsweise geringe Quellstärke ausreichen, dass sich in einzelnen Räumen des neugebauten Haus Radonkonzentrationen entwickeln, die 300 Bq/m³ übertreffen können.

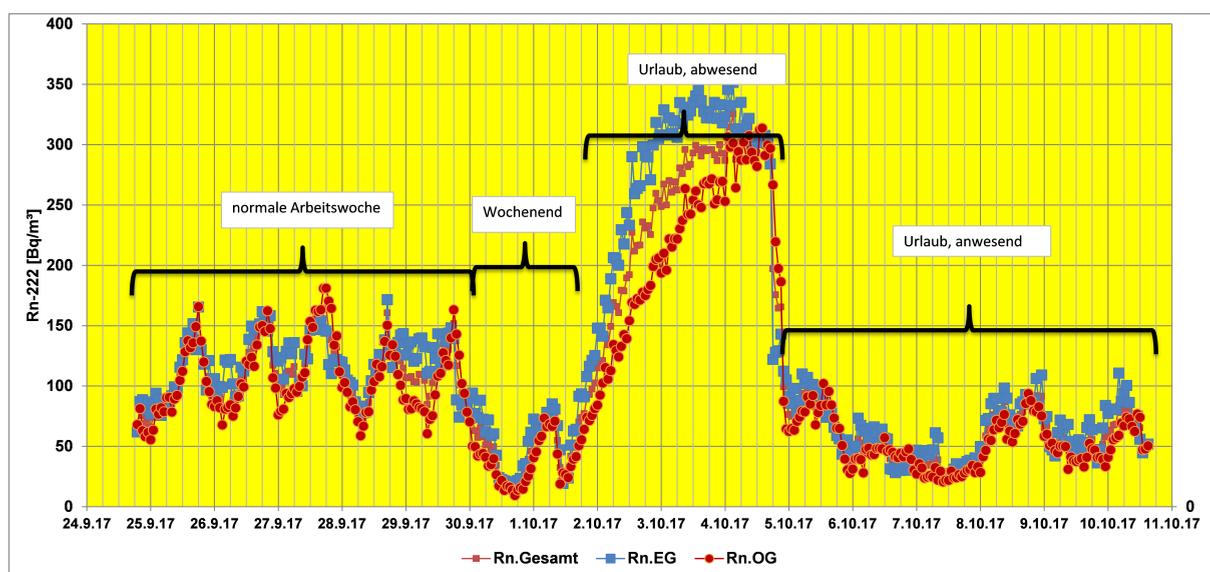


Abbildung 34: Wie Abbildung 32, jedoch für die mittleren Radonkonzentrationen Erd- und Obergeschoss

Aus den Anstiegen der Radonkonzentrationen in Zeiträumen von 2 - 4 Stunden errechnen sich sowohl für die Urlaubszeit als auch die übrigen Zeiträume mittlere Radonquellstärken

von ca. . Dies bedeutet, dass der Luftwechsel im Bereich von $\lambda_{LW} \approx \frac{Q}{C_{\text{assymp}}} \approx 0,03 \text{ h}^{-1}$ an-

zusiedeln ist, um den Plateauwert C_{assymp} (s. Gl. (11)) während der Urlaubszeit zu bestimmen. Bei dieser extrem niedrigen Luftwechselrate des Hauses ist die vergleichsweise niedrige Quellstärke bereits zu hoch, um in allen Räumen eine Radonkonzentration $< 300 \text{ Bq/m}^3$ zu garantieren. Mit einem oder mehreren Unterdruckversuchen, die im nächsten Kapitel diskutiert werden, können die sich im Haus entwickelnden Facetten der individuellen Radodynamik nicht reflektiert werden und auch die bei niedrigen Unterdrücken von ca. 2 Pa maßgebliche Radonquellstärke nicht ausreichend genau extrahiert werden.

6.4 Ergebnisse des BDT

In der Abbildung 35 sind die zeitlichen Entwicklungen der Luftwechselrate und des Differenzdrucks während des 3-stufigen BDT dargestellt. Die dazugehörigen zeitlichen Entwicklungen der Radonkonzentrationen in allen Räumen des Erdgeschosses sind in der Abbildung 36 angegeben.

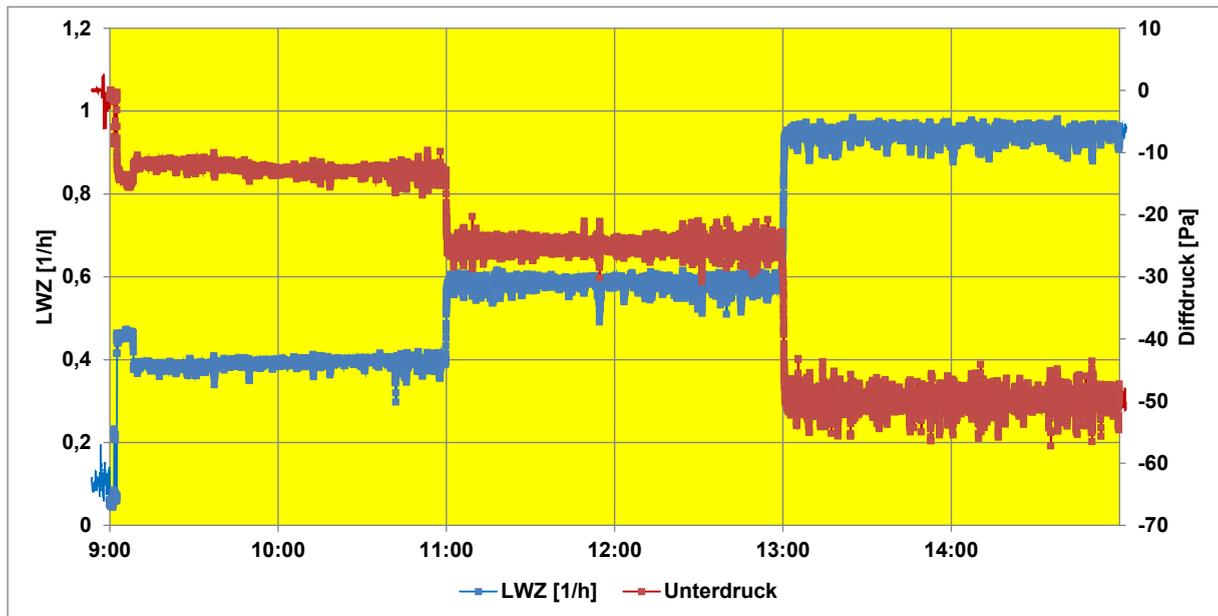


Abbildung 35: Zeitliche Entwicklung der Luftwechselrate und des Differenzdrucks während des BDT

Die Diele im Erdgeschoss stellt für den BDT den "Mischkessel" aller Luftströme dar, aus dem über die Haustür abgesaugt wurde. Es ist anhand der Ergebnisse in Abbildung 36 zu erkennen, dass die Radonkonzentration in der Diele als Funktion des Unterdrucks von ca. 60 auf ca. 40 Bq/m³ abfällt. Ausgehend von den Messergebnissen im Normalzustand des Hauses wären Radonkonzentrationen von ca. 250 Bq/m³ zu erwarten, wenn das Verhältnis $\beta = \lambda_Q / \lambda_{LW}$ infolge des Unterdrucks nicht zu Gunsten der Außenluftinfiltrationsrate λ_{LW} verschoben wird. Dies bedeutet im konkreten Fall, dass etwa um den Faktor 6 mehr Außenluft infolge der Unterdruckerhöhung als Bodenluft in das Haus transferiert wird und somit eine Rückrechnung auf die Situation bei einem Unterdruck von ca. 2 Pa, der im Normalzustand herrscht, kaum möglich ist.

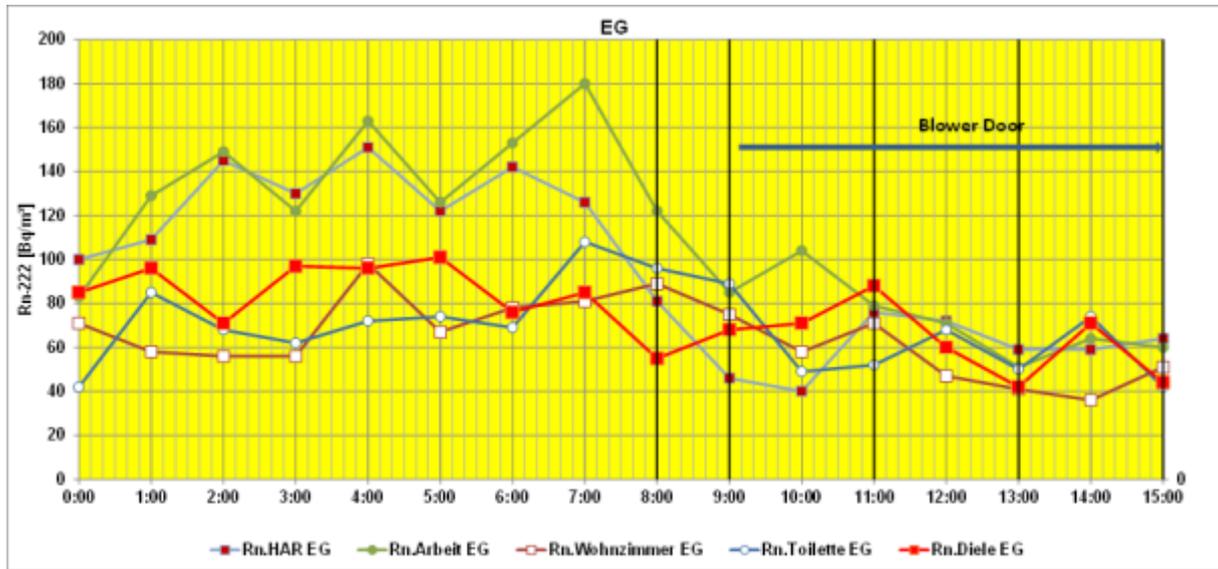


Abbildung 36: Zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration in allen Räumen des Erdgeschosses (Haus, Objekt 3) während des BDT

Die Ergebnisse in Abbildung 36 werden durch zusätzliche Ergebnisse in der Abbildung 37 untersetzt, wobei die im Abstrom im 10-Minuten-Rhythmus gemessenen Radonkonzentrationen am BD Lüfter und auch im Wohnzimmer als auch im Hausanschlussraum mit angegeben sind. In der Abbildung 38 ist zusätzlich die zeitliche Entwicklung des Differenzdrucks mit angegeben. Es ist zu erkennen, dass die Fluktuationen der Radonkonzentrationen in verhältnismäßig kurzen Entwicklungszeiträumen sehr hoch sind und auf diese Weise die komplizierten Mischvorgänge von Radonfrachten mit unterschiedlich hohen Strömungsgeschwindigkeiten manifestieren. Nur die über eine Stunde gemittelten Radonkonzentrationswerte ermöglichen einen Trend zu erkennen.

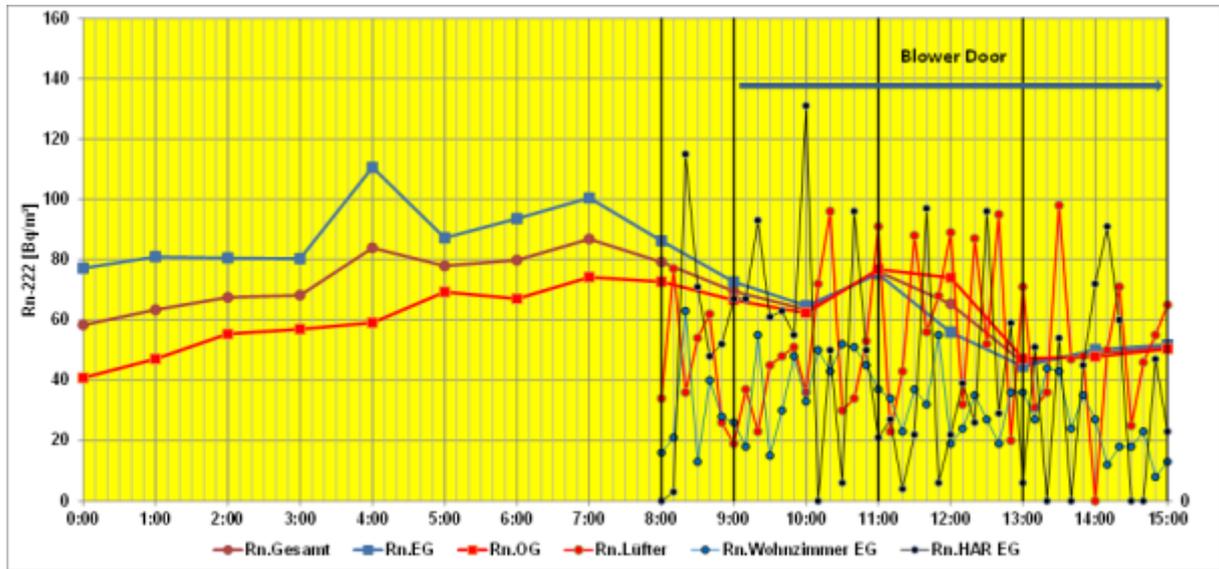
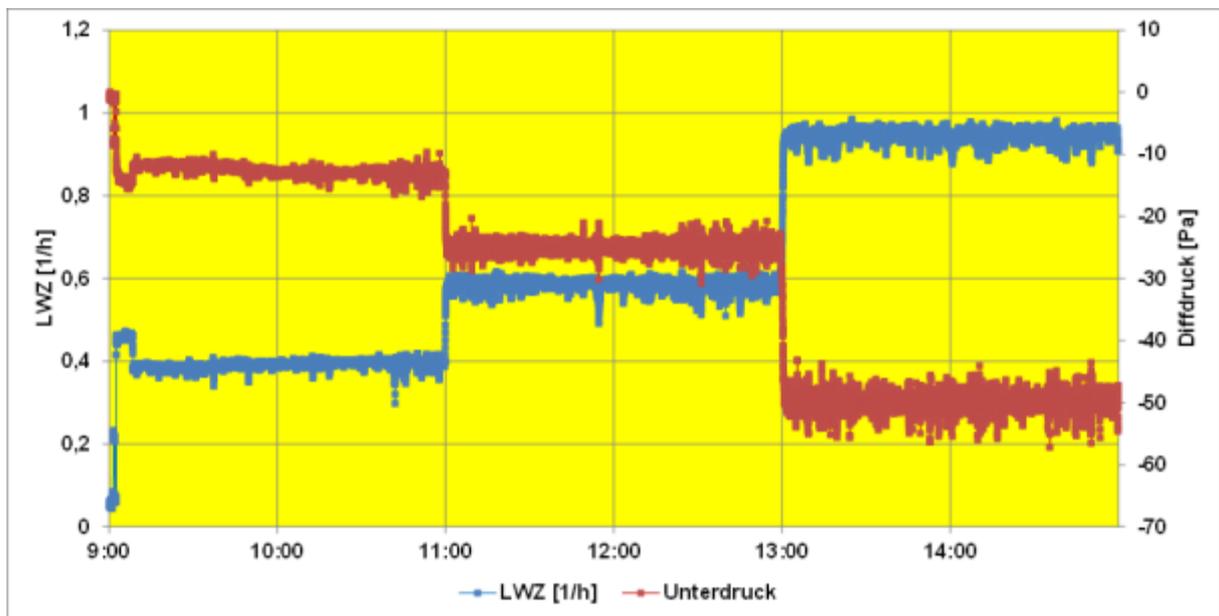


Abbildung 37: Zeitliche Entwicklung der mittleren Radonkonzentrationen in den 2 Etagen vor und während des BDT sowie die im Abstrom im 10-Minuten-Rhythmus gemessenen Radonkonzentrationen am BD Lüfter, im Wohnzimmer und im Hausanschlussraum.



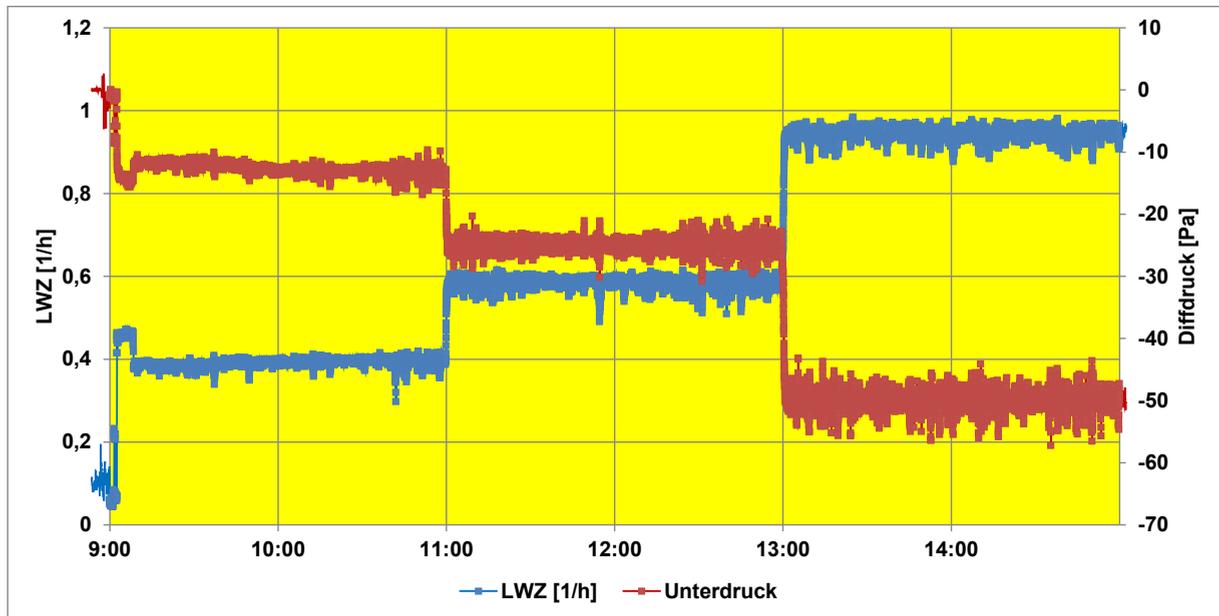


Abbildung 38: Zeitliche Entwicklungen der während des BDT im Abstrom im 10-Minuten-Rhythmus gemessenen Radonkonzentrationen am BD Lüfter und der Differenzdrücke

In der Abbildung 39 sind die zeitlichen Entwicklungen der Radonkonzentrationen in allen Räumen des Obergeschosses vor und während des BDT dargestellt (s. auch Ergebnisse in der Abbildung 36). Es ist zu erkennen, dass vor dem BDT die Radonkonzentrationsentwicklung in den einzelnen Räumen des Obergeschosses teils sehr unterschiedlich war, wobei Radonkonzentrationsunterschiede bis ca. 100 Bq/m³ auftraten. Eine ähnliche Tendenz wurde auch im Erdgeschoss beobachtet. Sobald der Unterdruck in allen Räumen wirksam wird, gleichen sich die jeweiligen Radonkonzentrationen an, da jetzt dem im gesamten Raumvolumen stattfindenden Luftvermischungsprozess bei teils hohen Luftwechselraten bis ca. 1 h⁻¹ Vorschub geleistet wird.

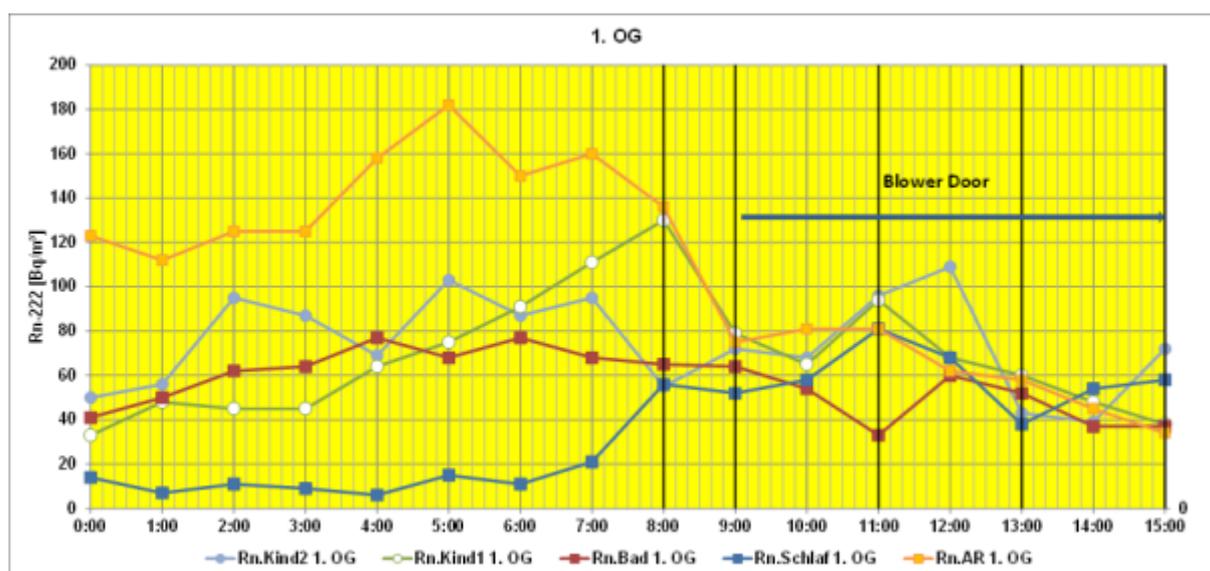


Abbildung 39: Wie Abbildung 36, jedoch für die Räume des Obergeschosses

6.5 Fazit der BDT Messungen im Objekt 3

Wie bereits anhand der Ergebnisse für die anderen Objekte diskutiert, zeigten die im Vorfeld der BDT Messungen durchgeführten zeitaufgelösten Radonmessungen in allen Räumen des Hauses (Objekt 3), dass die Radonquellstärke sehr genau bestimmt werden kann, wenn die zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration über einen Zeitraum von ca. 2 - 4 Stunden verfolgt wird, da an Wochentagen im untersuchten Fall Perioden des linearen Radonanstiegs und -abstiegs aufeinander folgten. Die daraus gewonnene Radonquellstärke von ca. 9 Bq/(m³ h) implizierte, dass unter den von den Bewohnern praktizierten "normalen" Wohnbedingungen mit einer mittleren Radonkonzentrationen von < 300 Bq/m³ sicher zu rechnen ist, wobei ein Variationsbereich von 50 - 150 Bq/m³ als realistisch anzusehen ist. In der Urlaubszeit wurden jedoch wegen fehlender, d.h. durch die Nutzung bedingter Lüftung, mittlere Radonkonzentrationen von > 300 Bq/m³ erreicht.

Die BD Messungen wurden in 3 Unterdruckstufen jeweils über 2 Stunden durchgeführt. Wie auch bei den anderen Untersuchungen ist dabei zu beachten, dass in Abhängigkeit von der Ausgangssituation bei Anlegen eines Unterdrucks die dabei resultierende Radonfracht in die Außenluft je nach Größe des Hauses die der eigentlichen Radonquelle zuzuordnende Quellstärke stark übertreffen kann. Infolge des Unterdrucks kann die anfänglich im Haus vorhandene Gesamtradonaktivität teils stark abgesenkt werden, wenn das Verhältnis der Infiltrationsraten $\beta = \lambda_Q / \lambda_{LW}$ zu Gunsten der Außenluftinfiltrationsrate λ_{LW} verschoben wird.

Ob dies der Fall ist, kann unmittelbar im Zuge der BD Messungen bereits festgestellt werden. Fällt die als Funktion des Unterdrucks im Abstrom gemessene Radonkonzentration ab, ist dies ein klares Indiz dafür, dass deutlich mehr Außen- als Bodenluft angesaugt wird, da je nach Größe des Radonkonzentrationsabfalls die resultierende Quellstärke Q mit Erhöhung des Unterdrucks nicht signifikant ansteigen wird.

Die Ergebnisse in der Abbildung 40 untersetzen diesen Sachverhalt. Gegenübergestellt sind die mit dem BDT gemessenen Radonquellstärken $Q(BD)$, und die erwarteten Quellstärken $Q(\beta=const)$, die im Ergebnis der bei einem Unterdruck von ca. 2 Pa im Normalzustand des Hauses gemessenen Quellstärke.

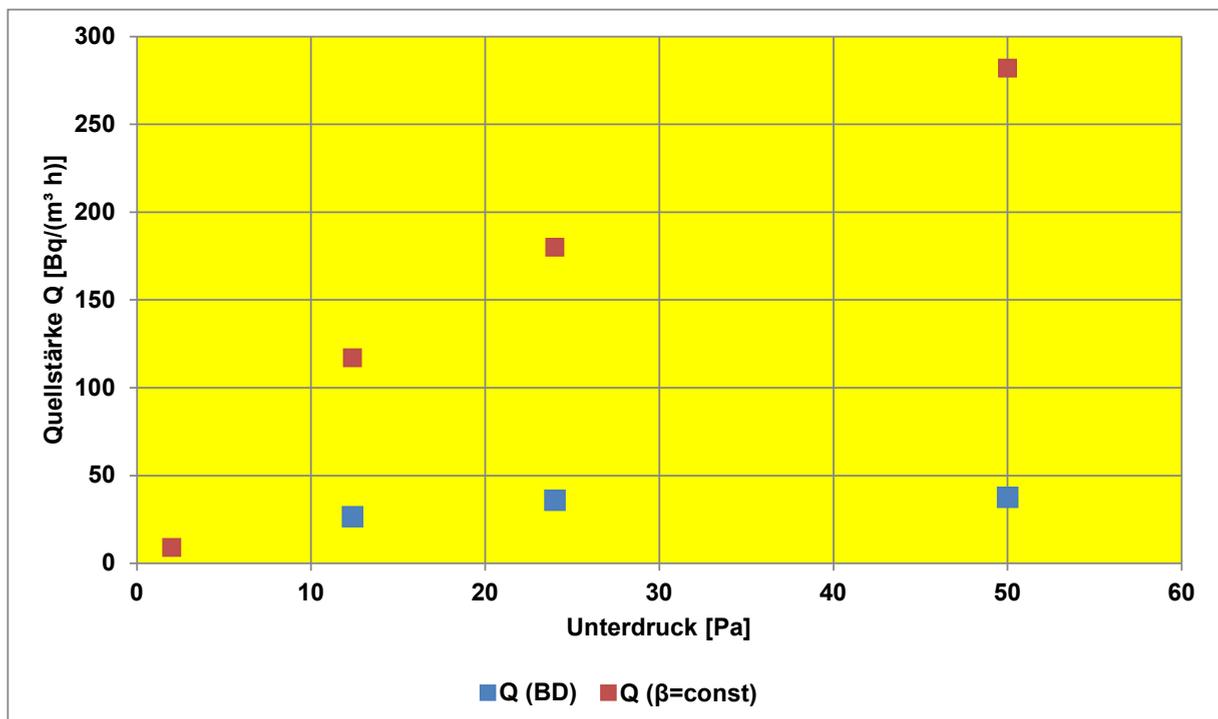


Abbildung 40: Gegenüberstellung der mit dem BDT gemessenen Radonquellstärken $Q(BD)$ und der erwarteten Quellstärken $Q(\beta=const)$, die im Ergebnis der bei einem Unterdruck von ca. 2 Pa im Normalzustand des Hauses gemessenen Quellstärke berechnet wurden.

Aus den Ergebnissen ist klar zu erkennen, dass eine Rückrechnung der beim BDT gewonnenen Information auf die Situation bei 2 Pa Unterdruck mit sehr großen Fehlern behaftet ist. Hier ist zu bemerken, dass bei der Anstiegsmethode nach [49] zur Bestimmung der Radonquellstärke die Differenzdrücke in den Räumen in Bezug auf die Außenatmosphäre immer mit aufgenommen werden, so dass witterungsbedingte Einflüsse stets kontrolliert und in den Bewertungen mit eingeschlossen werden können. Das schließt auch eine eventuelle Berücksichtigung von jahreszeitlichen Schwankungen mit ein.

Eine Ausdehnung des BDT auf Unterdrücke von 4 - 6 Pa ist möglich, doch sind dafür Absaugzeiten von 6 - 8 Stunden erforderlich, so dass gegenüber der Methode [49], die auf einer Messung der zeitlichen Entwicklung der Radonkonzentration in allen Räumen basiert, in jedem Fall der Vorzug zu geben ist, da nur dann belastbare Ergebnisse über die einzelnen Quellstärken der Räume und des Gesamtgebäudes unter realen Nutzungsbedingungen bestimmt werden.

7 Ergebnisse eines BDT: Objekt 4

7.1 Beschreibung des Hauses

Das Haus verfügt über Gewerbe- und Wohnräume und ist unterkellert. Nur über einzelne Räume liegen Informationen über die zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration vor. Untersuchungen ergaben, dass Radon über Räume des Kellers in die oberen Geschosse eindringt, wobei auch mittlere Radonkonzentrationen von $> 300 \text{ Bq/m}^3$ in Aufenthaltsräumen auftreten, wenn keine probaten Gegenmaßnahmen getroffen werden.

Für die Untersuchungen wurde ein Kellerraum ausgewählt, in dem mittlere Radonkonzentrationen im Bereich bis knapp 2500 Bq/m^3 zu beobachten waren (s. Abbildung 41). Die Messergebnisse dokumentieren den durchschlagenden Effekt einer nahezu drucklosen Lüftung. In

dem Fall wird bei einer Luftwechselrate von $\lambda_{\text{LW}} = 0,2 \text{ h}^{-1}$ die Radonkonzentration konstant auf Werte von $< 300 \text{ Bq/m}^3$ abgesenkt. Steigt der Differenzdruck über 5 Pa an, wird radonhaltige Bodenluft im stärkeren Maße angesaugt.

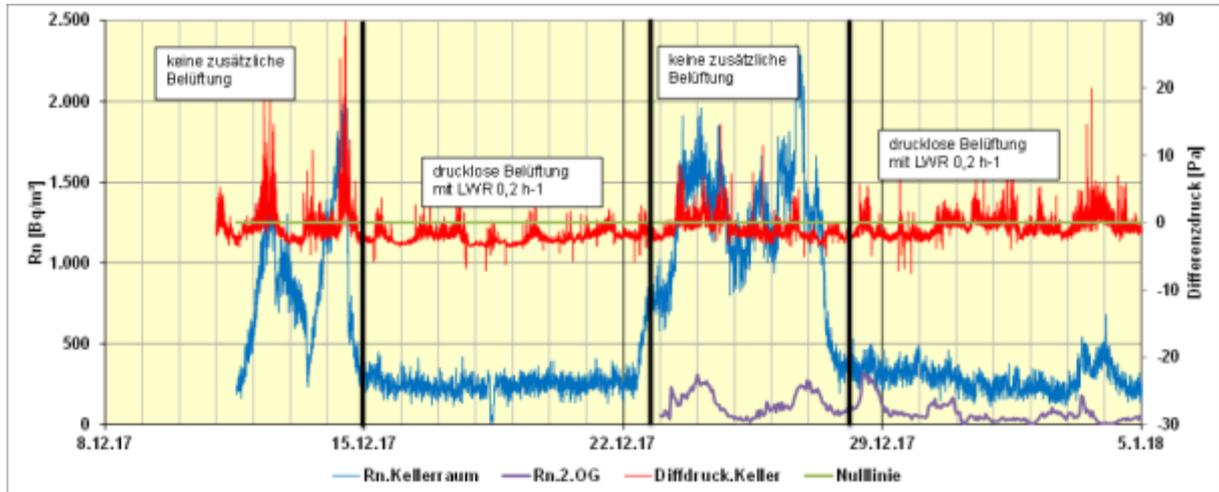


Abbildung 41: Zeitliche Entwicklung der Radonkonzentrationen in einem Kellerraum

Auch im Büroraum in dem 2. Obergeschoss zeigt sich, dass die Radonkonzentration ansteigt, sobald die drucklose Lüftung abgeschaltet wird. Hinsichtlich der Installation einer drucklosen Lüftung ist zu bemerken, dass diese insbesondere dann von großer Wichtigkeit ist, wenn die, wie im nächsten Kapitel 7.2 gezeigt wird, bei steigender Luftwechselrate bzw. steigendem Unterdruck im Kellerraum auch die Radonintrusion entsprechend zunimmt.

7.2 Ergebnisse der Unterdruckmessungen

Der BDT wurde in dem ausgewählten Raum bei 3 unterschiedlichen Unterdrücken durchgeführt, wobei bei jedem Versuch der Raum vor Beginn der Messungen stark gelüftet wurde, bevor der Anstieg der Radonkonzentration über einen Zeitraum von mehreren Stunden aufgezeichnet wurde. Die Ergebnisse in der Abbildung 42 illustrieren die im Abstrom gemessenen linearen Anstiege der Radonkonzentrationen zu Beginn des Absaugversuchs. Die Versuche wurden bei 3 unterschiedlichen Unterdrücken von 6,3 Pa, 12,3 Pa und 29,7 Pa, die zu Luftwechselraten von $0,11 \text{ h}^{-1}$, $0,24 \text{ h}^{-1}$ und $0,53 \text{ h}^{-1}$ führen, ausgeführt. Aus den jeweiligen linearen Anstiegen der Radonkonzentrationen können nach Gl. (17) die jeweiligen Quellstärken direkt berechnet werden.

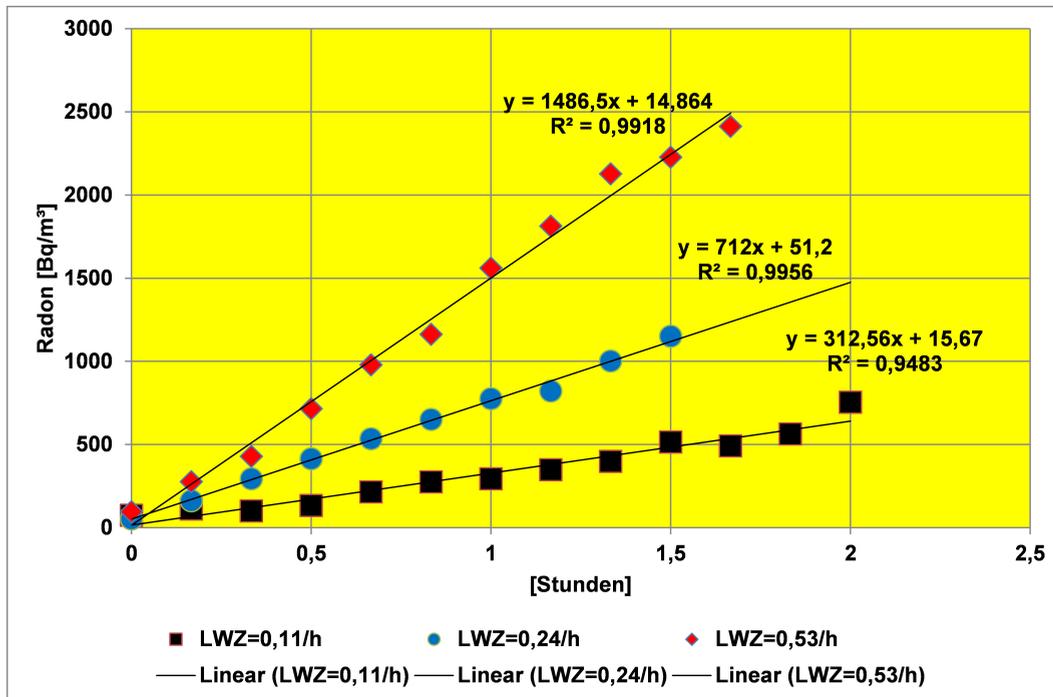


Abbildung 42: Zeitliche Entwicklung der Radonkonzentrationen in einem Kellerraum bei unterschiedlichen Unterdrücken und sich daraus resultierenden Luftwechselraten (s.a. Abbildung 43)

Die daraus folgende Abhängigkeit der Quellstärke Q von der Luftwechselrate bzw. vom gewählten Unterdruck ist in der Abbildung 43 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass in dem gewählten Unterdruckintervall bis 30 Pa die Quellstärke eine lineare Funktion des Unterdrucks bzw. der Luftwechselrate ist.

Die in der Abbildung 43 dargestellten Radonquellstärken Q und Luftwechselraten λ_{LW} als Funktion des angelegten Unterdrucks im BDT enthalten implizit die wichtige Information, dass nach ausreichend langen Absaugzeiten immer nahezu identische Werte von ca. 3000 Bq/m³ erreicht werden. Dieser asymptotische Wert wird je früher erreicht je größer die Luftwechselrate ist. Das bedeutet, dass sowohl die Radonquellstärken als auch die Luftwechselraten λ_{LW} als Funktion des vorgegebenen Unterdrucks ΔP linear anwachsen. Die asymptotisch erreichbaren Radonkonzentrationen C_{asympt} sind nach den Ausführungen in Kapitel 3 (Gl.(21)) annähernd durch das Verhältnis $Q(\Delta P, \lambda_{LW})/\lambda_{LW}$ gegeben und sollten sich kaum voneinander unterscheiden. Dieser Zusammenhang ist in der Abbildung 43 veranschaulicht, wobei die Radonkonzentrationswerte C_{asympt} etwa 3000 Bq/m³ erreichen. Die Ergebnisse belegen somit, dass im Ergebnis der Absaugung proportional genau so viel radonhaltige Bodenluft wie auch atmosphärische Außenluft angesaugt wird, so dass das Verhältnis $\beta = \lambda_Q/\lambda_{LW}$ praktisch konstant bleibt. Dieser hier anhand von Messwerten unterlegte

Sachverhalt wurde bereits im Kapitel 3.2 anhand von Modelluntersuchungen detailliert untersucht.

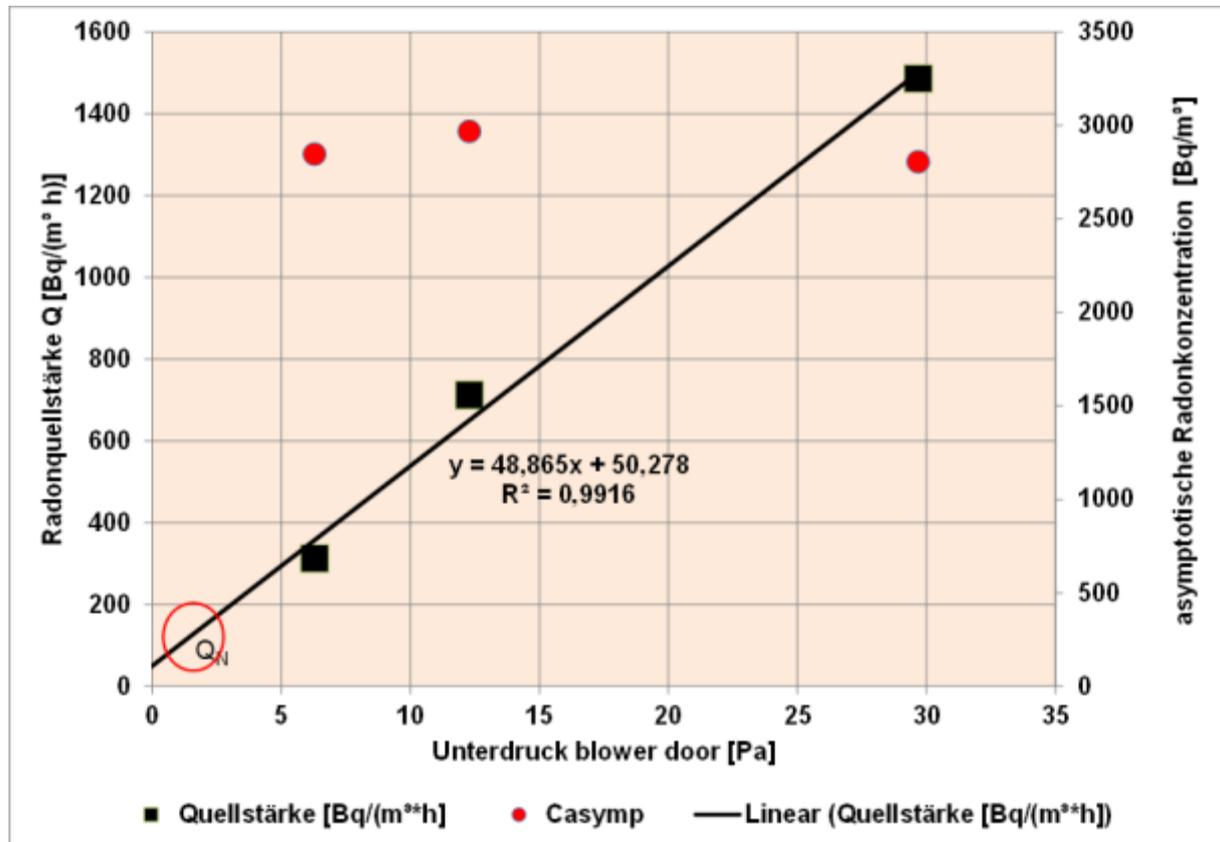


Abbildung 43: Radonquellstärke Q sowie die nach ausreichend langen Saugzeiten als Funktion der Luftwechselrate resultierenden Radonkonzentration C_{asympt}

Die in Abbildung 43 dargestellten Ergebnisse führen zu zwei wichtigen Schlussfolgerungen. Mit den durch den BDT gewonnenen Ergebnissen konnte wegen der Konstanz von $\beta = \lambda_Q / \lambda_{LW}$ über einen vergleichbar großen Unterdruckbereich eine belastbare Extrapolation hinsichtlich der Quellstärke unter normalen Nutzungsbedingungen Q_N auf sehr geringe Unterdrücke erzielt werden. Die Quellstärke Q_N ist nach den in der Abbildung 43 dargestellten Ergebnissen bei ca. 50 Bq/(m³ h) anzusiedeln. Wird in diesem Raum eine annähernd drucklose Lüftungsanlage installiert, ist bei einer Luftwechselrate von $0,5 \text{ h}^{-1}$ eine mittlere Radonkonzentration von ca. 100 Bq/m³ zu erwarten. Um diesen Bewertungsstand zu erreichen, waren letztlich drei Unterdruckstufen erforderlich, so dass somit auch wichtige Informationen zur Auswahl der Art von möglichen Sanierungsmaßnahmen gewonnen und im Fall lüftungstechnischer Lösungen entsprechende Aussagen zur Dimensionierung von Anlagen getroffen werden konnten.

Es ist jedoch auch zu bemerken, dass in der Vielzahl der untersuchten Häuser, die entweder im Untersuchungs Jahr errichtet wurden oder nur wenige Jahre alt sind, kein weiterer Fall an-

getroffen wurde, dass bei unterschiedlich hohen Unterdrücken ΔP eine annähernde Konstanz von $Q(\Delta P, \lambda_{LW})/\lambda_{LW}$ bzw. $\beta = \lambda_Q/\lambda_{LW}$ nachgewiesen werden konnte. Im Gegenteil, in den untersuchten Häusern nahm die Größe $Q(\Delta P, \lambda_{LW})/\lambda_{LW}$ mit wachsendem Unterdruck stetig ab, weil vorwiegend atmosphärische Außenluft angesaugt wurde. In dem Fall schlagen die in diesem speziellen Beispiel diskutierten vorteilhaften Anwendungsmöglichkeiten des BDT nicht zu Buche. Es müssen deshalb alternative Methoden zur Prognose der Radonquellstärke eines Hauses ins Kalkül gezogen werden.

Die Situation ist praktisch nicht einschätzbar, wenn z.B. nur bei einem einzigen und vergleichbar hohen Unterdruck von ca. 50 Pa, wie bei den originalen Luftdichtheitsmessungen üblich, aus der im Abstrom gemessenen Radonkonzentration eine Prognose über die Radondichtheit des Hauses bzw. die mittlere Radonkonzentration in den Aufenthaltsräumen zu prognostizieren ist.

In diesem Fall, dass mit steigendem Unterdruck sich das Verhältnis aus Boden- und Außenluft nicht verändert, d.h. $\beta = \text{konst.}$ ist, liegt jedoch mit 50 Bq/(m³*h) bereits eine so hohe Quellstärke vor, dass nach wenigen Stunden Messzeit unter Normalbedingungen eine zuverlässige Aussage bezüglich der Quellstärke ermöglicht wird. Der zeitliche Aufwand eines BDT mit abgestuften Differenzdrücken ist jedoch keinesfalls geringer als der mit der Anstiegsmethode.

8 Ergebnisse eines BDT: Objekt 5

8.1 Beschreibung der Radonsituation

Das Haus ist unterkellert und verfügt nicht über eine technische Lüftung. Eine 3-monatige Messung der Radonkonzentration mit Dosimetern in 3 Räumen des Hauses lieferte die in der Tabelle 11 zusammengestellten Ergebnisse. In allen 3 Räumen waren die mittleren Radonkonzentrationen $> 300 \text{ Bq/m}^3$.

Tabelle 11: Ergebnisse der mit Dosimetern gemessenen Radonkonzentration in 3 Räumen des Hauses sowie die Ergebnissen von aktiven Messungen im 1-Stundenrhythmus über einen Zeitraum von 1 Woche

| Expositionszeitraum | Rn-222 [Bq/m ³] Kernspurdetektoren | Messort | Rn-222 [Bq/m ³] 22.1.2018 - 29.1.2018 Mittelwert aus aktiven Messungen 1 Woche |
|---------------------|---|--------------------|---|
| 20.09.17 - 06.12.17 | 1.000 | Kellerraum | 1.194 |
| 20.09.17 - 06.12.17 | 370 | EG, Wohnzimmer | 375 |
| 20.09.17 - 06.12.17 | 480 | 1 OG, Schlafzimmer | 353 |

In der Abbildung 44 sind die Ergebnisse der Radonmessungen in allen Räumen des Erd- und Obergeschosses sowie im Heizungsraum des Kellers zusammengestellt.

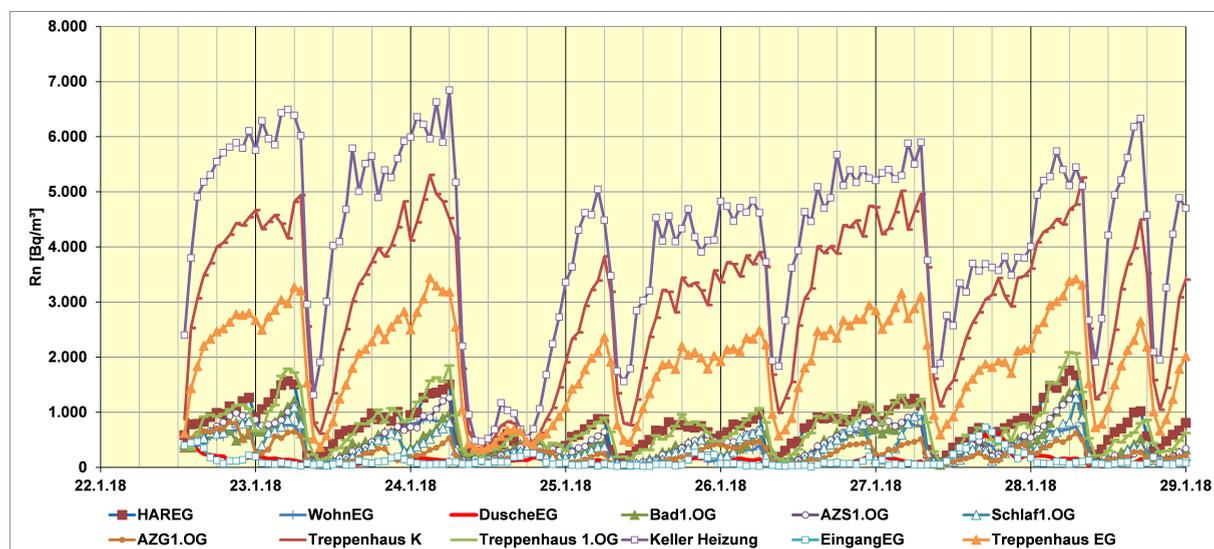


Abbildung 44: Ergebnisse der Radonmessungen in allen Räumen des Erd- und Obergeschosses sowie im Heizungsraum des Kellers

Es ist zu erkennen, dass im Heizungskeller die Radonkonzentrationen Werte bis ca. 6000 Bq/m^3 erreichen und Radon über die Treppenflure in die Wohnbereiche transportiert wird. Die jeweils abrupt auftretenden Absenkungen der Radonkonzentrationen sind auf das

Lüftungsverhalten der Bewohner zurückzuführen. Ohne diese Maßnahme wären die Radonkonzentrationen im Wohnbereich bei deutlich $> 1000 \text{ Bq/m}^3$ anzusiedeln. Die Abbildung 45 gibt einen Überblick über die zeitliche Entwicklung der mittleren Radonkonzentrationen in allen Etagen des Hauses sowie der mittleren Gesamtaktivität. Auch hier ist zu erkennen, dass Radon in hohen Konzentrationen über den Kellerbereich in das Haus eintritt und durch Umverteilungsprozesse auf Radonkonzentrationen im Bereich von 1000 Bq/m^3 reduziert wird.

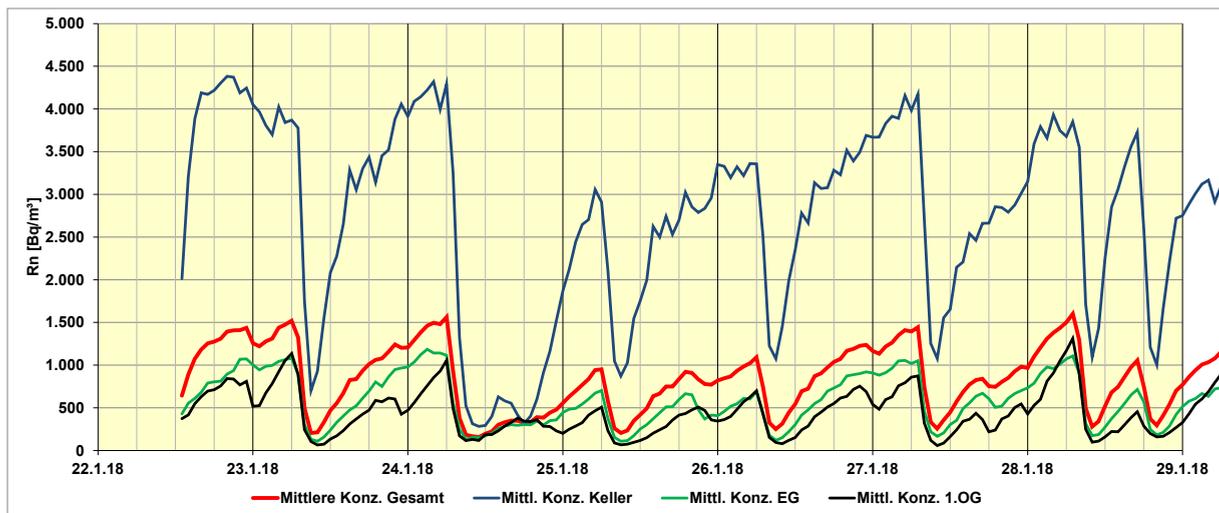


Abbildung 45: Zeitliche Entwicklung der mittleren Radonkonzentrationen in allen Etagen des Hauses sowie der mittleren Gesamtaktivität

8.2 Ergebnisse zur Bestimmung des Radonquellterms

8.2.1 Vorbemerkung zur Untersuchungsmethode

Die Gegenüberstellungen der Methoden zu den Radondichtheitsbestimmungen haben gezeigt, dass die gleichzeitige Messung des Anstiegs der Radonkonzentration in ausgewählten oder allen Räumen eines Hauses ein robustes Verfahren darstellt, um die Radondichtheit eines Gebäudes belastbar nachzuweisen. Der große Vorteil dieser Methode besteht darin, dass nach dem Aufstellen der Messgeräte, das nur wenige Minuten dauert, mit den Messungen bereits begonnen werden kann. Das Haus muss aber nicht in der gleichen Weise wie beim gewöhnlichen BDT zur Bestimmung der Luftdichtheit eines Gebäudes besonders abgedichtet werden. In dem vorliegenden Beispiel wird wegen der Vorkenntnisse über die Radonsituation ausgelotet, ob die direkte Absaugung in dem Heizungskeller einen Vorteil gegenüber der Anstiegsmethode liefert.

8.2.2 Bestimmung der Quellstärke mit der Anstiegsmethode

8.2.2.1 Heizungskeller

In der Abbildung 46 sind die Ergebnisse der Radonmessungen in ausgewählten Räumen des Erd- und Obergeschosses sowie im Heizungsraum des Kellers zusammengestellt. Außerdem sind die Differenzdrücke zwischen Heizungsraum (Radonquelle) und der Außenatmosphäre kontinuierlich aufgezeichnet worden. Im Normalzustand des Hauses ist der Differenzdruck bei etwa 2 Pa anzusiedeln. Die sich herausbildenden markanten Differenzdruckspitzen werden durch das Einsetzen der Heizung verursacht.

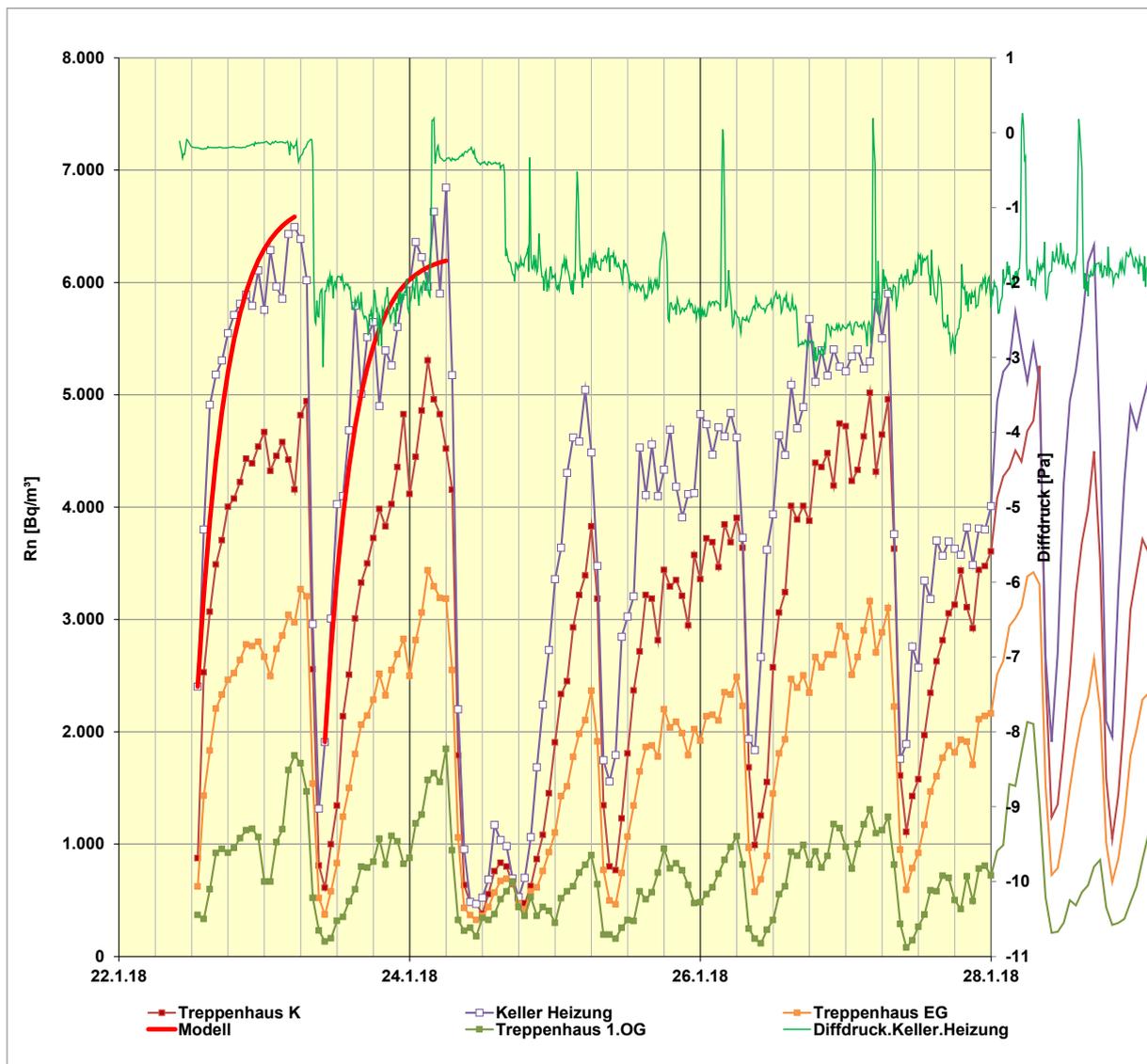


Abbildung 46: Ergebnisse der Radonmessungen in ausgewählten Räumen des Erd- und Obergeschosses sowie im Heizungsraum des Kellers. Zusätzlich angegeben sind die Differenzdrücke zwischen Heizungsraum (Radonquelle) und der Außenatmosphäre sowie die Ergebnisse der Modellierung zur Extraktion der Radonquellstärke und der Luftwechselrate im Heizungskeller.

Nach den in Kapitel 3 abgeleiteten Formeln kann die Radonquellstärke unter den Normalbedingungen im Haus mit Hilfe von

$$Q = \frac{C(t_a) - C_{AL}}{t_a} = \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}} \right], \quad (33)$$

sehr genau abgeschätzt werden, wobei t_a den für die Reproduktion des linearen Radonanstiegs gewählten Zeitraum bezeichnet. Aus den in der Abbildung 46 dargestellten Modellergebnissen folgt eine Quellstärke von

$$Q = 1300 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}} \right], \quad (34)$$

und eine Luftwechselrate im Heizungsraum von $\lambda_{LW} = 0,2 \text{ h}^{-1}$. Wegen der großen Quellstärke kann diese bereits innerhalb einer Stunde aus dem linearen Anstieg der Radonkonzentration nach dem Lüften bestimmt werden.

8.2.2.2 Wohnzimmer und Schlafzimmer

Beispielhaft ist für die Anwendung der Anstiegsmethode zur Bestimmung der Radonquellstärke Q das Wohnzimmer im Erdgeschoss und das Schlafzimmer im 1. Obergeschoss ausgewählt worden. Für beide Räume liegen auch Ergebnisse der Langzeitmessungen von knapp 3 Monaten vor (s. Ergebnisse in Tabelle 11). Die Radonkonzentrationsentwicklungen in diesen 2 Räumen sind in der Abbildung 47 für 1 Woche dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich in den meisten Fällen in beiden Räumen die Radonkonzentrationsverläufe sehr ähneln, obwohl die Räume in unterschiedlichen Etagen liegen. In beiden Räumen steigen innerhalb von wenigen Stunden die Radonkonzentrationen etwa um ca. $300 - 500 \text{ Bq/m}^3$ an, so dass daraus, wie im Kapitel 8.2.2.1 demonstriert, die Radonquellstärke der beiden Räume bei etwa $Q \approx 58 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}} \right]$ anzusiedeln ist. Aus den bestimmten Mittelwerten der Radonkonzentration (s. Ergebnisse in Tabelle 11) kann die mittlere Luftwechselrate mit $\lambda_{LW} \approx 0,17 \text{ h}^{-1}$ abgeschätzt werden, die auch in etwa für den Heizungsraum ermittelt wurde und annähernd für das ganze Haus veranschlagt werden kann.

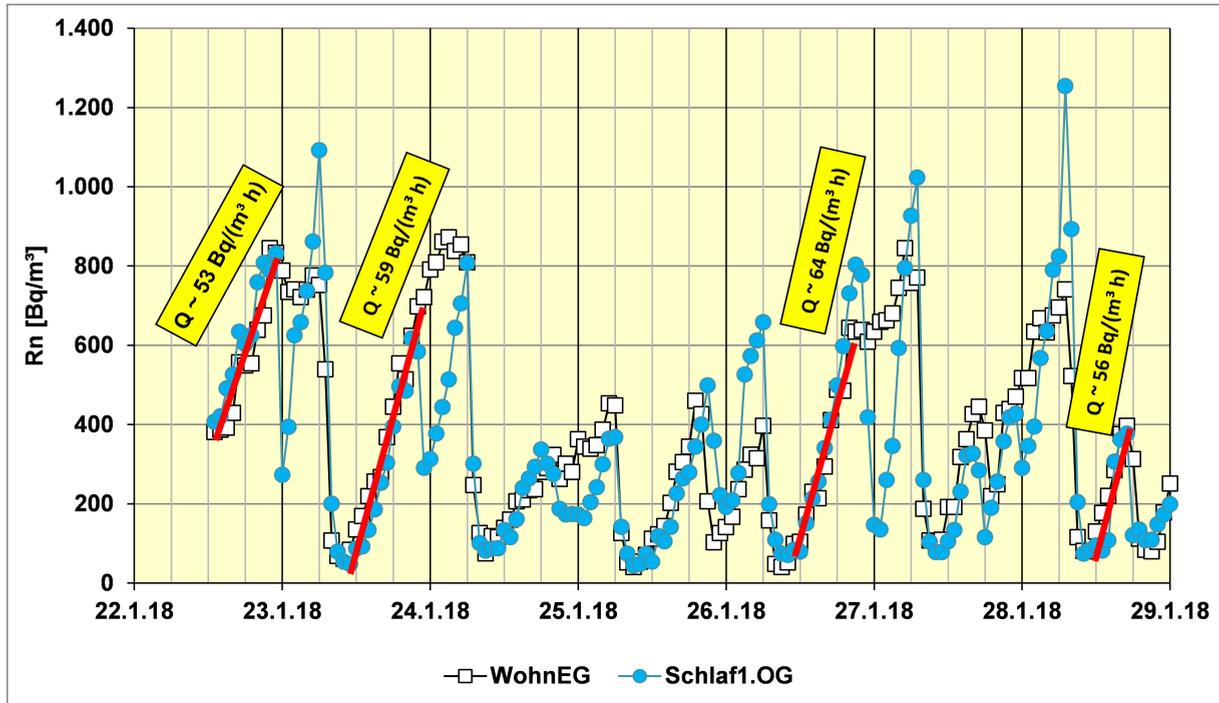


Abbildung 47: Wie Abbildung 44, jedoch beispielhaft nur für das Wohnzimmer im Erdgeschoss und das Schlafzimmer im 1. Obergeschoss. Die mit Hilfe der Anstiegsmethode berechneten Quellstärken sind angegeben

8.2.3 Bestimmung der Quellstärke im Heizungsraum mit dem Unterdruckverfahren

Da der Heizungsraum im Vorfeld der Untersuchungen als massive und wahrscheinlich einzige Radonquelle identifiziert wurde, ist das Unterdruckverfahren nicht am gesamten Haus, sondern nur am Heizungsraum durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 48 zusammengestellt, wobei in Kenntnis der Sachlage auf hohe Unterdrücke von 50 Pa, wie beim BD Dichtheitstest üblich, verzichtet wurde.

Die Absaugung wurde zunächst bei Unterdrücken von ca. 9,5 Pa begonnen, wobei im Heizungsraum ein hoher Luftwechsel von $\lambda_{LW} = 1,91 \text{ h}^{-1}$ induziert wurde. Dieser führte dazu, dass im Abstrom die Radonkonzentration auf ca. 1800 Bq/m³ absank. Nach den in Kapitel 3 abgeleiteten Formeln kann die Radonquellstärke mit

$$Q = 3500 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}} \right], \quad (35)$$

abgeschätzt werden. Die so ermittelte Quellstärke ist etwa um den Faktor 2,7 größer als der für den Normalzustand abgeleitete Wert.

Vergleicht man die Luftwechselraten von $\lambda_{LW} = 0,2 \text{ h}^{-1}$ (Normalzustand) und $\lambda_{LW} = 1,91 \text{ h}^{-1}$ beim Absaugen, hätte sich die Radonquellstärke etwa um den Faktor 9,5 erhöhen müssen. Dieses Beispiel zeigt erneut, dass trotz geringer Unterdrücke proportional mehr Außenluft als radonhaltige Bodenluft in den Heizungsraum angesaugt wird und somit eine lineare Extrapolation auf eine Situation, charakterisiert durch deutlich niedrigere Luftwechselraten, nicht möglich ist.

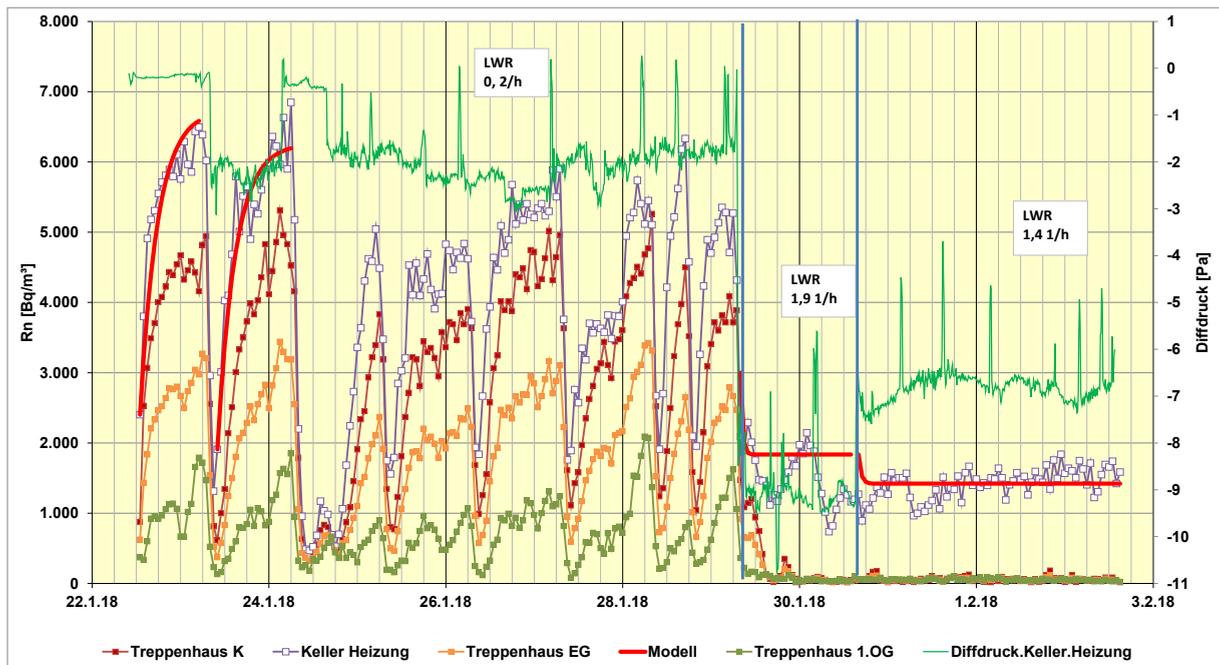


Abbildung 48: Wie Abbildung 46, jedoch zusätzlich mit den Ergebnisse des Unterdruckverfahrens

Wird der Unterdruck auf ca. 7 Pa verringert, reduziert sich die gemessene Luftwechselrate von $1,91 \text{ h}^{-1}$ auf $1,41 \text{ h}^{-1}$, was auch genau den jeweiligen Quotienten der Unterdrücke entspricht. Nach den in Kapitel 3 abgeleiteten Formeln kann die Radonquellstärke mit

$$Q = 2000 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}} \right], \quad (36)$$

abgeschätzt werden, welche etwa um den Faktor 1,5 größer als die im Normalzustand ist. Die im Abstrom gemessene Radonkonzentration sinkt jetzt auf ca. 1400 Bq/m^3 . Auch bei diesen etwas geringeren Unterdrücken bzw. Luftwechselraten wird bereits proportional mehr Außenluft als radonhaltige Bodenluft angesaugt, so dass eine lineare Extrapolation auf den Normalzustand, charakterisiert durch $\lambda_{LW} = 0,2 \text{ h}^{-1}$, zu nicht akzeptablen Ergebnissen führen würde. Erst zusätzliche Absaugungen im Unterdruckbereich von 3 - 5 Pa würden eine Annäherung an die im Normalzustand bestimmte Radonquellstärke liefern. Die Abhängigkeit der

Radonquellstärke vom Unterdruck ist somit in diesem Differenzdruckbereich nicht mehr linear. Dieses Beispiel zeigt eindrucksvoll, dass selbst im Bereich zwischen 7 Pa und 9,5 Pa eine deutliche Nichtlinearität nachgewiesen wurde und man nicht pauschal von Differenzdrücken von < 10 Pa als geeignet für den BD Test ausgehen kann.

8.3 Fazit der BDT Messungen im Objekt 5

Da im Vorfeld der Untersuchungen der Heizungsraum im Keller durch Messungen in allen Räumen mit der Anstiegsmethode als dominanter Radoneintrittspfad identifiziert wurde, ist eine Absaugung direkt am Heizungsraum durchgeführt worden. Das Haus wurde auch unter dem Blickwinkel ausgewählt, die Anwendbarkeit an einem Beispiel zu testen, in dem nicht das gesamte Haus bei der Anwendung der Unterdruckmethode involviert ist. Die Ergebnisse zeigten, dass auch in diesem Einzelraum trotz geringer Unterdrücke und hoher Quellstärke bereits deutlich mehr Außenluft als radonhaltige Bodenluft angesaugt wurde. Die Unterdruckmessungen waren deshalb nicht zielführend. Die im Normalzustand angewendete Anstiegsmethode [49] lieferte wegen der hohen Quellstärke von $Q = 1300 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}} \right]$ bereits nach einer Stunde Messzeit belastbare Ergebnisse.

Durch Fortführung der Absaugung über mehrere Stunden änderte sich die Radonsituation im gesamten Haus drastisch. Dies ist anhand der Ergebnisse in der Abbildung 49 illustriert. Es ist zu erkennen, dass die Radonkonzentration im Abstrom des Heizungsraums mit ca. 1400 Bq/m^3 konstant bleibt, während in allen anderen Räumen des Hauses die Radonkonzentrationen unterhalb von 100 Bq/m^3 sanken. Damit ist indirekt nachgewiesen, dass im Heizungsraum die einzige bzw. die dominante Radonquelle vorhanden ist. Die Hauseigentümer können durch eine einfache Sanierungsmaßnahme, Abführung der Radonfrachten durch Installation eines zusätzlichen Lüfters im Heizungsraum, die Radonkonzentrationen in allen übrigen Räumen des Haus unterhalb von 100 Bq/m^3 reduzieren. Jedoch auch ein Aufspüren aller Leckagen im Heizungsraum und ihr sicheres Verschließen wäre eine angemessene Sanierungsmaßnahme.

Die beispielhaft ausgewählten Räume, Wohnzimmer im Erdgeschoss und das Schlafzimmer im 1. Obergeschoss, sind gegenwärtig durch Radonquellstärken von $Q \approx 58 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}} \right]$ charakterisiert. Dieser Umstand ändert sich drastisch, wenn die Radonfrachten aus dem Heizungsraum abgesaugt werden.

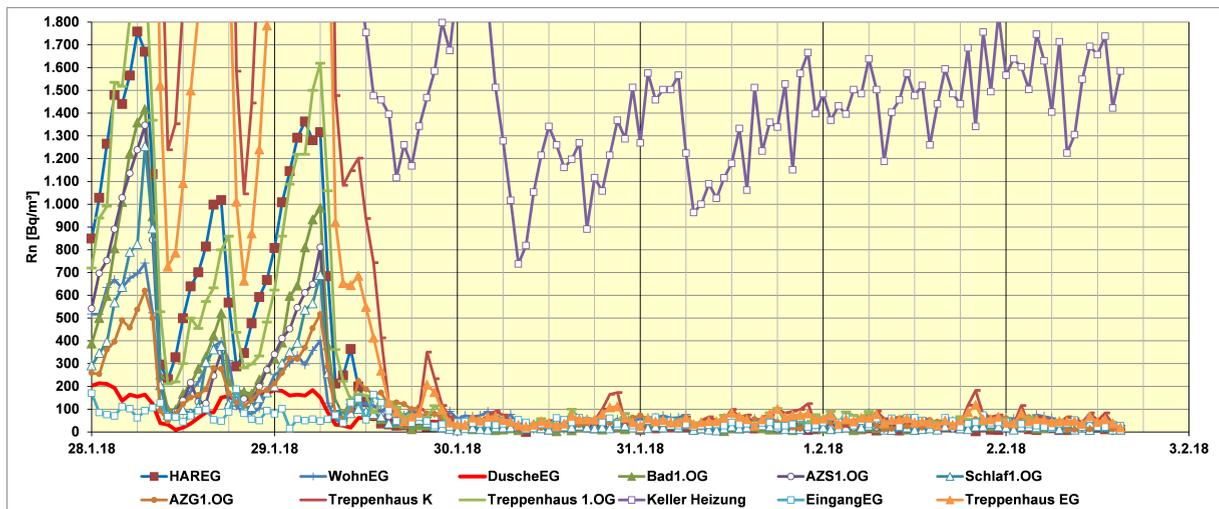
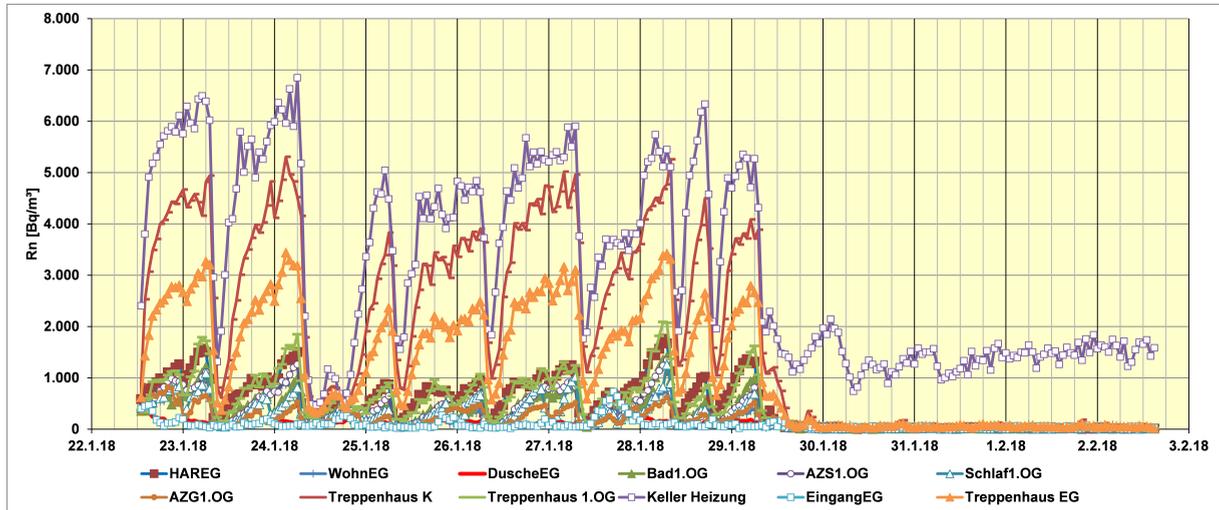


Abbildung 49: oberes Bild: Zeitliche Entwicklung der Radonkonzentrationen in allen Räumen des Erd- und Obergeschosses sowie im Heizungsraum des Kellers vor und nach Anlegen eines Unterdrucks
unteres Bild: Darstellung der Ergebnisse in einem verkleinerten Maßstab.

Wird im vorliegenden Fall anstatt der BDT die Anstiegsmethode [49] angewendet, ergeben sich hinsichtlich des zeitlichen Aufwands kaum große Unterschiede, da letztere bereits nach Messzeiten von 1 - 2 Stunden belastbare Ergebnisse liefern kann.

9 Ergebnisse eines BDT: Objekt 6

9.1 Beschreibung des Hauses

Es handelt sich bei Objekt 6 um ein frei stehendes Einfamilienhaus mit nur einem Erdgeschoss, das im Bungalowstil erbaut ist. Es ist nicht unterkellert und hat auch keine Hanglage, so dass nur über Leckagen in den Durchdringungen der Bodenplatte ein direkter Kontakt zum Baugrund bestehen könnte. Das Haus verfügt über einen unbeheizten Spitzboden, der über eine Deckenklappe mit integrierter Leiter zu erreichen ist. Dieser Bereich wurde aus allen Untersuchungen ausgegliedert. Diese Vorgehensweise entspricht auch der Prüfvorschrift entsprechend der Energiesparverordnung [46].

Das Haus wird über eine Luftwärmepumpe beheizt. Zusätzlich verfügt das Gebäude über einen Kamin. Die Raumaufteilung und die Installation des Lüftungssystems sind aus der Abbildung 50 zu entnehmen.

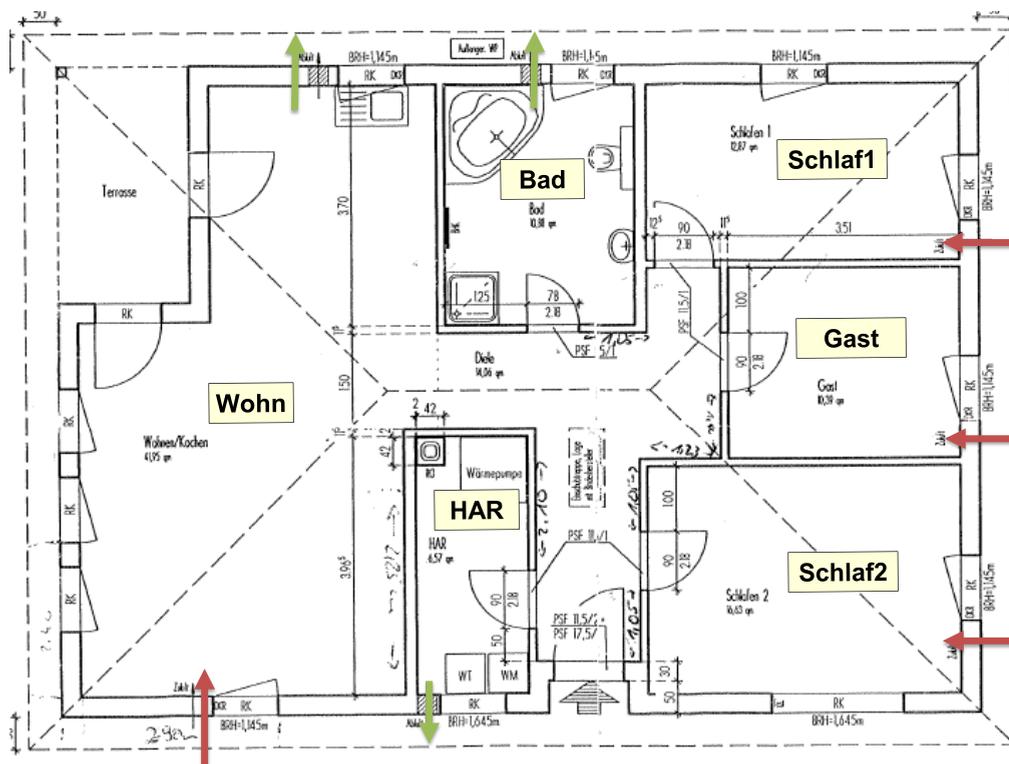


Abbildung 50: Aufteilung der Räume im Erdgeschoss des Hauses (grüne Pfeile kennzeichnen die Ausgangskanäle der mechanischen Lüftung, rote Pfeile die Frischlufteingangskanäle)

Die mechanische Lüftungsanlage arbeitet kontinuierlich und kann zwischen den Stufen 30 m³/h und 60 m³/h für die drei vorhandenen Lüfter variiert werden. In der Regel wird das Lüftungssystem durch die Eigentümer in der unteren Stufe betrieben, so dass eine Frischluftzufuhr von 90 m³/h (alle 3 Lüfter mit 30 m³/h) garantiert wird. Das entspricht bei einem Gesamtvolumen der beheizbaren Hülle des Hauses von 304 m³ einer Luftwechselrate von 0,3 h⁻¹.

9.2 Zur Radonsituation des Hauses

Bei einem ständigen Luftwechsel von $\lambda_{LW} = 0,3 \text{ h}^{-1}$ beträgt die mittlere Radonkonzentration im Haus ca. 55 Bq/m³. Wird das Lüftungssystem ausgeschaltet, steigt die mittlere Radonkonzentration im Haus auf etwa 300 Bq/m³ an. Das entspricht einer Luftwechselrate im Normalzustand ohne Lüftung von $\lambda_{LW} \approx 0,055 \text{ h}^{-1}$. Die Radonquellstärke des Hauses ist mit

$$Q = 16,5 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}} \right] \text{ zu veranschlagen.}$$

9.3 Ziel der Untersuchung und Ergebnisse

Im Vordergrund stand die Analyse der zeitlichen Entwicklung der Differenzdrücke zwischen dem Hausinneren und der Außenatmosphäre über einen Zeitraum von ca. 3 Wochen, wobei 2 Unterdruckstufen von 4 - 5 Pa und 10 Pa betrachtet wurden, um u.a. den Einfluss der witterungsbedingten Luftwechselschwankungen auf die Gesamtradonkonzentration des Hauses zu quantifizieren. Der Messzeitraum wurde bewusst in den November gelegt, um möglichst den Effekt von hohen Windgeschwindigkeiten auf die Innenraumradonkonzentrationen studieren zu können.

In der Abbildung 51 ist die zeitliche Entwicklung der Differenzdrücke dargestellt, wobei zusätzlich die Innen- und Außenraumtemperaturentwicklungen sowie die in unmittelbarer Nähe herrschenden Windgeschwindigkeiten mit angegeben sind. Es ist festzustellen, dass wegen der teils stark ändernden Windgeschwindigkeiten, die Differenzdrücke zeitweise bis auf maximal 20 Pa angestiegen sind. Die höchsten Windspitzen erreichten knapp 10 m/s. Die auffrischenden Winde induzierten kurzzeitig deutlich erhöhte Druckunterschiede zwischen dem Hausinneren und der Außenatmosphäre. Dieser typische Bernoulli-Effekt war auch bei den Messungen am Objekt 1 (s. Kapitel 4) beobachtet und diskutiert worden. Die gleichzeitig über einen Zeitraum von 3 Wochen gemessenen Radonkonzentrationen belegen, dass die kurzzeitigen Erhöhungen der Differenzdrücke, induziert durch auffrischende Winde, keine ersichtlichen Vergrößerungen der mittleren Radonkonzentration im Haus bewirkten. Dies

wurde anhand der gemessenen Radonkonzentrationen genauer untersucht. Auffrischende Winde bewirken hauptsächlich eine instantane Änderung des Luftwechsels, die je nach Stärke des Druckanstiegs oder-abfalls zu Radonkonzentrationschwankungen im Gebäude führen können. Wird jedoch die Radonkonzentrationsentwicklung über mehrere Stunden verfolgt, fallen diese nicht mehr ins Gewicht, es sei denn ein Sturmtief herrscht über mehrere Stunden. Bei solchen extremen Bedingungen sollten entsprechende Messungen zur Radonquellstärke nicht ins Auge gefasst werden. Bei einem klassischen BDT, der üblicherweise nur wenige Minuten dauern kann, sind jedoch Einschränkungen hinsichtlich der kurzzeitig sich ändernden Witterungseinflüsse immer zu beachten, da in diesem Fall Luftströme als Funktion eines Differenzdrucks gemessen werden und nicht die Änderung von Aktivitätskonzentrationen im Luftstrom.

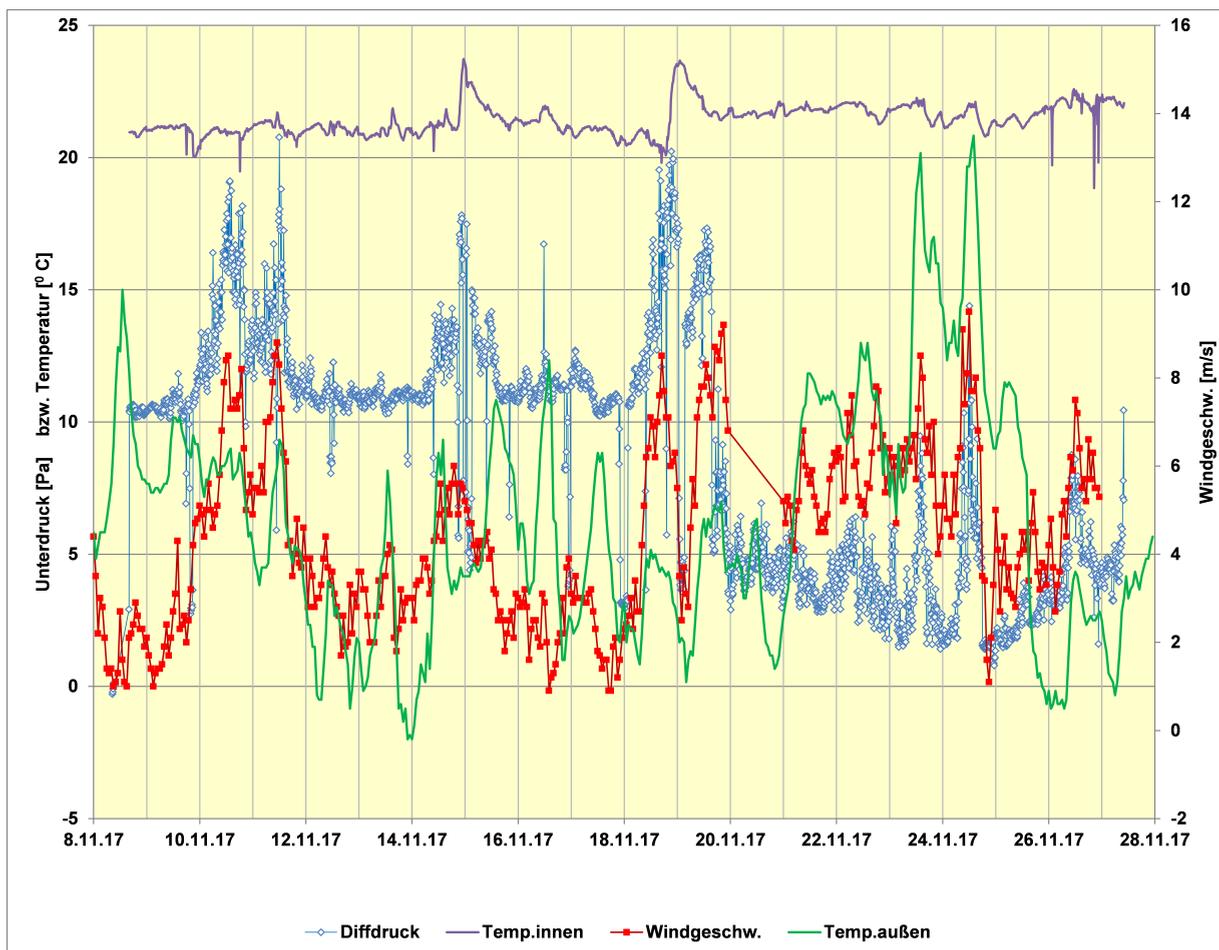


Abbildung 51: Zeitlichen Entwicklung der Differenzdrücke zwischen dem Hausinneren und der Außenatmosphäre über einen Zeitraum von ca. 3 Wochen, wobei 2 Unterdruckstufen von 4 und 10 Pa angelegt wurden. Zusätzlich angegeben sind die Ergebnisse der Innen- und Außenraumtemperaturmessungen sowie der in unmittelbarer Nähe herrschenden Windgeschwindigkeiten

Die in der Abbildung 52 dargestellten Ergebnisse belegen, dass die kurzzeitigen Erhöhungen der Differenzdrücke keine nachhaltigen Erhöhungen der Radoninnenraumkonzentration im Haus nach sich ziehen. Die Ergebnisse vermitteln eher die Tendenz, dass durch die auffrischenden Winde vorwiegend der Luftwechsel etwas erhöht wurde und die Radonzufuhr aus der Bodenluft, wie bereits in den anderen Beispielen festgestellt, nicht proportional zunahm. Als Nettoeffekt war somit eher eine Abnahme als eine Zunahme der Radonkonzentration bei auffrischenden Winden zu verzeichnen. Solch ein Verhalten war auch im Ergebnis von detaillierten Untersuchungen am Objekt 1 (vgl. Ergebnisse in Kapitel 4) festgestellt worden. Auch dieses Ergebnis stützt die These, dass durch die kurzfristigen Erhöhungen der Differenzdrücke wahrscheinlich proportional weniger radonhaltige Bodenluft nachströmt als atmosphärische Außenluft.

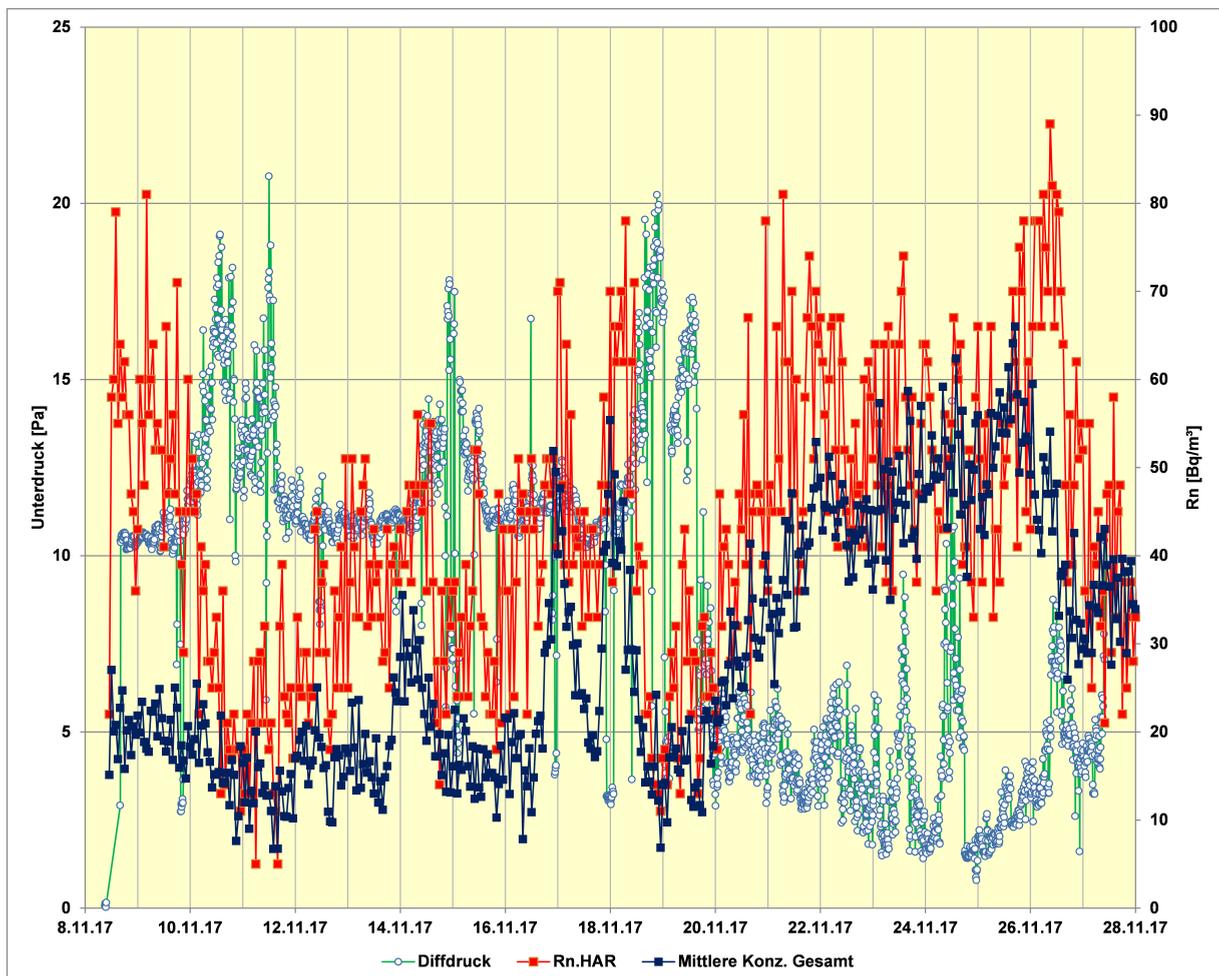


Abbildung 52: Entwicklung der Differenzdrücke zwischen dem Hausinneren und der Außenatmosphäre über einen Zeitraum von ca. 3 Wochen, wobei 2 Unterdruckstufen von 4 und 10 Pa angelegt wurden. Zusätzlich angegeben sind die Ergebnisse der Radonkonzentrationsentwicklungen im Hausanschlussraum und die berechneten mittleren Radonkonzentration (gewichteter Mittelwert) für das gesamte Haus

In der Abbildung 53 sind die Entwicklungen der Radonkonzentrationen in ausgewählten Räumen des Hauses über einen Zeitraum von ca. 3 Wochen für 2 Unterdruckstufen von 4 - 5 und 10 Pa dargestellt. Der Differenzdruck von ca. 4 - 5 Pa entspricht der Normal-situation des Hauses, in der die technische Lüftung eingeschaltet ist. Wird in dieser Situation der Differenzdruck dauerhaft um ca. 5 Pa erhöht, sinkt die mittlere Radonkonzentration von ca. 55 Bq/m³ auf 19 Bq/m³ ab (Mittelwerte jeweils über ca. 10 Tage). Diese niedrige mittlere Radonkonzentration ist bereits vergleichbar mit der der Außenluft und belegt auf anschauliche Weise, dass bereits bei geringen Differenzdruckerhöhungen proportional weniger radonhaltige Bodenluft als Außenluft angesaugt wird. Dieser Sachverhalt ist beiläufig bei allen neu gebauten Häusern festgestellt worden und dokumentiert, dass im Mittel bei Windgeschwindigkeiten von > 2 m/s eher eine Absenkung als eine Erhöhung der mittleren Radonkonzentration eines Hauses zu erwarten ist.

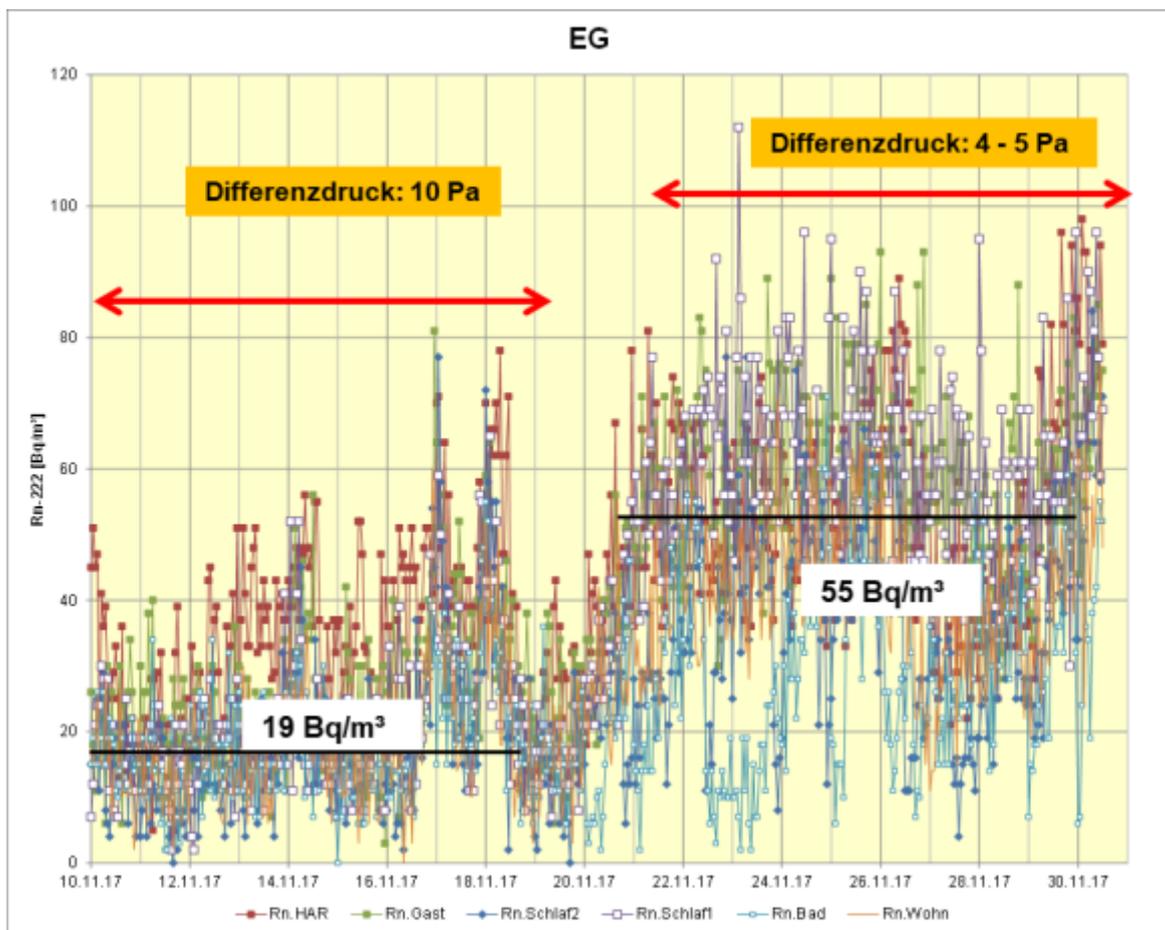


Abbildung 53: Entwicklung der Radonkonzentration in einzelnen Räumen des Hauses über einen Zeitraum von ca. 3 Wochen, wobei 2 Unterdruckstufen von 4 und 10 Pa angelegt wurden. Die berechneten mittleren Radonkonzentrationen (gewichteter Mittelwert) für das gesamte Haus im jeweiligen Unterdruckmodus sind mit angegeben.

9.4 Fazit der BDT Messungen im Objekt 6

Die Messungen haben gezeigt, dass bereits geringe Erhöhungen des Differenzdrucks um ca. 5 Pa zwischen dem Hausinneren und der Außenatmosphäre nicht zu einer Anhebung, sondern zu einer Absenkung der mittleren Radonkonzentration im Hause führte. Dies bedeutet auch, dass bei Windgeschwindigkeiten > 2 m/s eher eine Absenkung als eine Erhöhung der mittleren Radonkonzentration eines Hauses zu erwarten ist. Folglich ist die Dichtigkeit des Hauses gegenüber dem Baugrund deutlich besser als die Dichtigkeit des Hauses gegenüber der Außenatmosphäre. Auch dieses Objekt ist ein weiteres Beispiel dafür, dass im Bereich von 5 - 10 Pa Nichtlinearitäten des Anstiegs der Quellstärke vorliegen, die bei einer Extrapolation aus Unterdruckversuchen auf Normalbedingungen zu signifikanten Unterschätzungen führen würden.

10 Vorschläge zur Überprüfung der Radondichtheit eines Hauses

10.1 Zur Definition der Radondichtheit eines Hauses

Es ist anhand von Praxisbeispielen gezeigt worden, dass nur unter Einhaltung einer Reihe von Randbedingungen eine nachvollziehbare und belastbare Definition der Radondichtheit eines Hauses ableitbar ist. Zunächst ist festzuhalten, dass in einem neu gebauten Haus, in dem der gewöhnliche BDT zur Luftdichtigkeitsprüfung erfolgreich absolviert wurde, der sogenannte "Normalzustand" in vielen Fällen durch eine sehr geringe Luftwechselrate von $\lambda_{LW} \approx 0,03 - 0,1 \text{ h}^{-1}$ charakterisiert ist. Die untersuchten Gebäudehüllen der neu gebauten Häuser sind somit als "sehr luftdicht" zu bezeichnen.

Hierzu ist des Weiteren zu bemerken, dass solch niedrige Luftwechselraten die für den Feuchteschutz von $\lambda_{LW} = 0,2 \text{ h}^{-1}$ (ohne Zutun der Nutzer) erforderlichen Luftvolumenströme nach DIN 1946-6 [45] nicht annähernd erreichen (s.a. Ergebnisse in Tabelle 3). Die DIN 1946-6 ist zwar in den Bundesländern nicht bauaufsichtlich eingeführt und somit auch nicht verbindlich, aber gerade in Bezug auf den Feuchteschutz als anerkannte Regel der Technik anzusehen. Das kann bei einer Entscheidung zu den Ursachen einer Referenzwertüberschreitung ausschlaggebend sein. Insbesondere dann, wenn die Baufirma die einschlägigen Abdichtungsnormen beachtet hat.

Damit jedoch in einem Haus mit einem so niedrigen Luftwechsel die Radonkonzentrationen in den einzelnen Aufenthaltsräumen einen Wert von 300 Bq/m^3 im Langzeitmittel nicht übertreffen, sind entweder hohe Anforderungen an die Radondichtheit der Gebäudehülle gegenüber dem Baugrund zu stellen oder eine technische Lüftung zu installieren. Jedoch auch das Lüftungsverhalten der Bewohner (z.B. häufiges Querlüften, Ankippen der Fenster) kann dazu

führen, dass im Langzeitmittel Radonkonzentrationen von 300 Bq/m^3 in Aufenthaltsräumen nicht übertroffen werden. Entsprechende Beispiele wurden detailliert untersucht.

Der Differenzdruck zwischen der Hausaußenatmosphäre und der des Hausinneren beträgt nach den Untersuchungsergebnissen an der Haustür im Mittel etwa $2 - 4 \text{ Pa}$, wobei frische Außenluft um Größenordnungen stärker über diverse Wegsamkeiten in der oberirdischen Gebäudehülle als über die Verbindungen zum Baugrund in das Haus nachströmen kann. Auch die Witterungsbedingungen (Wind, niedrigere Temperaturen im Winter) haben saisonbedingt einen tageszeitlichen Einfluss auf die Radonsituation, der in Einzelfällen detailliert untersucht wurde. In vielen neugebauten Häusern wäre eine mittlere Radonquellstärke von

$$Q \approx 30 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{ h}}, \quad (37)$$

ausreichend gering, damit auch bei einer niedrigen Luftwechselrate von

$$\lambda_{\text{LW}} \approx 0,1 \text{ h}^{-1}, \quad (38)$$

die noch deutlich kleiner als die in Tabelle 1 aufgelisteten Mindestluftwechselraten ist, die mittlere Radonkonzentration, bezogen auf das gesamte Hausvolumen, den Referenzwert von 300 Bq/m^3 nicht übersteigt. Falls noch niedrigere Luftwechselraten zu besorgen sind, müsste die Radonquellstärke entsprechend geringer sein. Eine Aussage zur Radondichtheit ist u.E. nur möglich, wenn gleichzeitig eine Vorgabe für die Luftwechselrate gegeben ist (z.B. aus den Planungsunterlagen nach DIN 1946-6 [45] oder adäquaten Regelwerken). Es ist offensichtlich, dass eine untere Grenze der Luftwechselrate nicht unterschritten werden kann, da dann bereits die Radonexhalation der Baumaterialien den Hauptbeitrag zur Radoninnenraumaktivitätskonzentration liefern könnte.

Tatsache ist jedoch auch, dass neu gebaute Häuser in der Regel sehr luftdicht sind und nur durch eine technische Lüftung oder ein angepasstes Nutzungsverhalten der Bewohner garantiert werden kann, dass im Mittel die Radonkonzentrationen von 300 Bq/m^3 in Aufenthaltsräumen nicht übertroffen werden.

Die aus den BDT Messungen gewonnenen Information über die Höhe der Radonkonzentration als Funktion der Zeitdauer t im Abstrom $C_{\text{Abstrom}}(t)$ und die über den dabei gleichzeitig gemessenen Luftstrom bzw. abgeleitete Luftwechselrate λ_{LW} sind im Ergebnis der vielfältigen Untersuchungen nicht ausreichend, um eine belastbare Prognostizierung der Radonsituation in den einzelnen Aufenthaltsräumen des Hauses geben zu können.

Zusammengefasst ist Folgendes zu beachten: **Im Unterschied zum gewöhnlichen BDT, bei dem nur eine instantane (sofortige) Reaktionen von Systemvariablen (z.B. Volumenströme) auf eine Druckänderung registriert werden, wobei die Luftvolumina aller Räume des Hauses involviert sind, verlaufen dagegen die Änderungen der Radoncharakteristiken in den einzelnen Räumen des Hauses als vergleichsweise langsame Prozesse ab, die von der Lage und der Art der Radonquellen, dem Intrusionsverhalten des Radons in das Haus und vor allem auch von der Vermischung sowie dem Radontransport innerhalb des Hauses im starken Maße gesteuert werden. Deshalb können Radondichtheitsprüfungen von vornherein nicht nach einer Unterdrückung über einen kurzen Zeitraum bereits schlüssige Ergebnisse liefern, wie es beim ursprünglich eingeführten BDT zur Verifizierung der Gebäudedichtheit der Fall ist. Zudem ist immer zu beachten, dass bei einem gewöhnlichen BDT vergleichsweise hohe Unterdrücke bis 50 Pa angelegt werden. Dabei spielt es keine Rolle, ob atmosphärische Außenluft oder Bodenluft in das Haus eindringt. Nur die "Gesamtluftdichtigkeit" der Gebäudehülle allein ist von Interesse.** Beim gewöhnlichen BDT ist der mit der Radonintrusion verknüpfte Luftwechsel λ_Q aus dem Baugrund völlig vernachlässigbar, da er typischerweise mehrere Größenordnungen geringer als der des Luftwechsels λ_{LW} durch die Gebäudehülle ist.

Betrachten wir ein praktisches Beispiel: Ein Haus ohne Keller und mit 5 Räumen im Erdgeschoss. Durch Absaugen an der Haustür ist die Summe aller Ströme bekannt und beträgt z.B. 125 m³/h. Bezogen auf alle Räume im Erdgeschoss von 250 m³ würde der mittlere Luftwechsel 0,5 h⁻¹ betragen. Im Extremfall, der aber praktisch sehr häufig auftritt, kann man davon ausgehen, dass nur über einen einzigen der 5 Räume, der z.B. eine Leckage zur Außenluft aufweist, die Luft angesaugt wird. In dieser Situation liegt durch die alleinige Messung im Abstrom des Hauses keine Information über die anderen Räume vor, es sei denn, man würde während des Absaugvorgangs zusätzlich Radon- und Differenzdruckmessungen durchführen.

Um der aus den zwei Messgrößen des BDT - Radonkonzentration im Abstrom $C_{\text{Abstrom}}(t)$ und Höhe des Saugvolumens bzw. der Luftwechselrate λ_{LW} - resultierenden Quellstärke

$$Q(t) = C_{\text{Abstrom}}(t) \cdot \lambda_{LW} , \quad (39)$$

überhaupt ein Gewicht im Sinne einer Prognose zur Radondichtheit verleihen zu können, müsste bei Anwendung eines extrem konservativen Szenarios die für das ganze Haus bestimmte Radonquellstärke ad hoc stark reduziert werden (Faktor 3 - 10). Damit könnte mit

großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, dass in einem einzelnen Aufenthaltsraum, in den das Radon z.B. vorwiegend eintritt, die sich entwickelnde Radonkonzentration den Referenzwert von 300 Bq/m³ im Mittel nicht übertrifft. Eine solche pauschale Vorgehensweise stellt jedoch von vorn herein die Anwendung einer sehr vereinfachten Form des BDT, der für Luftdichtigkeitsprüfungen entwickelt wurde, zur Radondichtheitsprüfung infrage. Zudem muss berücksichtigt werden, dass sich in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle in neu gebauten Häusern das Verhältnis $\beta(\Delta P)$ der ins Haus eindringen Ströme von radonhaltiger Bodenluft und Außenatmosphäre, d.h.

$$\beta(\Delta P) = \frac{\lambda_Q(\Delta P)}{\lambda_{LW}(\Delta P)}, \quad (40)$$

mit Zunahme des Unterdrucks teils drastisch verringerte. Im Idealfall sollte jedoch dieses Verhältnis als Funktion des Unterdruck annähernd konstant bleiben, so dass eine Extrapolation von bei höheren Unterdrücken gewonnenen Ergebnissen auf die Situation in einem Haus, die durch niedrige Differenzdrücke zwischen Innenraum und das Haus umgebener Atmosphäre charakterisiert ist, möglich erscheint. Da in den Praxisbeispielen eine annähernde Konstanz von $\beta(\Delta P)$ als Funktion des Unterdrucks und eine gleichzeitige Konstanz von $Q(\Delta P)/\lambda_{LW}(\Delta P)$ nur in einem Beispiel nachgewiesen wurde, war ein BDT ohne Erweiterung mit zusätzlichen Messungen nicht zielführend bzw. führte nicht zu einer robusten Prognose hinsichtlich der Radondichtheit. Um dennoch Aussagen machen zu können, wären z.B. zusätzlich mindestens 3 BD Versuche bei vergleichsweise niedrigen Unterdrücken erforderlich, wobei der Unterdruckbereich von 5 Pa bis 10 Pa bereits im nichtlinearen Bereich liegen kann. Damit schlägt der Zeitgewinn der Methode BDT zur schnellen Bestimmung der Radonquellstärke via Anlegen eines erhöhten Unterdrucks am Haus nicht zu Buche. Das bedeutet, dass die Anwendbarkeit alternativer Methoden ausgelotet werden sollte.

Zudem konnte ein endgültiges und belastbares Urteil über die Radondichtheit des Hauses nur dann gefällt werden, wenn während des BDT mindestens in allen Aufenthaltsräumen des Hauses zusätzlich die Radonkonzentrationsentwicklungen während des Absaugversuchs mit aufgezeichnet wurden. Zur Verifizierung der Radonquellstärken in den einzelnen Aufenthaltsräumen ist auch die gleichzeitige Messung der entsprechenden Differenzdrücke sehr hilfreich. Diese Vorgehensweise erscheint jedoch nur dann sinnvoll zu sein, wenn im Rahmen des BDT die Randbedingungen so gewählt sind, dass die Radonquellstärke $Q(\Delta P)$ des Hauses als Funktion der Luftwechselrate bzw. des Unterdrucks ΔP annähernd linear an-

steigt und gleichzeitig das Verhältnis $\beta(\Delta P)$ als Funktion des Unterdrucks auch annähernd konstant bleibt. Dies wird meistens implizit vorausgesetzt, ist aber nur in wenigen Fällen überhaupt erfüllt. Seine Gültigkeit kann aber während des BDT mit einer angepassten Anzahl von Druckstufen kontrolliert werden.

10.2 Zwei Szenarien zur Prüfung der Radondichtheit eines Hauses

10.2.1 Vorbemerkung zu den Szenarien

Im Ergebnis der Untersuchungen sind zum Vergleich und auch zur Untersetzung der Argumente zwei Szenarien in den Vordergrund gestellt worden. Im Vorfeld der Untersuchungen und zur Auswahl der Häuser sind zunächst im Haus immer Radonmonitore in jedem Raum aufgestellt worden. Soweit wie möglich, wurde auch versucht, die Differenzdrücke zwischen den einzelnen Räumen mit zu erfassen. Im Szenario 1 wurde der bereits im BfS Vorhaben [49] an 10 Häusern praktizierten Vorgehensweise (Anstiegsmethode) gefolgt. Aus den linearen Anstiegen der jeweiligen raumbezogenen Radonkonzentrationen konnten für jeden einzelnen Raum oder eingeschränkt nur für die ausgewählten Aufenthaltsräume, die lufttechnisch an die Radonquelle(n) gekoppelt waren, bereits nach 2 - 4 Stunden Messzeit die Radonquellstärken Q_i ausreichend genau bestimmt werden. Bei Kenntnis dieser bereits wichtigen Informationen hinsichtlich der Radondichtheit wurde dann im Szenario 2 die Unterdruckmethode mit dem Ziel angewendet, ob und unter welchen Bedingungen eine schnellere und gleichzeitig auch belastbarere Prognose über die Radondichtheit des Hauses gewonnen werden kann.

Abgesaugt wurde meistens an der Haustür, wobei der Hausflur als "Mischkessel" der aus allen Räumen des Hauses stammenden Volumenströme fungierte. Während dieser Absaugperiode wurden zur Manifestierung der Randbedingungen für die Anwendbarkeit des BDT die Radonkonzentrationsentwicklungen in allen Räumen und auch die jeweiligen Differenzdrücke weiter aufgezeichnet.

10.2.2 Szenario 1: Prüfung der Radondichtheit ohne Anlegen eines Unterdrucks

Zur Bewertung der Radondichtheit eines Hauses wird im Szenario 1 auf eine Unterdruckanlegung völlig verzichtet. Wir folgten hierbei der bereits im BfS Vorhaben [49] propagierten Vorgehensweise, wobei vor Bauabnahme in allen Räumen des Hauses die Radonkonzentrationsentwicklung zur Visualisierung des gesamten Radontransports im Haus aufgezeichnet ist. Die Visualisierung des Radontransports bzw. die Umverteilung des Radons aus der Quelle in die einzelnen Räume ist dann besonders transparent erfassbar, wenn vor Beginn das Haus gelüftet wurde. Aus den linearen Anstiegen der jeweiligen raumbezogenen Radonkonzentrationen konnten die Radonquellstärken Q_i für jeden einzelnen Raum oder eingeschränkt nur für die ausgewählten Aufenthaltsräume je nach Höhe der Quellstärke bereits nach 2 - 4 Stunden Messzeit bestimmt werden.

Da die Installation der Messgeräte am Tag vor der Bauabnahme erfolgt, kann in der Regel die Radonkonzentrationsentwicklung im Haus über 12 Stunden oder mehrere Tage (z.B. dazwischenliegendes Wochenende) aufgezeichnet werden, so dass eine sehr hohe Prognose-sicherheit gegeben ist. Die Radonquellstärke eines Raums i berechnet sich aus

$$Q_i = \frac{C(t_a) - C_{AL}}{t_a}, \quad (41)$$

wobei C_{AL} die Radonkonzentration der Außenluft bzw. die Radonkonzentration im Raum nach der Lüftung ist und t_a die Zeitdauer des linearen Anstiegs bezeichnet. Damit ist bereits nach ca. 2 - 4 Stunden die wichtigste Größe "Radonquellstärke" für alle oder nur ausgewählte Räume mit großer Sicherheit bestimmt und die Messkampagne zur Verifizierung der Radondichtheit des Hauses kann beendet werden.

Wird beispielhaft ein zu hoher Unterdruck angelegt und praktisch nur Außenluft angesaugt, was in der Praxis oft der Fall ist, gilt $C(t_a) \approx C_{AL}$ und eine Radonquellstärke kann damit nicht abgeleitet werden. Dies ist eines der entscheidenden Nachteile der Unterdruckverfahren.

Beträgt der durch ein modernes Lüftungssystem technisch herbeigeführte Luftwechsel bei einem nahezu drucklosen Betrieb des Hauses $\lambda_{TL} \approx 0,5 \text{ h}^{-1}$ und erfüllen die aus den Anstiegen abgeleiteten Radonquellstärken die Bedingung

$$Q_i < 150 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{ h}}, \quad (42)$$

ist im Sinne der in Kapitel 1 eingeführten Prämissen das Haus als radondicht zu bezeichnen. Jedoch ist hier zu beachten, dass Häuser, die bei ca. 2 - 4 Pa Unterdruck durch Radonquell-

stärken von $Q \approx 150 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{ h}}$ charakterisiert sind, nach u.E. oftmals bereits offensichtliche

Baumängel aufweisen, die der Radonintrusion in das Gebäude Vorschub leisten. Häufig sind die vermeidbaren Leckagen in den Durchörterungen der Bodenplatte oder in den aufgehenden Kellerwänden die Hauptursache des Radontransports aus dem Baugrund in das Gebäude. Die ohne Einschalten einer technischen Lüftung resultierenden Radonkonzentrationen würden in diesem Fall bei 3000 bis 5000 Bq/m³ anzusiedeln sein. Ein solches Haus sollte nicht als radondicht bezeichnet werden.

Des Weiteren ist zu beachten, dass eine technisch erzwungene mittlere Luftwechselrate von $\lambda_{\text{TL}} \approx 0,5 \text{ h}^{-1}$ in einem Haus möglicherweise nicht in jedem Aufenthaltsraum zu jeder Zeit einfach zu realisieren ist. Im Sinne einer ausreichend konservativen Betrachtungsweise sollte deshalb die Radonquellstärke eines Raums eher beständig bei

$$Q_i < 30 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{ h}}, \quad (43)$$

angesiedelt werden, so dass bei einer vergleichsweise um den Faktor 5 geringeren Luftwechselrate von $\lambda_{\text{LW}} \approx 0,1 \text{ h}^{-1}$ der Referenzwert von 300 Bq/m³ immer noch nicht überschritten wird.

Die Untersuchungen haben des Weiteren gezeigt, dass Unterdrücke, hervorgerufen durch starken Wind, eher zu einer Verringerung der Radonkonzentration im Haus führen, da der durch den Wind verursachte erhöhte Luftwechsel wirksamer zu Buche schlägt.

Die Methode der gleichzeitigen Messung der Radonkonzentrationsentwicklungen in allen Räumen wird durch den AN seit mehr als 15 Jahren erfolgreich zu Radondichtheitsbestimmung angewendet. Insbesondere ist diese Methode auch extrem effektiv, um schon während der Bauphase Mängel bei der Radondichtheit aufzuspüren. Werden Baumängel hinsichtlich der Radondichtheit erst bei der Bauabnahme erkannt, ist deren Beseitigung meistens mit stark erhöhten Zusatzkosten verbunden.

10.2.3 Prüfung der Radondichtheit durch Anlegen eines Unterdrucks

10.2.3.1 Szenario 2a: BDT ohne zusätzliche Messungen in einzelnen Aufenthaltsräumen

Wird zur Bestimmung der Radonquellstärke eines Hauses in Anlehnung an den gewöhnlichen BDT ein gewisser Unterdruck angelegt, um die Radonquellstärke über die Radonkonzentrationsentwicklung im Abstrom zu bestimmen, kann nur auf die Radonquellstärke, die bei einer nahezu drucklosen Lüftung des Hauses immer existent ist, geschlossen werden, wenn sich im gesamten Unterdruckintervall von 2 - 4 Pa bis zu 50 Pa die Verhältnisse der jeweiligen Intrusionsraten $\beta(\Delta P) = \lambda_Q(\Delta P) / \lambda_{LW}(\Delta P)$ annähernd konstant bleiben und so eine belastbare und einfach zu handhabende lineare Extrapolation von höheren Unterdrücken auf niedrige Unterdrücke im Bereich von 2 - 4 Pa möglich ist. Ob dies realisierbar ist, kann nur durch Unterdruckversuche bei unterschiedlich hohen Luftwechselraten getestet werden, wobei hausspezifische Funktionen für $\beta(\Delta P)$ abgeleitet werden müssen. Der erwartete Vorteil der BD Messungen besteht dann darin, dass bei höheren Unterdrücken ein Plateauwert der Radonkonzentration im "Mischkessel" Flur, von dem meistens über die Haustür abgesaugt wird, bereits nach kürzeren Zeitspannen als mit der Anstiegsmethode praktiziert, erreicht werden könnte. Tatsächlich schlägt dieser Effekt jedoch nicht so stark zu Buche, da die Vermischung aller aus allen Räumen in den Flur gesaugten Radonaktivitätsströme, charakterisiert durch unterschiedliche Geschwindigkeiten und Temperaturen, kein instantaner Prozess ist. In jedem Fall liefert diese Methode bestenfalls eher nur einen pauschalen Überblick über die Radonintrusion in das Gebäude, jedoch keine Information darüber, wie sich die Radonkonzentrationen in den einzelnen Räumen des Hauses entwickeln könnten. Abgesehen davon belegen die Untersuchungsergebnisse, dass die vom "Mischkessel" Flur abgesaugten Radonfrachten auch keinen belastbaren Mittelwert darstellen, der für das gesamte Haus zu veranschlagen wäre. Wegen der unterschiedlich hohen Luftgeschwindigkeiten mischen sich die ungleich starken Radonaktivitätsströme aus den einzelnen Zimmern nur zu einem bestimmten Grad vollständig. Ist die Größe $\beta(\Delta P)$ stark abhängig vom gewählten Unterdruck ΔP , müssten die Absaugversuche wiederholt werden, wobei dann deutlich kleinere Differenzdrücke ins Auge zu fassen sind. Damit sind deutlich längere Messzeiten verbunden, so dass man einen möglichen Vorteil der BDT aufgibt.

Alles in allem ist es deshalb schwierig, ein stringentes Urteil darüber zu fällen, ob man bei Kenntnis der **einzigsten akzessibelen Messgröße**, d.h. des Produkts von Radonkonzentration im Abstrom und Absaugstrom,

$$Q(t) = C_{\text{Abstrom}}(t) \cdot \lambda_{LW} , \quad (44)$$

davon ausgehen kann, dass in jedem einzelnen Aufenthaltsraum des Hauses der Referenzwert von 300 Bq/m^3 eingehalten wird. Im Rahmen des Vorhabens ist nur ein Fallbeispiel aufgetreten, in dem eine Konstanz der Größe $\beta(\Delta P)$ über ein vergleichsweise breites Unterdruckintervall beobachtet wurde.

10.2.3.2 Szenario 2b: BDT mit zusätzlichen Messungen in einzelnen Aufenthaltsräumen

Angenommen der BDT liefert als Ergebnis, dass die über dem Abstrom bestimmte Radonquellstärke $Q(t) = C_{\text{Abstrom}}(t) \cdot \lambda_{\text{LW}}$ linear als Funktion der Luftwechselrate ansteigt und gleichzeitig die Größe $\beta(\Delta P)$ annähernd konstant bleibt. Dann würde sich die mittlere Radonkonzentration im Flur des Hauses bzw. im Abstrom als Funktion des Unterdrucks bzw. der Luftwechselrate nicht ändern. Das bedeutet, die bei einem Unterdruck von beispielhaft 50 Pa gemessene Radonkonzentration im Abstrom sollte auch bei kleineren Unterdrücken unter normalen Nutzungsbedingungen beobachtet werden. In anderen Worten, die sich nach ausreichend langen Ansaugzeiten t_e einstellende Radonkonzentration im "Mischkessel" Flur oder im Abstrom

$$C_{\text{asym}} \approx \frac{Q(t_e)}{\lambda_{\text{LW}}} = C_{\text{Abstrom}}(t_e), \quad (45)$$

ist unabhängig vom gewählten Unterdruck. Der Vorteil besteht darin, dass der asymptotische Wert für C_{asym} umso eher erreicht wird, je höher der Unterdruck ist. Selbst in dieser vorteilhaften Situation ist eine Prognose, wie oben beschrieben, nur bei Anwendung eines extrem konservativen Prinzips möglich. Die im Abstrom bestimmte Radonquellstärke müsste stark reduziert werden (Faktor 3 - 10), um sicher auszuschließen zu können, dass in einem einzelnen Aufenthaltsraum, in den das Radon z.B. vorwiegend eintritt, die sich entwickelnde Radonkonzentration den Referenzwert von 300 Bq/m^3 im Mittel nicht übertrifft. Um von solch einer konservativen aber immer noch unsicheren Abschätzung Abstand zu nehmen, wäre eine gleichzeitige Messung der Radonkonzentrationsentwicklungen in den zu bewertenden Aufenthaltsräumen während des BDT zwingend erforderlich.

Unabhängig davon bleibt immer noch zu berücksichtigen, dass die mit hohen Unterdrücken erzielten Prognosen nur dann belastbar sind, wenn in den einzelnen Aufenthaltsräumen des Hauses eine kurze Messzeit ausreicht, die komplizierten Radonmischungsprozesse so zu erfassen, wie sich auch bei sehr geringen Unterdrücken unter normalen Nutzungsbedingungen abspielen. Letzteres stellt immer ein Problem dar, da in einem Haus durch erhöhte Un-

terdrücke die sonst ablaufenden Radonumverteilungsprozesse möglicherweise empfindlich verändert werden könnten. Wie in den Untersuchungen gezeigt wurde, wird das in das Haus eintretende Radon oftmals sofort in den "Mischkessel" Flur transportiert und von dort in den Abstrom. Der im Normalzustand des Hauses stattfindende Radontransport in Aufenthaltsräume könnte stark unterminiert werden, was die Prognosesicherheit weiter angreifbar machen würde.

10.3 Kostengründe als weitere Randbedingung

Werden Kostengründe als weitere Randbedingung für die Auswahl eines Prüfverfahrens zur Radondichtheit herangezogen, ist davon auszugehen, dass eine BD Ausrüstung (mobile Haustür mit Ventilator zur Erzeugung von Unterdruck) sowie ein Radonmonitor vom Typ AlphaGUARD ca. 13.000 € kosten. Für diesen Geldbetrag könnten mindestens 10 Radonmonitore erworben werden, die für die Bestimmung der Radonquellstärke durch Aufzeichnen des Radonanstiegs (Szenario Kapitel 10.2.2) völlig ausreichend sind. Mit diesen Radonmonitoren kann die komplexe Radonkonzentrationsentwicklung im Haus durch eine gleichzeitige Messung in allen Räumen belastbar visualisiert und eine stabile Prognose einer mittleren Radonkonzentration für jeden einzelnen Raum des Hauses erstellt werden. Vorteilhaft ist, am Abend vor der Bauübergabe mit dem Messen zu beginnen.

Beim originalen BDT zur Luftdichtigkeitsbestimmung werden bei Unterdrücken bis ca. 50 Pa die Luftwegsamkeiten in einem Haus getestet, wobei es irrelevant ist, ob die abgesaugte Luft aus dem Baugrund stammt oder nicht. Im Gegenteil, es wird implizit unterstellt, dass der Beitrag der Intrusion von Bodenluft im gesamten Abstrom vernachlässigbar gering ist. Beim Test der Radondichtheit eines Hauses spielt jedoch die mit der Bodenluft transportierte Radonaktivität, d.h. der Radonaktivitätsstrom, die entscheidende Rolle. Nach unserem Verständnis ist die Radonintrusionsrate bzw. die Radondichtheit eines Hauses in Hinblick auf das Wirken von sehr geringen Unterdrücken zwischen der das Haus umgebenden Außenluft und der Luft im Inneren des Hauses zu sehen. Ist in dieser Situation die Radonintrusionsrate groß, d.h. in einzelnen Räumen des Hauses werden mittlere Radonkonzentrationen $> 300 \text{ Bq/m}^3$ gemessen, könnte man das Haus unter diesen Randbedingungen als radonundicht bezeichnen. Jedoch eine Erhöhung des Luftwechsels ohne Erhöhung des Differenzdruckes und somit auch ohne Erhöhung der Radonintrusionsrate kann durch ein modernes Zu- und Abluftlüftungssystem einfach realisiert werden. Infolgedessen kann die Radonkonzentrationen auf das gewünschte Maß abgesenkt werden und der Begriff "radonundicht" ist nicht ins Kalkül zu ziehen, denn die Höhe des Luftwechsels allein bestimmt die Radonkonzentration in den Aufenthaltsräumen. Ob zukünftig radonundichte Häuser, die nur durch ein entsprechend regu-

liertes Lüftungssystem zu akzeptieren sind, wird die weitere Entwicklung sowie die Umsetzung von technischen Normen zeigen.

10.4 Zusammenfassung der Prüfungsmethoden zur Radondichtheit

Die Gegenüberstellungen der zwei Methoden (Szenarien) zu Radondichtheitsbestimmungen haben gezeigt, dass die gleichzeitige Messung des Anstiegs der Radonkonzentration in ausgewählten oder allen Räumen eines Hauses (Anstiegsmethode) ein robustes Verfahren darstellt, um die Radondichtheit eines Gebäudes belastbar nachzuweisen. Der große Vorteil dieser Methode (Szenario 1) besteht darin, dass nach dem Aufstellen der Messgeräte, was nur wenige Minuten dauert, mit den Messungen bereits begonnen werden kann. Natürlich müssen eine vorhandene technische Lüftung abgeschaltet und die Lüftungsklappen geschlossen werden. Das Haus muss aber nicht in der gleichen Weise wie beim gewöhnlichen BDT zur Bestimmung der Luftdichtheit eines Gebäudes abgedichtet werden. In der Tabelle 12 sind die Randbedingungen zur Definition der Radondichtheit eines Hauses nach Szenario 1 zusammengestellt.

Die direkte Anwendung eines Unterdruckverfahrens zur schnelleren Bestimmung der Radondichtheit (Szenario 2) stößt auf eine Reihe von Schwierigkeiten und führt letztlich zu keinen belastbaren Prognosen. Um die Prognosesicherheit des BDT dennoch zu verbessern, sollten immer bei einem BDT Radonmonitore in den Aufenthaltsräumen zusätzlich aufgestellt und die Differenzdrücke gemessen werden. Es ist bei der Auswertung der Daten zu beachten, dass sich bei erhöhten Unterdrücken die Radontransportvorgänge im Haus völlig anders entwickeln können als in den normalen Situationen bei geringen Unterdrücken. Beim Unterdruckverfahren werden vorrangig große Luftmengen über den "Mischkessel" Flur abgezogen, ohne dass es zu der unter Normalbedingungen stattfindenden Umverteilung der aus den Quellen stammenden Radonfrachten kommt.

Tabelle 12: Übersicht über die Randbedingungen zur Definition der Radondichtheit eines Hauses nach Szenario 1

| Messdauer | Messgrößen | Radondichtheit erreicht, wenn | Vorteile bzw. Nachteile |
|--|---|---|---|
| ca. 2 - 4 Stunden vor Bauabnahme | Radonquellstärken $Q = \frac{C(t_a) - C_{AL}}{t_a} = \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}} \right]$ | in allen Aufenthaltsräumen i gilt $\frac{Q_i}{\lambda_{LW}^i} < 300 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right]$ bzw. $\frac{Q_i}{\lambda_{TL}} < 300 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right]$ | Vorteil: Es wird in allen Räumen des Hauses gleichzeitig gemessen, alle mittleren Raum-Quellstärken Q_i werden bestimmt. Die Radondichtheit kann mittels $\frac{Q_i}{\lambda_{TL}} < 300 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right]$ und $\lambda_{TL} = 0,5\text{h}^{-1}$ sofort nachgewiesen werden. Nachteil: Der Wert für Luftwechselrate λ_{LW} für den Normalzustand kann zunächst nur geschätzt oder über ein Modell berechnet werden. |
| Langzeitmessung ca. 12 - 24 Stunden vor Bauabnahme | Radonquellstärken $Q = \frac{C(t_a) - C_{AL}}{t_a} = \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}} \right]$ und existierende Luftwechselraten, $\lambda_{LW} = \frac{Q}{C_{\text{asympt}}}$ | in allen Aufenthaltsräumen i gilt $\frac{Q_i}{\lambda_{LW}^i} < 300 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right]$ bzw. $\frac{Q_i}{\lambda_{TL}} < 300 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right]$ | Vorteil: Es wird in allen Räumen des Hauses gleichzeitig gemessen, alle Raum-Quellstärken Q_i sowie alle Radonkonzentrationen C_i und Luftwechselraten λ_{LW}^i werden experimentell bestimmt. Eine robuste Prognose über die Radondichtheit des Hauses ist möglich! |

Die Unterdruckverfahren können jedoch unter gewissen Randbedingungen vorteilhaft zum Aufspüren von Radonintrusionspfaden genutzt werden. Solche Untersuchungen werden jedoch nicht zur Überprüfung der Radondichtheit im Rahmen der Bauübergabe, sondern bereits je nach Baufortschritt in einer Situation durchgeführt, in der eine Beseitigung festgestellter Leckagen noch ohne großen Aufwand möglich ist.

Wird zur Bestimmung der Radonquellstärke ein Unterdruck angelegt, um die Radonquellstärke über die Radonkonzentrationsmessung im Abstrom zu bestimmen, kann nur auf die Radonquellstärke, die bei einer nahezu drucklosen Lüftung des Hauses existent ist, geschlossen werden, wenn im gesamten Unterdruckintervall das Verhältnis der jeweiligen Infiltrationsraten $\beta = \lambda_Q / \lambda_{LW}$ annähernd konstant bleibt und so eine belastbare Extrapolation möglich ist. Ob dies jedoch der Fall ist, kann nur durch Unterdruckversuche bei unterschiedlich hohen Luftwechselraten getestet werden. In jedem Fall liefert diese Methode nur einen pauschalen Überblick über die Radonintrusion in das Gebäude und keine Information darüber, wie sich die Radonkonzentration in den einzelnen Räumen des Hauses entwickeln könnte. Des Weiteren ist ein Modell zur Beschreibung des Systemverhaltens erforderlich, um

Prognosewerte für einzelne Aufenthaltsräume ableiten zu können. Abgesehen davon belegen die Untersuchungsergebnisse, dass die vom "Mischkessel" Flur abgesaugten Radonfrachten keinen belastbaren Mittelwert darstellen. Wegen der unterschiedlich hohen Luftgeschwindigkeiten mischen sich die unterschiedlich starken Radonaktivitätsströme aus den einzelnen Zimmern nur zu einem bestimmten Grad.

Alles in allem ist es deshalb schwierig, ein stringentes Urteil darüber zu fällen, ob bei Kenntnis der einzigen Messgröße Radonquellstärke man davon ausgehen kann, dass in jedem einzelnen Aufenthaltsraum des Hauses der Referenzwert von 300 Bq/m^3 eingehalten wird.

10.5 Anmerkungen zur Erweiterung der Vorgehensweise zur Überprüfung der Radondichtheit eines Hauses

Die Arbeit in der Praxis zeigt, dass ein Test zur Radondichtheit eines Hauses im Rahmen der Gebäudeübergabe weder vom Bauherrn noch von der Baufirma angestrebt wird, dennoch besteht ein Interesse, bei der Übergabe die Mängelfreiheit (Einhaltung des gesetzlich oder individuell geforderter Jahresmittelwert der Radonkonzentration unter Nutzungsbedingungen) nachzuweisen. Radondichtheitsprüfungen sollten jedoch bereits in einer Phase des Rohbaus nach Fertigstellung der Gebäudehülle (Fenster, Türen, Medieneinbindung) durchgeführt werden, um gleichzeitig auch eine Leckagensuche zu ermöglichen. Oftmals ist z.B. die Suche nach den existierenden Leckagen zum Baugrund nach Fertigstellung des Fußbodenaufbaus praktisch nicht mehr möglich, da in neu gebauten Häusern über der Grundplatte zur Wärmedämmung eine etwa 15 cm mächtige Schicht aus Styropor aufgebracht ist, auf die der Estrich aufgetragen wird. In der Styroporschicht sind oftmals auch die wichtigsten Elemente der Fußbodenheizung eingebaut. Die in das Haus eindringenden Radonfrachten werden somit unterhalb der Estrichschicht im gesamten Haus verteilt und dringen dann über die Randfugen in die einzelnen Räume ein. Diese Art der Verfrachtung der radonhaltigen Bodenluft ist typisch für moderne Häuser.

Man kann z.B. ein vollständig fertiggestelltes Haus abends vor der endgültigen Bauabnahme bzw. der Radondichtheitsprüfung der Gebäudehülle nach dem Abdichten stark lüften und dann die Radonkonzentrationsentwicklung in allen Räumen des Hauses über Nacht aufzeichnen und somit auch, wie im vorliegenden Bericht gezeigt, die Radonquellstärke des Hauses sehr genau bestimmen. Am nächsten Tag könnten anhand der vorliegenden Ergebnisse die Radondichtheit des Hauses und die zu erwartenden maximalen Radonkonzentrationen in jedem einzelnen Zimmer belastbar prognostiziert werden. Meistens spielt der Zeitfaktor keine Rolle, so dass mehrere Tage zur Aufzeichnung des Systemverhaltens der neu gebauten Häuser zur Verfügung stehen und somit auch die Prognosesicherheit weiter erhöht wird. Dies ist auch nach u.E. immer im Sinne des Bauherrn und der Baufirma.

Bei einer solchen Vorgehensweise wird darauf geachtet, dass z.B. im Winter das Haus beheizt ist. Bei extremen Witterungsbedingungen (starker Wind, Dauerregen) wird die Messdauer entsprechend ausgedehnt, um deren Einflüsse sofort mit erfassen zu können. Dies war immer im Interesse aller Beteiligten.

Des Weiteren ist zu bemerken, dass, wie bereits in den Untersuchungen [49], [53], [54] dargelegt, dabei auch eine hohe Prognosesicherheit in Bezug auf die Jahresmittelwerte erzielt wird. Entscheidend dafür ist nicht die sehr genaue Kenntnis der Radonquellstärke, sondern von welcher Luftwechselrate im Jahresmittel auszugehen ist, um den vorgegebenen Referenzwert von 300 Bq/m³ einzuhalten.

Wie in diesem Bericht dargelegt, kann mit einem einfachen BDT, der nur die zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration im Abstrom als einzigen Systemparameter liefert, keine gleichwertig hohe Prognosesicherheit erreicht werden, wie bei der etablierten Anstiegsmethode. Der Vorteil des BDT könnte einzig darin liegen, dass unter speziellen Randbedingungen, ein Ergebnis bereits nach wenigen Stunden vorliegt, wenn bei hohem Unterdruck abgesaugt und das Verhältnis der Radoninfiltrationsrate aus der Bodenluft und Infiltrationsrate aus der Außenatmosphäre im gesamten Unterdruckintervall von 2 - 50 Pa sich praktisch nicht ändert. Jedoch unter Berücksichtigung aller in diesem Bericht diskutierten weiteren Ergebnissen ist die letztlich daraus resultierende Prognose für die Radondichtheit des Hauses nicht mit der durch die Anstiegsmethode erzielte hohe Prognosesicherheit bei vergleichbarem Aufwand gleichzusetzen.

Ein gewisser Vorteil des BDT könnte darin bestehen, dass durch Unterdruckänderungen im Bereich von wenigen Pa jahreszeitliche und/oder wetterbedingte Änderungen der Druckunterschiede zwischen dem Hausinneren und der das Haus umgebenden Atmosphäre simuliert und somit die Variationsbreite der damit verbundenen Quellstärken getestet werden könnten. Die empirisch gewonnenen Daten zeigen jedoch, dass diese ursächlich vorhandenen Radonquellstärkeänderungen bei weitem nicht so stark ins Gewicht fallen wie alle anderen Unbestimmtheiten hinsichtlich der Radonkonzentrationsentwicklung in singulären Räumen unter spezifischen Randbedingungen.

Ein erweiterter BDT könnte einen Fortschritt bedeuten, wenn gleichzeitig bei gewählten Unterdrücken in allen Räumen des Hauses Radonmonitore installiert werden, um die entsprechenden Radonkonzentrationsverläufe aufzuzeichnen. Dies ist aber nur sinnvoll, wenn mehrere Unterdruckstufen ins Auge gefasst werden und überdies die Unterdrücke insgesamt im Bereich unterhalb 10 Pa angesiedelt werden. Unterschiedlich hohe Unterdrücke beeinflussen nicht nur das Radonintrusionsverhalten, sondern auch mehr oder minder stark die Umverteilung der Luftströmungen und somit auch der Radonfrachten im Haus. Wird eine solche, auch als hoch komplexer Radondichtheitstest zu bezeichnende Vorgehensweise durchgeführt, bedeutet dies eine Abkehr von einem einfach durchführbaren Unterdrucktest, der für den gewöhnlichen BDT charakteristisch ist. Zusätzlich sollte bei einem komplexen BDT auch die Messung der unterschiedlichen Differenzdruckverteilungen im Haus nicht außer Acht gelassen werden, da diese bei einer normalen Nutzung des Hauses (z.B. geschlossene Innentüren) die Radonverfrachtung entscheidend mitbestimmen und somit letztlich mit festlegen, ob in den Aufenthaltsräumen der Referenzwert von 300 Bq/m³ eingehalten wird. Solch ein erweiterter BDT ist in der Regel weit aussagekräftiger, wenn bereits im Vorfeld der Dichtheitsmessungen zweckgerichtete Untersuchungen über die Radonsituation im Haus durchgeführt worden sind. Zu berücksichtigen ist hierbei immer, dass das Manifestieren der

Radonintrusionsvorgänge im Haus nur zielführend ist, wenn niedrige Unterdrücke von wenigen Pa angelegt werden. In dem Fall ist aber mit langen Messzeiten von ca. 8 - 12 Stunden und mehr zu rechnen, wobei die Abdichtmaßnahmen und der Aufbau der Technik für den BDT noch hinzukommen. Es ist immer zu bedenken, dass die Radonkonzentrationsentwicklungen in den einzelnen Räumen des Hauses stark retardiert erfolgen können und sich nicht so momentan entwickeln wie die Druckunterschiede. Letztlich sind sie das Ergebnis von komplizierten von Diffusion und Konvektion getriebenen Transportvorgängen im gesamten Haus.

Ein noch weiter modifizierter BDT könnte sinnvoll sein, wenn tatsächlich unter realistischen Bedingungen die Radondichtheit eines Hauses getestet wird. Man könnte den Absaugstrom z.B. auf eine Luftwechselrate von $0,5 \text{ h}^{-1}$ einstellen und müsste durch entsprechende Luftzuführungen garantieren, dass der Luftwechsel im gesamten Haus annähernd drucklos erfolgt, wobei Strömungskurzschlüsse etc. zu vermeiden sind. In jedem Fall sollten die Unterdrücke im Haus bei ca. 2 - 4 Pa anzusiedeln sein, was zu verifizieren ist. Zusätzlich sollten, wie oben propagiert, in jedem Raum des Hauses bzw. nur in den Aufenthaltsräumen Radonmonitore aufgestellt werden, um so einen belastbareren Überblick über die Gesamtradonsituation zu erhalten. Solche modifizierten BDT Messungen könnten auch für niedrigere Luftwechselraten von $0,2 \text{ h}^{-1}$ (Lüftung zum Feuchteschutz bei hohem Wärmeschutz, s. Tabelle 1) durchgeführt werden. Im Ergebnis von solchen modifizierten BDT Messungen wird sicher und sofort nachgewiesen, ob für die Radonkonzentrationen in den Aufenthaltsräumen unter Beibehaltung eines geforderten Luftwechsels λ_{TL} von z.B. $0,2 \text{ h}^{-1}$ oder $0,5 \text{ h}^{-1}$ (s. Tabelle 2) der Referenzwert von 300 Bq/m^3 nicht überschritten wird. Die Radonquellstärke des Hauses spielt bei dieser Vorgehensweise nur eine untergeordnete Rolle. Sie könnte aber aus der im Abstrom gemessenen Radonkonzentration bestimmt werden. Wichtig für die Bewertung ist nur die Radonkonzentrationsentwicklung in den ausgewählten Aufenthaltsräumen. Nach den diskutierten Varianten wäre die maximal zulässige Radonquellstärke bei

$$Q_{\max} < 150 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{ h}} = 300 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \cdot (\lambda_{TL} = 0,5 \text{ h}^{-1}), \quad (46)$$

anzusiedeln, um den Referenzwert von 300 Bq/m^3 als Hausmittelwert nicht zu übertreffen. Die Etablierung dieses stark modifizierten BDT erfordert noch weiteren Untersuchungsbedarf, wobei die Installation einer zweckgerichteten Anordnung zur Realisierung und Überprüfung einer annähernd drucklos arbeitenden Lüftung für diejenigen Häuser ins Auge zu fassen ist, die über eine solche Anlage nicht verfügen.

Bei Anwendung solch einer modifizierten Untersuchungsmethode könnte nach relativ kurzer Messdauer festgestellt werden, ob z.B. bei einem fest vorgegebenen Luftwechsel von $\lambda_{TL} = 0,5h^{-1}$ für das gesamte Haus, die Radonkonzentrationen in allen Räumen den Referenzwert von 300 Bq/m^3 übertreffen. Ein solches Verfahren hätte den Vorteil, dass z.B. Vorschriften zur Einhaltung des Mindestluftwechsels in Häusern gleichzeitig mit überprüft werden könnten.

11 Quellstärkenbestimmung aus Radonlangzeitmessungen

Werden Langzeitmessungen zur Bestimmung der mittleren Radonkonzentration in den einzelnen Räumen eines Hauses durchgeführt, so liegt im Idealfall für jeden Raum ein Messwert der mittleren Radonkonzentration vor. Üblicherweise wird die Radonexposition über mehrere Wochen bis zu einigen Monaten mit integrierenden Messgeräten (Kernspurdetektoren) erfasst und ein integraler Wert über den gesamten Messzeitraum bestimmt, der auch die nutzungsfreien Zeiten einschließt. Mit der Studie zur Radonsituation in ausgewählten öffentlichen Gebäuden in Sachsen [53] wurde ein erster Schritt getan, in dem passiven Langzeitmessungen die Ergebnisse von aktiven Kurzzeitmessungen gegenübergestellt wurden (s.a. [54]).

Sind die Radonkonzentrationen in allen Räumen oder nur den vorbestimmten Aufenthaltsräumen kleiner als der Referenzwert von 300 Bq/m^3 , ist im Sinne der in Kapitel 2.2 aufgeführten Konkretisierungen zum Forschungsvorhaben das untersuchte Gebäude als "radondicht" bezeichnen. Sind die Bedingungen nicht erfüllt, ist das Gebäude als radonundicht zu charakterisieren. Ein Deduzieren der Radonquellstärke ist in dieser Situation gegenstandslos, da die alleinige Bestimmung der Langzeitmittelwerte der Radonkonzentrationen zu belastbaren Bewertungen der Radondichtheit führt.

Eine mehr oder minder belastbare Abschätzung der mittleren Radonquellstärke Q des Hauses ist nur dann möglich, wenn zumindest empirisch gewonnene Werte über den Luftwechsel vorliegen.

Ist die mittlere Radonkonzentration eines Hauses durch

$$C_{\text{Haus}}^{\text{Rn}} = \frac{\sum_i C_i \cdot V_i}{\sum_i V_i} . \quad (47)$$

definiert, wobei V_i und C_i die Raumvolumina und deren mittlere Radonkonzentrationen sind, resultiert eine mittlere Radonquellstärke Q_{Haus} für das Haus nach Gl. (13) in der Form

$$Q_{\text{Haus}} = (C_{\text{Haus}}^{\text{Rn}} - C_{\text{AL}}) \cdot \lambda_{\text{LW}} . \quad (48)$$

Eine ausreichend konservative Herangehensweise wäre, eine Luftwechselrate von $\lambda_{\text{LW}} = 0,5 \text{ h}^{-1}$ anzunehmen, so dass sich eine einfache Abschätzung für die Quellstärke eines Hauses aus den Ergebnissen der Langzeitmessungen mit

$$Q_{\text{Haus}} \approx \frac{1}{2} C_{\text{Haus}}^{\text{Rn}} \cdot \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{h}} \right] . \quad (49)$$

ergeben würde.

Die mittlere Radonkonzentration ist in Deutschland für Häuser nach [55] mit etwa 60 Bq/m^3 zu veranschlagen. Somit könnte man davon ausgehen, dass die mittlere Radonquellstärke der Häuser mit einer oberen Grenze von

$$Q_{\text{Haus}} < 30 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{h}} , \quad (50)$$

abgeschätzt werden könnte.

Ohne Ergebnisse von Langzeitmessungen der mittleren Luftwechselrate in Häusern kann diese grobe Abschätzung nicht weiter qualifiziert werden. Sie liegt somit etwa um den Faktor

5 niedriger als die maximal zulässige Radonquellstärke von $Q_{\text{max}} < 150 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{h}}$, die in Kapitel 10 in Zusammenhang mit dem zu unterschreitenden Referenzwert von 300 Bq/m^3 diskutiert wurde. In vielen neugebauten Häusern wäre demnach, eine mittlere Radonquellstärke

von $Q_{\text{Haus}} \approx 30 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{h}}$ ausreichend gering, damit auch bei einer niedrigen Luftwechselrate

von $\lambda_{\text{LW}} \approx 0,1 \text{ h}^{-1}$, die noch deutlich kleiner als die in Tabelle 1 aufgelisteten Mindestluft-

wechselraten ist, die mittlere Radonkonzentration, bezogen auf das gesamte Hausvolumen, den Referenzwert von 300 Bq/m^3 nicht übersteigt. Falls noch niedrigere Luftwechselraten ins Kalkül zu ziehen sind, müsste die Radondichtheit des Hauses entsprechend verbessert werden.

Insgesamt gesehen, sollten zur Beurteilung, bei welcher Radonquellstärke ein Gebäude als radondicht zu bewerten ist, grundsätzlich die vom Bauherrn vorgegebenen oder die aus den Bauunterlagen entnommene Angaben verwendet werden. Liegen solche Angaben nicht vor, könnte auch auf Regeln der Technik Bezug genommen werden. Bei Wohnräumen würde sich die aus dem für den Feuchteschutz erforderlichen Außenluftvolumenstrom abgeleitete Luftwechselraten im Bereich von $0,2 \text{ h}^{-1}$ (vgl. Angaben in Tabelle 2) als ein wichtiges Kriterium anbieten. Jedoch auch die EnEV [46] verlangt einen nicht näher benannten Mindestluftwechsel.

12 Zusammenfassung

Die Richtlinie 2013/59/EURATOM des Europäischen Rates [1] vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung wurde in dem neuen Strahlenschutzgesetz der Bundesrepublik Deutschland vom 3. Juli 2017 [2] umgesetzt. Nach § 124 des Gesetzes beträgt der Referenzwert für die über das Jahr gemittelte Radon-222-Aktivitätskonzentration in der Luft in Aufenthaltsräumen 300 Becquerel je Kubikmeter.

Ausgehend von der in der Leistungsbeschreibung zum Forschungsvorhaben "Qualifizierung der Luftdichtheitsmessung an Gebäuden zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude" formulierten Prämisse, dass die derzeit gebräuchliche Methode zur Bestimmung des Jahresmittelwertes der Radonkonzentration in Innenräumen mit integrierenden Messeinrichtungen über die Dauer von einem Jahr für eine Prüfung der Radondichtheit eines Gebäudes gegen den Baugrund ungeeignet ist, wurde die Entwicklung einer praxistauglichen Methode zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude und die Ableitung von Prüfwerten, die die Einhaltung des Referenzwertes für die Radonkonzentration in Innenräumen gewährleisten, in den Vordergrund gestellt. Dies bedeutet, dass neue Gebäude so zu errichten sind, dass der Referenzwert oder ein anderer mit dem Bauherrn vertraglich vereinbarter Jahresmittelwert der Radonkonzentration nicht überschritten werden sollte.

Die Einhaltung vertraglich gebundener oder behördlich geforderter bzw. nach dem Stand der Technik geschuldeter Eigenschaften neu errichteter Gebäude ist in der Regel bei Abnahme des Bauwerkes nachzuweisen. Die weit verbreitete, einfache und robuste Methode zur Bestimmung des Jahresmittelwertes der Radonkonzentration mit integrierenden Messeinrichtungen über die Dauer von einem Jahr, die in einem bereits genutzten Gebäude häufig angewendet wird, ist dafür jedoch ungeeignet.

In der Leistungsbeschreibung wurde auf ein in der Literatur beschriebenes, komplexes Verfahren, den Jahresmittelwert der Radonkonzentration mit Hilfe modifizierter (vor der Bauabnahme ohnehin durchzuführender) Gebäudedichtheits-Messungen mit Unterdruck zu bestimmen, hingewiesen. Diesbezüglich war zu ermitteln, mit Hilfe welcher zusätzlich zu berücksichtigender Parameter oder festzulegender Prüfwerte eine möglichst einfache, robuste Methode zur Prüfung auf ausreichende Radondichtheit neu errichteter Gebäude entwickelt werden kann. Darüber wurden auch alternative Methoden betrachtet, die eine Prüfung der Radondichtheit erdberührender Bauteile von neu errichteten Gebäuden vor der Bauabnahme ermöglichen.

Die Häuser sind nach entsprechenden Voruntersuchungen so ausgewählt worden, dass möglichst alle in der Praxis zu beachtenden Facetten einer Radondichtheitsprüfung erfasst wurden und gleichzeitig auch die Grenzen und Vorteile der Methoden ausgelotet werden konnten. Es wurden anhand von Untersuchungsergebnissen Vorschläge für eine Vorgehensweise zur Radondichtheitsuntersuchung von Häusern im Rahmen der Bauabnahme unterbreitet und einzeln bewertet.

Für die Definition der Radondichtheit eines Hauses spielt der dabei einzuhaltende Luftwechsel eine entscheidende Rolle. Grundlage für die Mindestluftwechselrate in Wohnräumen ist die DIN 1946 Teil 6 von 2009 [45], die aber bauaufsichtlich noch nicht durchgesetzt ist. Bei der planmäßig anzunehmenden Personenzahl je Nutzungsfläche sollte mindestens 30 m³/h Frischluftzufuhr pro Person als hygienische Mindestfrischluftzufuhr zur Verfügung stehen. Es ist somit von Nennlüftungen im Bereich von 0,5 h⁻¹ bei einer Wohnfläche 100 m² auszugehen.

Es gibt gegenwärtig auch noch keine Vorschriften, wie hoch bei einer mechanischen Lüftung die Unterdrücke zwischen den Innenräumen und der Hausaußenatmosphäre sein können. Im Sinne des Radonschutzes sollte die Belüftung weitestgehend drucklos geschehen, da anderenfalls möglicherweise einer unerwünschten zusätzlichen Radonintrusion aus der Bodenluft Vorschub geleistet werden könnte. Es ist im Ergebnis der Voruntersuchungen und anhand der ausgewählten Fallbeispiele belegt worden, dass die aus den unterschiedlichen BDT Untersuchungen folgenden Resultaten nur dann zu einer nachvollziehbaren und belastbaren Definition der Radondichtheit eines Hauses führen können, wenn eine Reihe von zusätzlichen Randbedingungen eingehalten wird.

In einem neu gebauten Haus, in dem der gewöhnliche BDT zur Luftdichtheitsprüfung erfolgreich absolviert wurde, ist der sogenannte "Normalzustand" in vielen Fällen durch sehr geringe Luftwechselraten von $\lambda_{LW} \approx 0,03 - 0,1 \text{ h}^{-1}$ charakterisiert. Die untersuchten Gebäudehüllen sind somit als "sehr luftdicht" zu bezeichnen. Damit in solch einem Haus bei einem so niedrigen Luftwechsel die Radonkonzentrationen in den einzelnen Aufenthaltsräumen einen Wert von 300 Bq/m³ im Langzeitmittel nicht übertreffen, sind entweder hohe Anforderungen an die Radondichtheit der Gebäudehülle zu stellen oder eine technische Lüftung zu installieren. Aber auch das Lüftungsverhalten der Bewohner (z.B. häufiges Querlüften, Ankippen der Fenster etc.) kann dazu führen, dass im Langzeitmittel Radonkonzentrationen von 300 Bq/m³ in Aufenthaltsräumen nicht übertroffen werden. Entsprechende Beispiele wurden detailliert untersucht.

In diesem Zusammenhang ist der Begriff Radonquellstärke zu klären. Die mittlere Radonquellstärke eines Hauses ist durch das Produkt von Bodenlufteintrittsrate und Radon-

aktivitätskonzentration im Baugrund bestimmt, wenn die Radonexhalation der Baumaterialien und die Radondiffusion aus dem Baugrund in das Gebäude außer Acht gelassen werden. Ist das Gebäude sehr dicht und wird beim Anlegen eines Unterdrucks immer proportional so viel radonhaltige Bodenluft wie atmosphärische Außenluft angesaugt, könnte die bei vergleichsweise hohen Unterdrücken bestimmte Radonquellstärke einfach auf die Situation "Normalzustand" zurückskaliert werden. Im Ergebnis der Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde jedoch gezeigt, dass diese Situation eher eine Ausnahme bildet. Die bei höheren Unterdrücken extrahierten Quellstärken sind durch die überproportional hohen Beimischungen von atmosphärischer Außenluft in der aus dem Haus abgesaugten Abluft so stark modifiziert, dass es nur mit großem zusätzlichem Messaufwand möglich ist, die Einflüsse der Radonintrusionsrate aus der Bodenluft von der der atmosphärischen Außenluft auf die Radoninnenraumluft als Funktion des angelegten Unterdrucks zu separieren. Es ist deshalb sachdienlich, die bei geringen Unterdrücken und bei geringen Luftwechselraten von $\lambda_{LW} \approx 0,03 - 0,1 \text{ h}^{-1}$ deduzierten Radoneintrittsraten als die faktischen Radonquellstärken eines Hauses zu bezeichnen.

Der Differenzdruck zwischen der Hausaußenatmosphäre und der des Hausinneren beträgt nach den Untersuchungsergebnissen im Mittel etwa 2 - 4 Pa, wobei in der Regel frische Außenluft um Größenordnungen stärker über Leckagen bzw. diverse Wegsamkeiten in der oberirdischen Gebäudehülle als über die Verbindungen zum Baugrund in das Haus nachströmt. Auch die Witterungsbedingungen (Wind, niedrigere Temperaturen im Winter) können saisonbedingt einen tageszeitlichen Einfluss auf die Radonsituation haben, der in Einzelfällen detailliert untersucht wurde.

In neugebauten Häusern wäre eine mittlere Radonquellstärke von

$$Q \approx 30 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{ h}}, \quad (51)$$

ausreichend gering, damit auch bei niedrigen Luftwechselraten im Bereich von

$$\lambda_{LW} \approx 0,1 \text{ h}^{-1} \quad (52)$$

die mittlere Radonkonzentration, bezogen auf das gesamte Hausvolumen, den Referenzwert von 300 Bq/m^3 nicht übersteigt. Falls noch niedrigere Luftwechselraten zu besorgen sind, müsste die Radonquellstärke entsprechend geringer sein.

Zur Beurteilung bei welcher Radonquellstärke ein Gebäude als radondicht zu bewerten ist, sind grundsätzlich die vom Bauherrn vorgegebenen oder die aus den Bauunterlagen ent-

nommene Angaben zum Luftwechsel zu verwenden. Liegen solche Angaben nicht vor, könnte auch auf Regeln der Technik Bezug genommen werden. Bei Wohnräumen würde sich die aus dem für den Feuchteschutz erforderlichen Außenluftvolumenstrom abgeleitete Luftwechselraten im Bereich von $0,2 \text{ h}^{-1}$ (vgl. Angaben in Tabelle 2) als ein wichtiges Kriterium für eine untere Grenze der Luftwechselrate anbieten.

Die Situation würde sich qualitativ ändern, wenn z.B. eine Mindestluftwechselrate von $\lambda_{\text{LW}} \approx 0,5 \text{ h}^{-1}$ einzuhalten wäre. Ist eine solche Luftwechselrate bauseitig zu erfüllen, könnte

bei Radonquellstärken des Hauses von $Q \approx 150 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{ h}} \right]$ der Referenzwert von 300 Bq/m^3

immer noch eingehalten werden. Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass in solch einem Fall die erhöhten Radonquellstärken bereits durch erhöhte, der Radonintrusion aus dem Baugrund Vorschub leistende Baumängel, verursacht werden. Das Aufspüren von Baumängeln ist jedoch nicht das Ziel der nach Bauabschluss vorzunehmenden Radondichtheitsprüfung.

Im Rahmen einer gewöhnlichen Luftdichtheitsprüfung gemäß der EnEV 2013 [46] können solche "radonspezifischen Baumängel" nicht aufgespürt werden. Bei dem etablierten BDT zur Bestimmung der Luftdichtigkeit eines Hauses spielt die Radonintrusion über die angesaugte Bodenluft keine Rolle. Wenige m^3/h angesaugter Bodenluft sind im Vergleich zu mehreren hundert m^3/h angesaugter Außenluft über existierende Gebäudeleckagen völlig vernachlässigbar.

Bei der Ausführung des ursprünglichen BDT zur Luftdichtigkeit eines Gebäudes wird immer eine instantane (sofortige) Reaktion von Systemvariablen (z.B. Volumenströme) auf eine Druckänderung registriert, wobei alle Räume des Hauses involviert sind. Deshalb dauert der Test nur wenige Minuten, um die Luftdichtheit der Gebäudehülle zu quantifizieren. Die zeitliche Änderung der Radoncharakteristiken ist dagegen ein deutlich langsamerer Prozess, der von der Lage und der Art der Radonquelle, dem Intrusionsverhalten des Radons aus dem Baugrund in das Haus und vor allem auch von dem Grad der Vermischung sowie dem Radontransport innerhalb des Hauses im starken Maße abhängt.

Im Ergebnis eines einfachen BDT steht letztlich nur eine einzige Systemvariable, die durch das Produkt der Radonkonzentration in der abgesaugten Innenraumluft (Abluft) und der abgesaugten Luftmenge gebildet wird, zur Charakterisierung der Radondichtheit zur Verfügung. Ob dieser Variable der Terminus "Radonquellstärke des Hauses" bei fixiertem Unterdruck zugewiesen kann, hängt von einer Reihe von Randbedingungen ab. Die Prognostizierung der aus solch einfachen BD Messungen gewonnenen Informationen auf die der einzelnen Räume ist nur mit Hilfe einer sehr konservativen Bewertung zu begegnen.

Im Ergebnis der Untersuchungen zum Forschungsvorhaben 3616S12241 bilden die nachfolgend aufgelisteten Punkte ein abschließendes Fazit.

- Die übliche BD Methode, entwickelt zur Luftdichtheitsprüfung von Häusern ist ohne spezielle Modifikationen nicht für eine Radondichtheitsprüfung im Rahmen der Bauabnahme geeignet.
- Die Messzeiten müssen für jede Druckstufe ausreichend lange gewählt werden, um wenigstens den Anstieg und daraus die Eintrittsrate der Radonkonzentration bzw. die Radonquellstärke des Hauses nach Durchlüftung mit ausreichender Genauigkeit bestimmen zu können. Ob die im Abstrom gemessenen Radonkonzentrationen tatsächlich einen für das gesamte Haus zu berücksichtigender Wert ist, kann nur anhand von zusätzlichen Messungen ergründet werden.
- Die zeitliche Verfolgung des Verlaufes des Anstieges der Radonkonzentration erfordert eine längere Messdauer. Sie bietet aber den Vorteil einer Ableitung der Luftwechselrate für eine gewählte Unterdruckstufe und die Kontrolle der Stabilität der Randbedingungen während des Absaugversuchs.
- Bereits bei geringfügig erhöhten Unterdrücken wird die aus der Bodenluft in das Gebäude eintretende Radonmenge durch die in die Häuser eintretenden atmosphärischen Luftmengen stark verdünnt, d.h. in Gebäuden mit guter Abdichtung der erdbeberührenden Bauteile ist der Volumenstrom eintretender Bodenluft klein gegenüber dem Volumenstrom der Außenluft.
- Mit der BD Methode können ohne zusätzlichen messtechnischen Aufwand keine Informationen über die Radonausbreitung im Gebäude und somit auch für die Quellstärken der Einzelräume, insbesondere der Aufenthaltsräume getroffen werden.
- Die BD Methode ist jedoch für Gebäude mit unzureichender Abdichtung der erdbeberührenden Bauteile 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 sie Möglichkeiten für eine qualifizierte Auswahl und Planung geeigneter Sanierungsmaßnahmen. Sie ist jedoch nicht unbedingt als Vorzugsvariante zu betrachten, da Vorinformationen über die Radonsituation im Haus und adäquate Messungen in allen relevanten Räumen des zu untersuchenden Hauses erforderlich sind.
- Der Einsatz der BD Methode stößt bei guter Abdichtung sowie kleinen n_{50} -Werten der Gebäude an Grenzen (hohe Messunsicherheiten, sehr lange Messzeiten).

- Für den Einsatz der BD Methode zur Prüfung neuer Gebäude sind deshalb weitere Modifikationen (Einschränkung des untersuchten Volumens auf den Bereich mit Erdberührung oder Untersuchung mehrerer Teilbereiche) ins Auge zu fassen und überdies Vorinformationen über die Radonsituation im Haus zu beschaffen sowie Messungen in den relevanten Räumen erforderlich.
- Für die Beurteilung der Radondichtheit des Gebäudes sind Annahmen über die lufttechnische Kopplung der nicht untersuchten Bereiche/Räume an den Bereich mit Erdberührung erforderlich. Das Problem besteht auch bei einer Absaugung aus dem Gesamtgebäude, da ein Unterdrucktest nicht die Strömungsverhältnisse bei normaler Nutzung repräsentiert.
- Können aus anderen Informationen keine plausiblen Annahmen abgeleitet werden, ist zumindest eine konservative Abschätzung für jeden Aufenthaltsraum möglich. Dabei könnte z. B. angenommen werden, dass die eintretende Radonmenge vollständig in den jeweils betrachteten Raum eintritt und die sich daraus ergebende Radonkonzentration mit dem für diesen Raum geplanten Luftwechsel berechnet wird. Dieser konservative Ansatz führt jedoch zu extrem hohen Forderungen bezüglich der Quellstärke.
- Wird im Zuge einer BD Messung nur die Quellstärke Q als einziger Parameter bestimmt, ist das Haus eine "Blackbox". Eine Frage nach "radondicht" ist eine Herausforderung, die u.E. nur mit Hilfe eines extrem konservativen Szenarios zu begegnen ist.
- Bezogen auf das gesamte Hausvolumen sollte die Quellstärke $Q < 150 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \text{ h})$ sein, um bei einem Luftwechsel von $0,5/\text{h}$ im Mittel den Referenzwert von $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$ in den Aufenthaltsräumen nicht zu übersteigen. Falls niedrigere Luftwechselraten zu besorgen sind, muss die Radonquellstärke entsprechend geringer sein.
- Nach einem extrem konservativen Prinzip muss jedoch eine um den Faktor 3 - 10 niedrigere Radonquellstärke ins Kalkül gezogen werden, um sicher auszuschließen, dass in einem einzelnen Raum, in den das Radon vorwiegend eintritt, die sich entwickelnde Radonkonzentration den Referenzwert von $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$ im Mittel nicht übertrifft.
- Die Einführung von Tests zur Radondichtheit eines Gebäudes erfordert zwingend, die Luftwechselrate zur Außenluft als Parameter einzubinden und Vorgaben zu ihrer Größe festzulegen, um Schlussfolgerungen auf einen zu erwartenden Jahresmittelwert der Aktivitätskonzentration von Radon ableiten zu können.

Zusammenfassend ist zu bemerken, dass die Aufgabenstellung der Studie vor allem darin bestand, ein Verfahren zu entwickeln, um die Radondichtheit von neuen Gebäuden im Rahmen der Bauabnahme prüfen zu können. Als Kriterium war der Jahresmittelwert (Referenzwert) von 300 Bq/m^3 zu betrachten. In Auswertung der durchgeführten Untersuchungen einschließlich der Interpretation der Ergebnisse wurde belegt, dass die mittlere Jahreskonzentration in komplexer Weise von unterschiedlichen Einflussparametern abhängt, jedoch die Definition der Radondichtheit eines Hauses nur unter Berücksichtigung von stringenten Randbedingungen zu erreichen ist. Aus unserer Sicht ist es deshalb für die weitere praktische Arbeit zwingend erforderlich, die Randbedingungen, die bei einer Prüfung auf Radondichtheit einzuhalten sind, so eindeutig festzulegen, dass der Begriff "Radondicht" als eine eindeutige Aussage ableitbar ist. Eine Schlüsselgröße spielt hierbei die Randbedingung von welcher Luftwechselrate auszugehen ist und ob in einem Haus, das offensichtlich Baumängel hinsichtlich einer Prävention der Intrusion von radonhaltiger Bodenluft aufweist, durch einen angepassten erhöhten Luftwechsel die Radonkonzentration in Aufenthaltsräumen unterhalb des Referenzwerts von 300 Bq/m^3 abgesenkt werden kann.

13 Literaturverzeichnis

- [1] Richtlinie 2013/59/EURATOM des Europäischen Rates vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung
- [2] Gesetz zur Neuordnung des Rechts zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (StrlSchG), Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 42, ausgegeben zu Bonn am 3. Juli 2017
- [3] Bundesamt für Strahlenschutz: Qualifizierung der Luftdichtheitsmessung an Gebäuden zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude, Leistungsbeschreibung, FKZ: 3616S12241, 26.01.16.
- [4] B. Collignan, E. Powaga, Procedure for the characterization of radon potential in existing dwellings and to assess the annual average indoor radon concentration, Journal of Environmental Radioactivity 137 (2014) 64-70
- [5] Nazaroff, W.W., A.V. Nero: Radon and its Decay Products in Indoor Air, Wiley & Sons, Oxford, 1988
- [6] Jacobi, W.: Possible lung cancer risk from indoor exposure to radon daughters. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 7, S. 395-401, 1984
- [7] Porstendörfer, J.: Properties and Behaviour of Radon and Thoron and Their Decay Products in the Air., J. Aerosol Sci Vol. 25, No. 2, S. 219-263, 1994
- [8] Keller, G., Schütz, M.: Radonsanierung in Häusern, Publikationsreihe Fortschritte im Strahlenschutz, Umweltradioaktivität, Radioökologie, Strahlenwirkung, Band 1, S. 119-124, 1993
- [9] Löbner, W., H. Schulz: Wie und warum gelangt Radon in ein Haus? 1. Tagung Radonsicheres Bauen, HTW Dresden, 28.09.2005
- [10] Löbner, W.: Luftaustausch in Gebäuden – Bestimmung der Luftwechselrate in Räumen, 2. Tagung Radonsicheres Bauen, Dresden, 27.09.2006, S. 77ff.
- [11] Berge, A.: Analysis of Methods to Calculate Air Infiltration for Use in Energy Calculations, Master of Science Thesis in the Master's Programme Structural Engineering and Building Performance Design, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Sweden, 2011
- [12] Font, L.G. Radon Generation, entry and accumulation indoors, PhD thesis, University of Barcelona, Spain, 1997
- [13] Ringer, W.: Determination of the Radon Potential of a Building by a Controlled Depressurization Technique, Ph.D. thesis, Institute of Technical Physics, Faculty of Science, Technical University of Graz, Austria, March 2001

- [14] Vasilyev, A., I. Yarmoshenko, M. Zhukovsky: Measurement strategy to study radon source, entry and dilution rates in energy-efficient buildings in Russia, Institute of Industrial Ecology UB RAS, Yekaterinburg, Russia, ICSC 2016, ES Web of Conferences , 02002 (2016)
- [15] Schulz, H., E. Hermann, K. Flesch, R. Baumert, S. Jobski: Erarbeitung fachlicher Grundlagen für die Entwicklung zeit- und kosteneffektiver Verfahren zur Bestimmung von Strahlenexpositionen durch Radon in Wohnungen, BfS, St.Sch. 3607S04534, 2009
- [16] Ji Hyun Park, Dae Ryong Kang, Jinheum Kim: A review on mathematical models for estimating indoor radon concentrations, Annals of Occupational and Environmental Medicine (2016) 28:7
- [17] Ringer, W., J. Gräser: Deliverable 13/5 Measurement and Analysis of Radon in Low Energy and Passive Houses in Austria, RADPAR, WP6, RADPAR WP 6.1.2.3,D13/5, AGES, 2012.
- [18] Fronka,A., L. Moucka: Blower Door Method in Radon Diagnostics, Proc. 4th European Conf. on Protection against Radon at home and at work, Prag, 28 Jun - 2 Jul 2004; ISBN 80-01-03009-1 und Froňka, A., & Moučka, L. (2005), Blower door method and measurement technology in radon diagnosis. Internationál Cirgrni, Series, HLNRRRA. Radiation Dose and Health Effects, 6,10, September 2001, Elsevier, B.V., 1 276, 377-378.
- [19] Neznal M., Neznal M., Jiránek M., Froňka A.: Failure of Preventive Measures against Radon in a New Built Family House – a Case Study. In: Proceedings of Full Papers CD-Rom from the 2nd European IRPA Congress on Radiation Protection. Paris (2006).
- [20] Froňka, A. , L. Moučka: Complex System of Radon Diagnosis Methods an SPECIFIC Experimental and Theoretical Procedures Applied in the Indoor Building Environment, Proceedings of the American Association of Radon Scientists and Technologists 2008 International Symposium Las Vegas NV, September 14-17, 2008. AARST © 2008.
- [21] A. Froňka, K. Jílek, J. Hradecký, M. Jiránek, RADON v.o.s.: Radon Diagnosis Procedures Focused on Energy Efficient Buildings, 12th International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping, Prague, September 2014.
- [22] Collignan, B., C. Lorkowskia, R. Améon: Development of a methodology to characterize radon entry in dwellings, Building and Environment, Volume 57, November 2012, Pages 176–183.
- [23] Collignan B, Powaga E: Procedure for the characterization of radon potential in existing dwellings and to assess the annual average indoor radon concentration. J. Environ Radioact. 2014 Nov;137:64-70.
- [24] Améon R., O. Diez, M. Dupuis, A. Merle-Szeremeta: RADON IN BUILDINGS : INSTRUMENTATION OF AN EXPERIMENTAL HOUSE, Rapport IRSN

- [25] Collignan, B.: French experience in management and research on the protection of building with respect to radon, Radon Protection Conference, Dresden, 2nd and 3rd of December, 2013.
- [26] Model Standards and Techniques for Control of Radon in New Residential Buildings, U.S. Environmental Protection Agency, Air and Radiation (6604-J, EPA 402-R-94-009, March 1994.
- [27] The National Radon Action Plan A STRATEGY for SAVING LIVES (U.S.): Developed Through the Collaborative Efforts of: American Lung Association, American Association of Radon Scientists and Technologists, American Society of Home Inspectors, Cancer Survivors Against Radon, Children's Environmental Health Network, Citizens for Radioactive Radon Reduction, Conference of Radiation Control Program Directors, Environmental Law Institute, National Center for Healthy Housing, U.S. Environmental Protection Agency, U.S. Department of Health and Human Services, U.S. Department of Housing and Urban Development, 2015, www.epa.gov/radon/agency.html.
- [28] Radon Resistant New Construction (RRNC), <http://www.epa.gov/radon/building-codes-radon-resistant-new-construction>.
- [29] R. Chan, J. Joh, M. H. Sherman: Analysis of air leakage measurements of US houses, *Energy and Buildings* 66 (2013) 616–625.
- [30] Persily, A., L. NG: Indoor air quality specifications for net zero energy research home, *REHVA Journal*, May 2014, p. 69. www.rehva.eu
- [31] Innovative Vapor Intrusion Site Characterization Methods, NAVFAC, Feb. 2013 und Vapor Intrusion Handbook (2009), U.S. DoD, 2009.
- [32] McHugh T.E., Beckley, L., Bailey D., Gorder K., Dettenmaier E., Rivera-Duarte I., Brock S., MacGregor I.C.: Evaluation of vapor intrusion using controlled building pressure, *Environ Sci. Technol.* 2012 May 1;46(9):4792-9.
- [33] Holton C., Guo Y., Luo H., Dahlen P., Gorder K., Dettenmaier E., Johnson P.C.: Long-term evaluation of the controlled pressure method for assessment of the vapor intrusion pathway, *Environ Sci. Technol.* 2015 Feb 17;49(4): 2091-8.
- [34] I. MacGregor, M. Prier, D. Rhoda, and A. Dindal (Battelle) and J. McKernan(EPA): Environmental Technology Verification Report: VERIFICATION OF BUILDING PRESSURE CONTROL AS CONDUCTED BY GSI ENVIRONMENTAL, INC. FOR THE ASSESSMENT OF VAPOR INTRUSION, U.S. EPA, Dec. 2011.
- [35] Teichman, K., C. Howard-Reed. A. Persily S. Emmerich: Characterizing Indoor Air Quality Performance Using a Graphical Approach, NIST Technical Note 1868, March 2016.
- [36] ПРАВИТЕЛЬСТВО МОСКВЫ МОСКОМАРХИТЕКТУРА ПОСОБИЕ к МГСН 2.02-97 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТИВОРАДОНОВОЙ ЗАЩИТЫ ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ, Moskau 1997.
-

- [37] Vasilyev, A., M. Zhukovsky: Measurements of Radon Entry Parameters in the Buildings, IRPA 2010, P10.73.
- [38] A. Vasilyev, I. Yarmoshenko, M. Zhukovsky: Measurement strategy to study radon source, entry and dilution rates in energy-efficient buildings in Russia, ICSC 2016, E S Web of Conferences , 02002 (2016).
- [39] Breckow, J., A.-L. Grund: Untersuchung des Einflusses baulicher Energiesparmaßnahmen auf die Radonkonzentration in Innenräumen, Projekt: BfS 3611 S 10016 Los 2, Abschlussbericht, Giessen, 31.03.2015.
- [40] Geringswald, K., W. Löbner, F. Leichsenring, G. Eißmann: Charakterisierung der Radonsituation und Massnahmen zur Situationsverbesserung in einem Beruflichen Bildungszentrum – Ein Fallbeispiel, Tagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Borkum, 2010.
- [41] Geringswald, K., W. Löbner, C. Schramm, M. Förster, H. Räder, E. Sternkopf: Radonsanierung an einem Altbau als Ergebnis einer komplexen Ursachenaufklärung, 7. Sächsischer Radontag, Dresden, 2013.
- [42] Präsentation zum Arbeitspaket AP2 im Rahmen des Vorhabens „Qualifizierung der Luftdichtheitsmessung an Gebäuden zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude“ (BfS AG-R-08313/3616S12241), 9.11.2016 BfS Berlin
- [43] Protokoll zum Arbeitspaket AP2 zum Vorhabens „Qualifizierung der Luftdichtheitsmessung an Gebäuden zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude“ (BfS AG-R-08313/3616S12241), 2.12.2016
- [44] Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden Differenzdruckverfahren (ISO 9972:1996, modifiziert) Deutsche Fassung EN 13829:2000
- [45] DIN 1946 Teil 6 von 2009, s.a. <http://www.wohnungslueftung-ev.de/faq-normen/faq-din-1946-6.html>
- [46] Die Bundesregierung hat die Novelle zur Energieeinsparverordnung (EnEV) unter Einbeziehung der vom Bundesrat gewünschten Änderungen am 16.10.2013 beschlossen. Auf Grund der Verkündung der Zweiten Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18.11.2013 im Bundesgesetzblatt (BGBl. I, Nr. 67, vom 21. November 2013, S. 3951) trat die neue Verordnung nach einer Übergangsfrist zum 1. Mai 2014 in Kraft.
- [47] H. Schulz, Modellierung der Radonkonzentrationsentwicklung in einem Haus als Multi-Kompartiment-Problem, IAF - Radioökologie GmbH, Interne Berichte seit 1995
- [48] DIN EN ISO 9972:2015, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren (ISO 9972:2015); Deutsche Fassung EN IOS 9972:2015; DIN-Normausschuss Bauwesen (NABau)

- [49] Vorhaben StSch 4534 "Erarbeitung fachlicher Grundlagen für die Entwicklung zeit- und kosteneffektiver Verfahren zur Bestimmung von Strahlenexpositionen durch Radon in Wohnungen, IAF - Radioökologie GmbH und B.P.S. Engineering GmbH im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz, 15.11.2009
- [50] R. Baumert, E. Hermann, H. Schulz "Neubau - Prüfung der Radondichtheit mittels Luftdichtheitsmessung", Radonfachgespräch 26. - 27. April 2018, Berlin
- [51] Verfahren zur Bestimmung der Radonquellstärke in Gebäuden, T. Kuske, Radonfachgespräch 26. - 27. April 2018, Berlin
- [52] T. Haumann, Radonmessungen und Blower Door - Fallbeispiele aus Bestandsgebäuden, 2. Radonfachtag des VDB, 4. Mai 2017, München
- [53] Flesch, K., Hermann, E., Jobski, S., Leißring, B., Löbner, W., Schulz, H.: Radon in öffentlichen Gebäuden, im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie erstellt, Dresden, 01.10.2008
- [54] H. Schulz, A. Sperrhacke, Radon in öffentlichen Gebäuden, Strahlenschutzpraxis, Heft 4, 2009
- [55] Bundesamt für Strahlenschutz,
http://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/gebaeude/gebaeude_node.html