

Abschlussbericht

Untersuchung des Einflusses baulicher Energiesparmaßnahmen auf die Radonkonzentration in Innenräumen

31.03.2015

Projekt:

BfS 3611 S 10016 Los 2

Durchführende Organisation:

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

Projektleitung:

Prof. Dr. Joachim Breckow

Berichterstellung:

Anna-Lisa Grund

Projektzeitraum:

1.01.2012-1.04.2015

Kooperationspartner:

Firma UBERA, Institut für Umweltstudien und -beratung

*Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers
(Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.*

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	5
Projektziel	6
Arbeitspaket 1: Theoretischer Hintergrund	7
Physikalische Grundlagen.....	7
Gesetzliche Grundlagen.....	8
Einflussfaktoren auf die Radonausbreitung.....	9
Luftwechselrate	9
Nutzerverhalten	9
Luftdruck.....	10
Untergrund und Bausubstanz.....	12
Wirkung der Renovierungsmaßnahmen.....	13
Außen- bzw. Innenwanddämmung	13
Dämmen der Dachkonstruktion	14
Dämmung der Keller- bzw. Geschossdecken.....	14
Erneuerung von Fenstern und Türen.....	14
Heizung	15
Messtechnik.....	16
Angewandte Methoden zur Bestimmung der Radonkonzentration.....	16
Radonmessgeräte	18
Methoden der energetischen Sanierung von Gebäuden.....	25
Einleitung und gesetzliche Vorgaben	25
Energieeinsparverordnung (EnEV).....	25
Relevante DIN-Normen	27
Energiebilanzierung von Gebäuden.....	27
Maßnahmen bei der energetischen Sanierung von Wohngebäuden	28
Maßnahmen zur Verringerung von Verlusten durch Transmission.....	29
Maßnahmen zur Verringerung von Lüftungsverlusten.....	43
Dichtheit der Gebäudehülle	47
Arbeitspaket 2, Teil 1: Vorstellung der Messobjekte.....	51

Messobjekt 1	51
Messobjekt 2	53
Messobjekt 3	55
Messobjekt 4	57
Messobjekt 5	59
Arbeitspaket 2, Teil 2: Methode	62
Gebäudeacquisition	62
Vorgehen bei den Messungen von Radon und zugehörigen Parametern.....	63
Erfassung von Gebäudeparametern.....	63
Radonmessungen	64
Messung meteorologischer Daten	64
Erfassung der Raumnutzung	64
Dichtemessungen an Gebäuden.....	65
Arbeitspaket 3: Vorgehen bei der Auswertung	67
Einflussfaktoren auf die Radonkonzentration.....	67
Ermittlung der Luftwechselrate.....	68
Bestimmung der Radonquellstärke	70
Quellstärkenberechnung über Aufbaukurve nach Durchlüftung	70
Quellstärkenberechnung über Dichtheitsmessung	72
Quellstärkenermittlung über die ermittelten Luftwechselraten	74
Filterung.....	75
Anwendung auf Gebäude	77
Vorgehensweise.....	77
Anwendungsbeispiel 1: Mittlere Tagesgänge	79
Anwendungsbeispiel 2: Langzeitverlauf	81
Untersuchung der Radonausbreitung	83
Arbeitspaket 4: Auswertung und Ergebnisse	84
Mittlere Radonkonzentrationen - Vergleich zwischen vorher und nachher.....	84
Messobjekt 1	84
Messobjekt 2	90
Messobjekt 3	97

Messobjekt 4	105
<i>Messobjekt 5</i>	108
Einflussfaktor Temperatur	114
Einflussfaktor Luftdruck	121
Einflussfaktor Wind	124
Einflussfaktor relative Luftfeuchtigkeit	126
Raumnutzung	128
Luftwechsel	131
Radonquellstärke	133
Radonausbreitung	135
Messobjekt 1	136
Messobjekt 2	137
Messobjekt 3	138
Messobjekt 4	139
Messobjekt 5	141
Unterdruck-Messungen	142
Messobjekt 1	142
Messobjekt 2	145
Messobjekt 3	148
Messobjekt 4	152
Messobjekt 5	155
Lineares Modell	159
Fazit und abschließende Betrachtung	161
Zusammenfassung	162
Quellenangabe	164
Anhang	166
Anhang 1: Zuordnung der Messobjekte	166
Anhang 2: Glossar	167
Anhang 3: Korrelationskoeffizienten der einzelnen Messobjekte	170

Einleitung

Radon-222 ist ein radioaktives Edelgas. Als Tochternuklid des natürlich im Gestein vorkommenden Uran-238 gelangt es durch das Erdreich an die Oberfläche. Dort kann es über Undichtigkeiten der erdberührenden Gebäudebereiche in ein Haus gelangen und sich dort anreichern. Wie hoch die Radonkonzentration in einem Gebäude ist, hängt von mehreren Faktoren ab. Die Geologie des Untergrundes bestimmt den Urangehalt, aus dem das Radon stammt. Ist viel Uran im Boden, so ist die Radonkonzentration der Bodenluft ebenfalls erhöht. Auch die Beschaffenheit des Hauses hat einen großen Einfluss darauf, wieviel Radon in das Haus gelangen kann. Durch Öffnungen im Gestein, z.B. von Kabeldurchführungen, kann das Radon in das Gebäude eindringen. Dies ist insbesondere bei alten Häusern der Fall. Der Luftwechsel bestimmt, inwieweit sich das Radon im Gebäude anreichern kann. Besteht ein hoher Luftwechsel, beispielsweise durch undichte Fenster, so reichert sich weniger Radon an.

Als Edelgas gelangt das vorhandene Radon bei der Atmung in die Lunge. Zerfällt es, so verbleiben die radioaktiven Tochternuklide des Radons als Feststoffe in der Lunge. Dort zerfallen diese weiter und senden dabei Alpha-Strahlung aus, was die Lunge schädigt und Lungenkrebs verursachen kann.

Hervorgerufen durch die sinnvollen Maßnahmen der Energieeinsparverordnung (EnEV) werden Wohnhäuser saniert. Dies kann häufig eine dichtere Gebäudehülle mit sich bringen. Dadurch wird die Luftwechselrate herabgesetzt, wodurch nicht auszuschließen ist, dass sich die Radonkonzentration im Gebäude erhöht.

Projektziel

Das Ziel des Projektes „Untersuchung des Einflusses baulicher Energiesparmaßnahmen auf die Radonkonzentration in Innenräumen“ ist, zu beurteilen, welche Maßnahmen der energetischen Sanierung die Radonkonzentration in Wohnräumen beeinflussen.

Die Zeitreihen der Messobjekte vor und nach ihrer Sanierung werden in Bezug auf die Radonkonzentration vorgestellt und verglichen. Die Einflussfaktoren, die für die Radonkonzentration und Radonausbreitung relevant sind, werden ermittelt und im Hinblick auf ihre Relevanz bezüglich der Sanierung eines Wohnhauses untersucht.

Ziel des Projekts ist nicht eine flächendeckende Auswahl an Häusern zur Bestimmung der Abhängigkeiten der Radonkonzentration von weiteren Parametern. Vielmehr soll an wenigen ausgewählten Häusern untersucht werden, ob die energetische Sanierung die Radonkonzentration in Wohnräumen erhöht und welche Bedeutung die verschiedenen Sanierungsmaßnahmen haben. Zudem soll untersucht werden, wie ein mögliches Ansteigen der Radonkonzentration vermieden werden kann.

Arbeitspaket 1: Theoretischer Hintergrund

Physikalische Grundlagen

Radon-222 ist ein natürlich vorkommendes Edelgas, das aus der Uran-238 Zerfallsreihe (Abbildung 1) durch Alpha-Zerfall von Radium-226 entsteht.

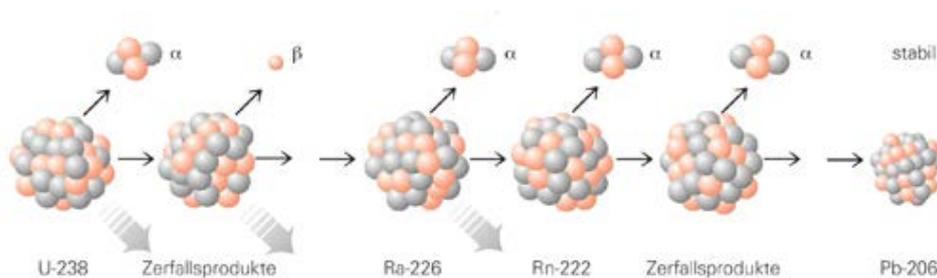


Abbildung 1: Uran-238 Zerfallsreihe

(Quelle: <http://energy.juniorwebaward.ch/images/stories/natrlche%20zerfallsreihe%20von%20uran%20238%20klein.jpg> Zugriff am 4.7.2012)

Bei der Verwendung des Begriffs „Radon“ ist das Isotop Radon-222 gemeint, da es mit seiner Halbwertszeit von 3,8 Tagen die längste der Radon-Zerfallsprodukte hat und damit die Hauptkomponente des sich ausbreitenden radonhaltigen Gases ist. Ein weiteres Isotop ist Radon-220, das auch Thoron genannt wird und mit einer Halbwertszeit von 55 s deutlich kurzlebiger ist. Das dritte Isotop ist Radon-219. Es wird Actinon genannt und hat eine Halbwertszeit von 4 s. Es ist eher selten und trägt von daher nur zu einem sehr geringen Teil zur Radonkonzentration bei. Es gibt weitere Isotope des Radons, die aber so selten bzw. kurzlebig sind, dass sie in Gebäuden keine Rolle spielen.

Als Edelgas ist Radon nicht reaktiv und gelangt aus dem Baugrund durch den Keller in die Wohnräume (Abbildung 2).

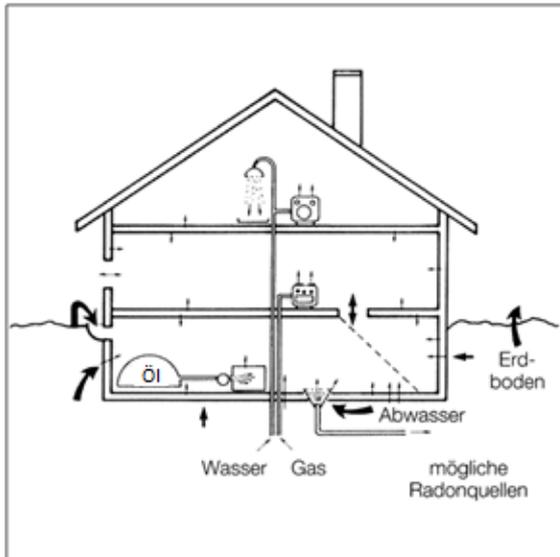


Abbildung 2 Radon-Eintrittspfade (Quelle: <http://www.klb-klimaleichtblock.de/uploads/pics/Radon.png>; Zugriff am 3.7.2012; bearbeitet)

Von dort verbreitet es sich durch Diffusion und/oder Konvektion aufgrund von Druckunterschieden. Das Radon wird inhaliert und zerfällt in der Lunge durch Alpha-Zerfall in Polonium-218. Das prozentuale Risiko, an Lungenkrebs zu erkranken, nimmt durch eine höhere Radoninnenraumkonzentration um 10 - 16 % pro 100 Bq/m³ in der Innenraumluft zu^{1,2}.

Gesetzliche Grundlagen

Zurzeit gibt es noch keinen Grenzwert, der in privaten Wohnhäusern eingehalten werden muss. Für berufsbedingt durch Radon strahlenexponierte Personen (Beschäftigte in Trinkwassergewinnungsanlagen, Bergwerken und Radonheilbädern) besteht ein Dosisgrenzwert von 20 mSv pro Jahr, der über einen gemittelten Zeitraum von 5 Jahren nicht überschritten werden darf. Für die allgemeine Bevölkerung, auch Berufstätige, die an ihrem Arbeitsplatz einer erhöhten Strahlenbelastung ausgesetzt sind, ohne zu der Gruppe der beruflich strahlenexponierten Personen zu gehören (z.B. ein Anwalt in einem Büro mit erhöhter Radonkonzentration), besteht ein solcher Grenzwert nicht.

Während der Projektlaufzeit wurde von dem Rat der Europäischen Union die Richtlinie 2013/59/EURATOM verabschiedet. In dieser wird unter anderem ein Richtwert von 300 Bq/m³ festgelegt, den die Radonkonzentration nicht überschreiten darf. Die Richtlinie muss bis zum 08.02.2018 in nationales Recht umgesetzt werden.

Einflussfaktoren auf die Radonausbreitung

Luftwechselrate

Zahlreiche Studien weisen auf den großen Einfluss der Luftwechselrate (siehe „Methoden der energetischen Sanierung von Gebäuden“) in Bezug auf die Radonkonzentration in Wohnungen hin. Die Luftwechselrate wird sowohl von den baulichen Gegebenheiten als auch vom Nutzerverhalten stark beeinflusst. Lücken und Ritzen in der Gebäudehülle sind die häufigsten Ursachen für einen hohen Luftwechsel im Gebäude und sorgen damit für eine geringe Radonkonzentration³. Im Zuge der energetischen Sanierung müssen diese Lücken geschlossen werden, um Energieverluste zu vermeiden. Der Luftaustausch muss nun durch manuelles Lüften oder eine Lüftungsanlage sichergestellt werden. Hermann⁴ sowie Paul⁵ weisen darauf hin, dass bei Niedrigenergiehäusern eine Lüftungsanlage notwendig ist, um die erforderliche Luftwechselrate, die mindestens bei 0,5/h liegen sollte, aufrecht zu erhalten. Insbesondere in Passivhäusern, bei denen der natürliche Luftaustausch zwischen Gebäudeinnerem und -äußerem auf ein Minimum reduziert wird (der Luftaustausch soll laut EnEV <1,5/h sein), ist eine Lüftungsanlage notwendig⁶. Dies folgt auch aus der Tatsache, dass der tatsächlich ermittelte Luftaustausch nur bei 0,2/h bis 0,3/h, bei modernisierten Häusern sogar bei 0,1/h bis 0,15/h liegt⁷. Da insbesondere in der Nacht kein, von DIN 4108-2 geforderter, Luftwechsel von 0,5/h gewährleistet werden kann, ist ein Anstieg der Radonkonzentration wahrscheinlich.

Nutzerverhalten

Sofern keine Lüftungsanlage vorhanden ist, nimmt das Nutzerverhalten der Bewohner einen direkten Einfluss auf die Luftwechselrate und damit auf die Radonkonzentration in den Wohnräumen. Studien haben gezeigt, dass die Radonkonzentration einen konstanten Verlauf zeigt, sofern die Räume über längere Zeit nicht genutzt werden und keine Änderungen in Bezug auf Temperatur und Luftdruck auftreten⁸. Das liegt an dem sich einstellenden Fließgleichgewicht zwischen neu auftretendem Radon aus dem Untergrund und dem konstanten Austausch mit der Außenluft bei geschlossenen Fenstern und gleichbleibenden Witterungsbedingungen. Der Verlauf der Radonkonzentration passt sich bei regelmäßiger Stoßlüftung der Außenkonzentration des Radons, die sehr gering ist, an⁹.

Das Lüftungsverhalten der Bewohner ist stark von äußeren Faktoren, wie beispielsweise Lärmbelästigung und Außentemperatur, abhängig. So haben Studien gezeigt, dass bei kühlen Außentemperaturen das Lüftungsverhalten deutlich abnimmt¹⁰.

Relevant ist ebenfalls, ob die Türen der Räume, insbesondere zum Keller, dicht bzw. stets geschlossen sind. Eine verschlossene Tür zu den Kellerräumen kann die Radonkonzentrationen in den Wohnräumen deutlich verringern.

Auch F. Marley¹¹ hat den dominierenden Faktor des Nutzerverhaltens in Bezug auf die Radonkonzentration in Wohnhäusern in seiner Studie bestätigt. Er hat gezeigt, dass das Betreiben einer Klimaanlage ähnlich wirkt wie das Lüften und zu einer Reduzierung auf 1/7 der ursprünglichen Radonkonzentration führen kann.

Luftdruck

Die Luftbewegung und somit auch der Transport des Radons sowohl aus dem Untergrund in das Gebäude wie auch aus dem Gebäude nach außen ist durch Konvektion und Advektion stark von der Außentemperatur und dem Luftdruck abhängig. Die Diffusion spielt hierbei eine geringe Rolle, die Hauptantriebskraft für das Radon auf seinem Weg von dem Keller in das Haus ist der Luftdruck¹². Die Druckdifferenz, die zu einer Bewegung der Luftmassen führt, ist von der Höhendifferenz der betrachteten Luftmassen und ihrem Dichteunterschied abhängig. Die Dichte wird wiederum durch die Temperatur bestimmt. Dadurch bewirken auch Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Räumen konvektive Luftströmungen. Maßgeblich ist die Temperaturdifferenz zwischen Bodenluft und Innenraumluft bzw. zwischen den einzelnen Räumen. Eine höhere Temperatur der Innenraumluft in Bezug auf die Außenluft bewirkt im Inneren einen Unterdruck. Dieser entsteht durch den Strom der warmen Luft nach oben, die dort über das Dach abzieht. Durch den Unterdruck wird vermehrt Radon in das Innere des Wohnhauses befördert. Dadurch herrscht theoretisch im Sommer ein Überdruck im Haus, der bewirkt dass die Radonkonzentration eher gering ist. Im Winter dagegen, wenn das Haus Innen gewärmt wird und Außen niedrige Temperaturen herrschen, entsteht Unterdruck, wodurch die Radonkonzentration ansteigt. Bezüglich der Radonkonzentration in der Raumluft werden diese jahreszeitlichen Aspekte des Radontransports überlagert vom ebenfalls je nach Jahreszeit unterschiedlichen Lüftungsverhalten der Bewohner. In den Übergangsmonaten im Frühling und Herbst müssten die Radoninnenraumkonzentrationen ähnlich sein. Das Haus wird teilweise gewärmt und außen herrschen meist milde Temperaturen. Durch Messungen in diesen Monaten kann man Extremwerte, verursacht durch einen großen Temperaturgradienten, vermeiden.

Da der überwiegende Anteil des Radons in Wohnhäusern aus dem Untergrund in das Haus eindringt, haben auch die Konzentrationsschwankungen der Bodenluft einen Einfluss auf die Innenraumkonzentration. Conrady¹³ zeigt in seiner Studie, dass die Radonkonzentration in der Bodenluft von den Witterungsbedingungen abhängig ist. Der Einfluss nimmt jedoch mit zunehmender Tiefe ab. Bei steigender Bodentemperatur und sinkender Bodenfeuchtigkeit sinkt die Radonkonzentration in der Bodenluft. Durch erhöhte Feuchtigkeit wird der Boden dichter und das Radon steigt weniger an die Oberfläche. Die geringere Radonkonzentration in Folge der Temperaturerhöhung ist ebenfalls durch das Aufsteigen der Luft durch Konvektion zu erklären. Auf-

grund dieser Einflüsse kann auch die Radonkonzentration der Bodenluft jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen, wobei diese im Baugrund deutlich geringer sind als in der Wohnraumlufte. Auch hat das Gebäude eine abdichtende Wirkung, wodurch sich der Einfluss der Witterung im Boden unter dem Gebäude nicht mehr stark auswirkt. Die Schwankungsbreite der Radonkonzentration im Untergrund dagegen ist stark von den geologischen Gegebenheiten, insbesondere dem Einfluss des Bergbaus, abhängig. In Gebieten mit ehemaligem Bergbau sind die Verläufe des Radons direkt auf die Bewetterung der Bergbauanlagen zurückzuführen. Deshalb sollen laut Leistungsbeschreibung die Untersuchungsobjekte nicht in Bergbaugebieten liegen.

In Abbildung 3 ist der periodische Verlauf der Radonkonzentration im Boden durch veränderte Temperaturen zu sehen. In der kälteren Zeit, also um den Jahreswechsel, steigt die Radonkonzentration an. Der Grund dafür ist, dass weniger Luft aus dem Boden nach oben steigt um dort zu entweichen. So sammelt sich das Radon im Boden an.

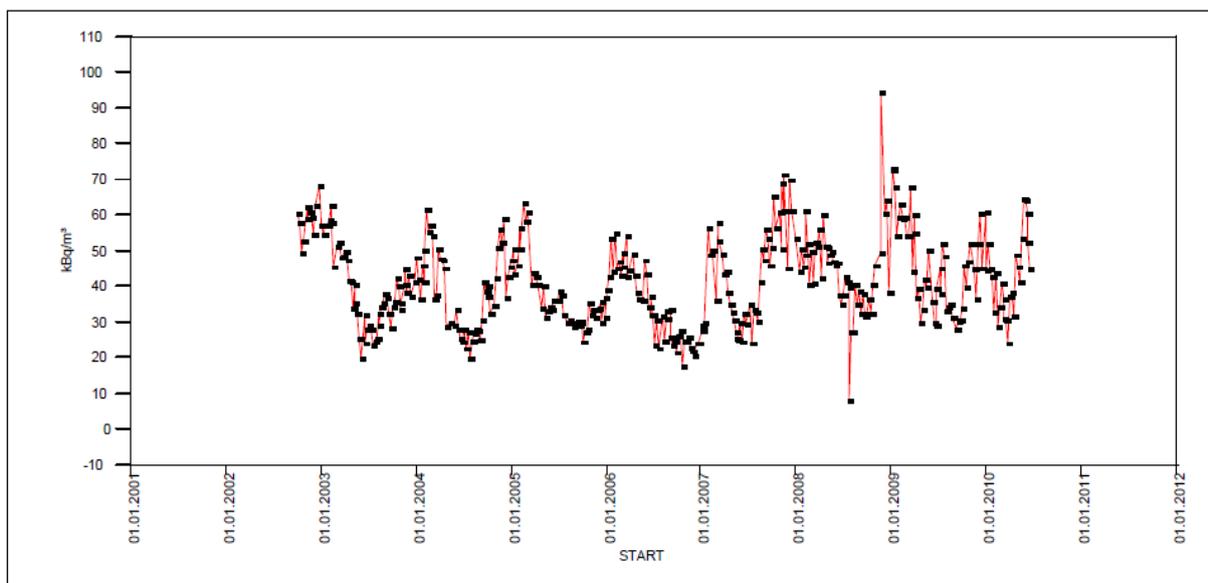


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Bodenradonkonzentration im Beobachtungszeitraum (IV/ 2002 – II/2010), n = 366 (Quelle: J. Conrady, K. Turek, A. Guhr, P. Žárský: Der Einfluss meteorologischer Parameter auf die Radonkonzentration der Bodenluft; 4. Sächsischer Radontag, September 2010; Seite 65)

In Innenräumen bewirken nicht nur die Temperaturdifferenzen einen Druckunterschied, der zu einer Änderung der Radonkonzentration führt. Das Betreiben einer Abluftanlage¹⁴ oder eines Kamins ohne Frischluftzufuhr bewirkt durch Konvektion ebenfalls einen Druckabfall im Gebäudeinneren. Hierbei kann bereits eine Druckdifferenz von wenigen Pascal eine Änderung der Radodynamik bewirken. Da derartige

Drücke aufgrund von Wärmedifferenzen schnell zustande kommen, wird empfohlen, diesen Aspekt bei der Sanierung eines Hauses zu berücksichtigen. So muss zum einen das Entstehen von Unterdrücken vermieden werden. Zum anderen können bei der Radonsanierung Überdrücke im Wohnbereich oder Unterdrücke im unbewohnten Kellergeschoss genutzt werden, um die Ausbreitung in bewohnte Areale zu vermeiden.

Stephen¹⁵ beschreibt in seiner Studie das sehr gute Ergebnis durch die Arbeit mit Überdrücken. Anders als Lüftungsanlagen, die häufig gewartet werden müssen und das Problem der Pollen- oder Bakterienverschleppung aufweisen können, lösen Überdrücke das Problem nachhaltig. Allerdings wird hier unter Baufachleuten die Gefahr von Kondenswasserbildung gesehen.

Die Erzeugung des Unterdrucks im Keller funktioniert nur unter der Voraussetzung, dass der Keller gegenüber der Umgebung und den anderen Gebäudeteilen dicht ist. Auch bei der Erzeugung von Überdrücken im Wohnbereich ist ein dichtes Gebäude notwendig. Hier sind schon 1-2 Pa Überdruck ausreichend, die mit einer mechanischen Zuluftanlage erzeugt werden können¹⁶.

Nicht nur der Temperaturunterschied, sondern auch die Windgeschwindigkeit bewirkt eine Druckdifferenz. Dabei ist der Differenzdruck, der die Infiltration der Luftströme bewirkt, proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit. Auch der Gebäudetyp, die Lage in Bezug auf den Wind und die Bausubstanz spielen hinsichtlich der Volumenströme eine Rolle.

Untergrund und Bausubstanz

In vielen Messungen wurde gezeigt, dass in älteren Bauten mehr Radon in das Gebäude eindringt als in neueren Häusern¹⁷. Der Grund dafür ist die poröse Bausubstanz mit vielen Ritzen zwischen Kabeln und Gesteinen der erdberührenden Gebäudeteile. Auch Abwasserkanäle, Leitungen und Leerrohre sind bei unzureichender Abdichtung Pforten in das Gebäudeinnere. Diese Lecks zwischen dem radonhaltigen Boden und der Innenraumluft lassen das Gas eindringen. Dadurch ist die Radonkonzentration in den Kellergeschossen in der Regel am größten. Wenn in einem Wohnhaus kein Keller vorhanden ist, wird in den Wohnräumen ebenfalls eine erhöhte Radonkonzentration erwartet. Ursache ist der direkte Kontakt des Untergeschosses mit dem Erdreich, das zumeist die Radonquelle darstellt.

Der Anteil des Radons aus Bausubstanzen ist im Allgemeinen deutlich geringer als der Beitrag aus der Bodenluft¹⁸. Doch auch hier gibt es Ausnahmen, die berücksichtigt werden müssen. Studien zeigen, dass das Radon vornehmlich aus Naturböden und Gesteinen stammt¹⁹. Eine Ausnahme sind beispielsweise Gebiete, in denen

uranhaltige Kohle im Mörtel enthalten ist²⁰. In diesem Fall kann der Beitrag aus der Bausubstanz deutlich größer sein als der aus dem Boden.

Da dies jedoch selten ist, ist die Konzentration in der Bodenluft ein wichtiger Indikator. Der Transport des Gases verläuft in gut durchgängigen Böden durch Konvektion und Advektion, in Materialien die lediglich kleine Poren haben durch Diffusion. Ausschlaggebend hierfür sind das Radonangebot im Boden sowie im Besonderen seine Permeabilität. Das Radonangebot ist bei Magmatiten, Tonmineralien, Schiefer und Geschiebemergel mit Granit- oder Urananreicherungen besonders groß²¹.

Poröse Gesteine lassen das Radon sehr gut passieren es kann in den Keller und von dort in die weiteren Wohnräume gelangen. Der Transport wird durch große Konzentrationsgradienten und große Poren gefördert. In sehr festen und kompakten Böden, wie bspw. in feuchtem Lehm, verbleibt das Radon verstärkt im Porenwasser. Darüber hinaus wird der Transport behindert, sodass in diesen Böden letztendlich weniger Radon an die Oberfläche tritt. Sand und Kies haben zwar selber einen geringen Radon-Gehalt, durch die guten Migrationsmöglichkeiten stellen sie aber keine Sperre gegenüber Bereichen höherer Radonkonzentration dar.²²

Insgesamt lässt sich sagen, je größer der Urangehalt und die Permeabilität eines Gesteins, desto größer ist das Angebot an Radon. Die Freisetzung dagegen ist abhängig von der Kontaktfläche zwischen Stein und Porenraum. Diese ist in verwittertem, losem Gestein besonders groß und für den Radongehalt im Gebäude verantwortlich.

Wirkung der Renovierungsmaßnahmen

Außen- bzw. Innenwanddämmung

Das Erneuern der Fassadendämmung sowie der Dachdämmung kann die Radonkonzentration signifikant ansteigen lassen²³. Die dadurch hervorgerufene Herabsetzung des Luftwechsels sowie Veränderungen der Luftdrücke bewirken, dass sich das Radon vermehrt im Gebäude sammelt. Diskutiert wird dabei der Beitrag einer Fassadendämmung. Auch Conrady et al.²⁴ zeigten in ihrer Studie, dass eine Erneuerung der Dämmung zur Erhöhung der Radonkonzentration beiträgt. Allerdings werden die Ergebnisse der einzelnen Renovierungsmaßnahmen nicht separat aufgeführt. So kann kein direkter Rückschluss auf den auslösenden Faktor getroffen werden, also ob die Dämmung des Dachs oder der Außenwand die Erhöhung der Radonkonzentration bewirkt hat. Generell kann man aber sagen, dass auch bei ungedämmten Wänden ein sehr geringer Teil der Luft über diese ausgetauscht wird. Das Raumluftklima wird nur von den ersten 1-2 cm der Wandinnenseite beeinflusst²⁵. Eine Dämmung der Wand wirkt sich folglich nur auf ihre Temperatur und damit die Behaglichkeit aus. Wichtig bei der Ausführung ist, dass zwischen Dämmmaterial und Wand

keine Hohlräume zurück bleiben. Dadurch könnte Radon leicht aufsteigen und in das Haus eindringen. Aus diesem Grund muss das Dämmmaterial sachgemäß und besonders dicht an der Mauer angebracht werden.

Dämmen der Dachkonstruktion

Da das Dach gegenüber dem Wind besonders exponiert ist, werden die Luftströmungen im Haus durch den Wind nachweislich beeinflusst. Bei hohen Windstärken bewirkt die Luftströmung an der dem Wind zugewandten Seite einen Luftsog in das Haus und auf der dem Wind abgewandten Seite einen Sog aus dem Haus heraus. Durch diese Bewegungen der Luftmassen können bei undichten Dächern große Luftmengen ausgetauscht werden. Eine Erneuerung des Daches wirkt sich von daher direkt auf den Luftwechsel aus. Auch durch Konvektion entstehen im Haus Luftströmungen, die über das Dach abziehen können. Eine erneuerte Dämmung bewirkt dadurch veränderte Luftdrücke und Luftströmungen.

Die Studie von M. Heidler²⁶ zeigte, dass bei einer Erneuerung der Dachdämmung und einem Austausch der Fensterscheiben die Radonkonzentration deutlich angestiegen ist. Auch hier liegen keine separaten Ergebnisse für die jeweiligen Maßnahmen vor. J. Conrady²⁷ erhielt ein sinngemäßes Ergebnis.

Dämmung der Keller- bzw. Geschossdecken

Schlechte Isolierungen der Keller- sowie Geschossdecken sind als Ursache für eine erhöhte Radonkonzentration festgestellt worden²⁸. Werden diese erneuert, kann das Radon schlechter aus dem Boden in den Keller bzw. aus dem Keller in die Wohnräume gelangen. Insbesondere werden im Zuge dieser Maßnahmen häufig bestehende Risse oder Undichtigkeiten an Rohrdurchführungen abgedichtet. Da Radon insbesondere durch ebendiese eindringt, kann sich die Radonkonzentration in den Wohnräumen signifikant verringern. Doch die Dämmung wirkt nicht nur direkt auf das Eindringen des Radons. Auch die Luftzirkulation ändert sich aufgrund der veränderten Wärmewiedergabe und der dadurch veränderten Temperaturdifferenz benachbarter Bereiche.

Erneuerung von Fenstern und Türen

Der Einbau neuer, dicht schließender Fenster bewirkt einen verringerten Luftwechsel und erhöht so die Radonkonzentration in Räumen.^{29, 30}

Abbildung 4 zeigt, dass die Radonkonzentration trotz sinkender Werte im Keller in den Wohnbereichen angestiegen ist. Bei geringerer Konzentration in den Kellerräumen, die im Bezug auf die Wohnräume als Quelle anzusehen sind, würde man in den

anderen Räumen ebenfalls einen Rückgang der Radonkonzentration erwarten. Da in diesem Fall die ausgetauschten Fenster die einzige Umbaumaßnahme waren, ist der Anstieg direkt auf den Einbau dichter Fenster zurückzuführen.

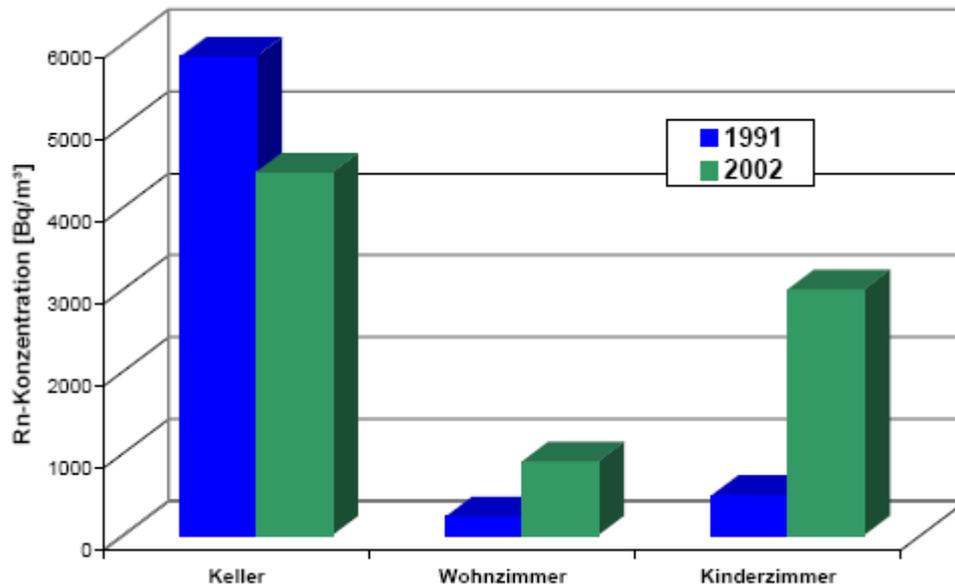


Abbildung 4: Beispiel für Veränderung der Radonkonzentration nach Einbau dichter Fenster. (Quelle: <http://www.aau-gmbh.de/saoris.htm>; Stand: 15.06.2012)

Über unterschiedliche Ergebnisse bei Kunststoff- oder Holzfenstern wurde nicht berichtet. Mit der Zeit können sich Holzfenster durch die Abgabe von Feuchtigkeit verziehen, wodurch neue Eintrittspfade für Außenluft entstehen.³¹

Heizung

Eine Modifikation der Heizungsart bewirkt eine Veränderung der durch Konvektion bewegten Luftmasse, wodurch sich auch die Luftdrücke ändern. Die erwärmte Luft steigt nach oben, wodurch entweder ein Unterdruck entsteht oder Luft aus anderen Bereichen nachströmt. Aus diesem Grund sollten bei Kaminen stets Lüftungsschlitze vorgesehen werden. Sie lassen beim Aufsteigen der warmen Luft frische Außenluft nachströmen, wodurch ein Unterdruck und dadurch das Ansaugen der Luft aus benachbarten Räumen vermieden wird. Ansonsten würde ein Volumenstrom resultieren, der auch die Luft des Kellers beinhaltet.

Messungen ergaben, dass Einzelöfen im Vergleich zu Zentralheizungen eine erhöhte Radonkonzentration bewirken³². Bei der Umstellung von der Etagenheizung mit Kohle auf eine Elektroheizung hat sich die Radonkonzentration im Wohnzimmer des Messobjekts von 4500 Bq/m³ auf 500 Bq/m³ verringert, ohne dass weitere bauliche Veränderungen vorgenommen wurden³³. Insbesondere wenn der Heizkessel im Keller aufgestellt ist, hat dies negative Auswirkungen auf die Radonkonzentration. Die radonhaltige Luft wird in Gegenwart des Kessels im Keller aufgewärmt, steigt nach oben in die Wohnräume und verteilt sich dort. Demnach kann man sagen, dass nicht nur die Art der Heizung, sondern auch ihr Standort, einen signifikanten Einfluss auf die Verteilung des Radons im Haus hat.

Messtechnik

Angewandte Methoden zur Bestimmung der Radonkonzentration

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, muss es im Zusammenhang mit der Einführung eines Grenzwertes für die Radonkonzentration in Wohnräumen standardisierte Messmethoden geben.

In der Praxis muss vor dem Beginn der Messung die Fragestellung klar definiert sein. Die Radonkonzentration kann für den Boden, Wasser oder die Luft bestimmt werden. Bei einer Beurteilung des Risikos für Hausbewohner ist es in erster Linie sinnvoll, die Radonkonzentration in der Raumluft zu messen. Die Bodenluft gibt zwar Auskunft über das Radonpotential, also die Radonkonzentration im Untergrund, ist aber bei guter Abdichtung des Hauses gegenüber Gasen nicht mehr aussagekräftig. Ebenso kann der Boden eine geringe Konzentration aufweisen, durch schlechte Bausubstanz mit maroden Rohrdurchbrüchen und unzureichender Lüftung kann die Radonkonzentration dennoch auf gesundheitsgefährdende Werte ansteigen.

Zudem können integrierende Langzeitmessungen, Kurzzeitmessungen zur Übersicht oder zeitaufgelöste Messungen durchgeführt werden. Aus den bereits genannten Gründen unterliegt die Radonkonzentration starken Schwankungen. So ist es nicht möglich, anhand einer Messung über einen Zeitraum weniger Tage eine Aussage bezüglich der Gefährdung durch Radon zu treffen. Die Radonkonzentration unterliegt nicht nur Schwankungen bezüglich der Jahreszeit und damit der Außentemperatur. Auch kurzzeitige Wetteränderungen, wie vermehrter Niederschlag oder eine kurzzeitige Hitzewelle, verändern die Werte signifikant. Dazu kommen die Einflüsse der Benutzer. Sind die Anwohner während der Messungen nicht zu Hause, werden sich die Werte deutlich von denen abheben, bei denen aufgrund des Wissens über die Radonmessung absichtlich vermehrt oder vermindert gelüftet wurde.

Aus diesen genannten Gründen sollten Messungen über einen Zeitraum von mehreren Wochen bis Monaten vorgenommen werden. Bei Messintervallen von mehreren

Tagen können Schwankungen um den Faktor 2 oder mehr auftreten³⁴. Nur bei den kurzen Übersichtsmessungen sollte das Messintervall einige Tage betragen und am besten zeitaufgelöst sein. Messungen dieser Dauer eignen sich allerdings nur, um eine Vorstellung von den zu erwartenden Werten zu erhalten, beispielsweise ob eine Radonexposition, die genauer untersucht werden müsste, vorliegt. Bewertungsmessungen sollten in mindestens zwei getrennten Räumen durchgeführt werden³⁵. Dabei sollte nicht im Badezimmer oder der Küche gemessen werden, weil die Luftwechselrate dort sehr hoch und nicht repräsentativ für das gesamte Haus ist.

Wenn man den Messzeitraum in die jahreszeitlichen Übergangsmo-nate, also Frühling und Herbst, legt, können extrem hohe bzw. niedrige Temperaturen weitestgehend vermieden werden. Eine zusätzliche Aufzeichnung der Wetterlage macht das Messergebnis auch für diesen Einfluss beurteilbar. Integrierende Langzeitmessungen ergeben zwar einen guten Mittelwert über den gesamten Messzeitraum, geben aber keinen Hinweis darauf, ob möglicherweise die hohen Werte nur auftreten, wenn niemand anwesend ist (z.B. Nachts am Arbeitsplatz). Durch kontinuierliche, also zeitaufgelöste Messungen ist der Einfluss des Benutzerverhaltens nachvollziehbar, wodurch insbesondere die Lüftung als einflussnehmender Aspekt erkannt und beachtet werden kann. Um das Verhalten des Radons beurteilen zu können, sind zeitaufgelöste Messungen unvermeidlich, um sowohl den Zusammenhang zwischen Benutzerverhalten als auch wetter- und klimaabhängigen Bedingungen herstellen zu können³⁶. Nur so kann die Kinetik des Radongases vollständig beurteilt werden.

Beim Aufstellen der Radonmessgeräte ist zu beachten, dass der Mindestabstand zu Wänden oder Böden mindestens 30 cm betragen muss. Zudem sollte vermieden werden die Geräte in direkter Nähe zu Fenster, Türen und Heizungen aufzustellen.³⁷

Radonmessgeräte

Passive Radonmessgeräte

Passive Radonmessgeräte zeichnen sich dadurch aus, dass keine Stromversorgung notwendig ist. Dadurch sind sie in großen Stückzahlen erhältlich und besonders kostengünstig. Radon-Exposimeter sind die geläufigsten passiven Radonmessgeräte und eignen sich am besten für Langzeitmessungen. Das Auslesen erfolgt nach der Messung und liefert den Mittelwert der Radonkonzentrationen über den gesamten Messzeitraum. Dadurch sind keine zeitaufgelösten Messungen möglich. In dem Gerät wird die Exposition über den gesamten Messzeitraum summiert. In Kenntnis der Expositionszeit kann so die mittlere Radonkonzentration berechnet werden. Dieses Verfahren bietet sich für Nutzer an, die ermitteln wollen, ob die Radonkonzentration im Gebäude die Richtwerte, die sich immer auf ganze Jahre beziehen, überschreiten. Sie eignen sich auch für Privatpersonen, da die Handhabung sehr einfach ist.

Kernspur-Detektoren

Kernspurdetektoren haben kleine Abmessungen von 10 cm³ bis 100 cm³ und eignen sich von daher auch als Personendosimeter. Sie bestehen aus einer Diffusionskammer und einer für α -Strahlung empfindlichen Folie. Im Eintrittsfenster befindet sich ein Filter, der nur Radon und nicht dessen Zerfallsprodukte in die Kammer eindringen lässt. Die emittierten Alphateilchen des Radons sowie seiner in der Kammer entstehenden Zerfallsprodukte treffen auf eine Folie und hinterlassen dort Spuren, die vorerst nicht sichtbar sind. Beim Auswerten werden die Spuren durch chemisches Ätzen sichtbar gemacht und können mit Hilfe eines Mikroskops gezählt werden. Anhand ihrer Dichte kann auf die Radonexposition geschlossen werden. Da die Messempfindlichkeit nicht sehr hoch ist, werden Kernspurdetektoren überwiegend für Langzeitmessungen genutzt.

Eine zur Zeit neu entwickelte Untergruppe der Kernspur-Detektoren sind automatisch schaltende Radonexposimeter, die als Personenexposimeter dienen. Sie haben das gleiche Messprinzip, allerdings werden die Messwerte nicht ununterbrochen aufgezeichnet. Das Gerät ist so konzipiert, dass es automatisch erkennt, wann es getragen wird. In diesem Fall öffnet sich ein Verschluss über dem Detektorfilm, sodass dieser exponiert wird. Zeitgleich registriert das Exposimeter die Dauer der Messung, um den zeitlichen Bezug der Exposition nicht zu verlieren. Zusätzlich kann eine Funktion verwendet werden, die das Messfenster nach voreingestellten Zeiten verschließt. Durch diese neue Technik ist es möglich, die tatsächliche Exposition am Arbeitsplatz zu erfassen, da sich der Messzeitraum auf die tatsächliche Arbeitszeit begrenzen lässt. Auch können durch Selektion Tag-/Nachtwerte getrennt erfasst werden.

Messungen mit Aktivkohle

Bei Messungen mit Aktivkohle kommen zwei verschiedene Verfahren zur Anwendung: Aktivkohle-Röhrchen und Aktivkohle-Dosen.

Aktivkohleröhrchen haben ein kleines Volumen von ca. 10 cm^3 . Sie sind mit Aktivkohle gefüllt, von der das Radon adsorbiert wird. Nach wenigen Tagen ist die Rate, mit der das Radon von der Aktivkohle adsorbiert wird, gleich groß wie die Rate, mit der es wieder desorbiert wird. Wenn dieses Gleichgewicht erreicht ist, kann von der Aktivität in der Aktivkohle auf die Radonkonzentration der Luft geschlossen werden. Nach der Messung wird die Aktivkohle mit einem Flüssigszintillator ausgewertet. Das Ergebnis ist empfindlich gegenüber hoher Luftfeuchtigkeit und großen Temperaturschwankungen. Zudem kommt es bei Schwankungen der Radonkonzentration während der Messzeit zu Fehlern, da die Rate der Adsorption und Desorption nicht im Gleichgewicht ist.

Aktivkohledosen funktionieren nach dem gleichen Prinzip. Sie haben allerdings ein größeres Messvolumen von 50 cm^3 bis 500 cm^3 . Im Anschluss an die Messung wird die Gammastrahlung der Zerfallsprodukte des Radons spektrometrisch ausgewertet und daraus auf die Radonkonzentration der Luft geschlossen.

Elektretverfahren

Ein Elektret ist eine elektrisch geladene Folie. Sie ist in einer Messkammer angebracht, die ähnlich einer Ionisationskammer funktioniert. Das Radon diffundiert durch einen Filter in die Kammer. Die Zerfallsprodukte des Radon werden durch einen Filter zurück gehalten. In der Kammer zerfällt das Radon. Durch diesen und den Zerfall seiner eigenen Zerfallsprodukte wird die Luft in der Kammer ionisiert. Die entstandenen Ladungsträger, vor allem hervorgerufen durch die Alpha-Zerfälle, bewirken Neutralisationen auf der geladenen Folie. Dabei hängt das Maß der Neutralisationen von den entstandenen Ladungen, also der Konzentration des Radons und der zeitlichen Expositionsdauer, ab. Mit einem externen Auslesegerät kann die Ladungsänderung der Folie, dem Elektret, gemessen und so auf die Radonexposition geschlossen werden. Da das Verfahren sehr empfindlich gegenüber γ -Umgebungsstrahlung ist, da diese nicht vom Zerfallsprodukt-Filter abgehalten wird, muss für jeden Standort eine Untergrundkorrektor gemacht werden. Auch dieses Verfahren ist aufgrund seiner geringen Empfindlichkeit nur für Langzeitmessungen geeignet. Zudem müssen die Messzeit und die ungefähre Radonkonzentration bekannt sein, um die richtige Dimensionierung des Elektrets und des Volumens zu wählen. ³⁸

Aktive Radonmessgeräte

Kontinuierlich messende aktive Radonmessgeräte können den zeitlichen Verlauf der Radonkonzentration aufzeichnen. Dies ist erforderlich, wenn der Grund für die Konzentrationsschwankungen ermittelt werden soll. So können z.B. tageszeitliche Schwankungen erfasst oder Abhängigkeiten von Witterungsverhältnissen ermittelt werden. Auch für das Auffinden von Radonquellen sind sie sehr nützlich. Aufgrund des hohen messtechnischen Aufwandes sind sie nicht für Langzeitmessungen von ca. einem Jahr vorgesehen. Der übliche Messzeitraum erstreckt sich bei aktiven Radonmessgeräten über Wochen bis Monate.

Ionisationskammern

Die Ionisationskammer misst sowohl Radon als auch Thoron und seine Zerfallsprodukte. Sie werden über einen Filter angesaugt, der die Zerfallsprodukte der Außenluft vorerst abscheidet. In der Kammer zerfällt das Radon, wodurch die Luft ionisiert wird. Die Ionen wandern im elektrischen Feld zu den Elektroden und erzeugen so einen messbaren Strom. Dieser ist über die Anzahl der gebildeten Ionen proportional zur Radonkonzentration.

Die Ionisationskammer kann in verschiedenen Ausführungen betrieben werden. Für hohe Radonkonzentrationen wird der Strombetrieb gewählt, bei dem die Ladungsträger in den Elektroden einen Strom induzieren. Bei geringen Konzentrationen kann auch der Impulsbetrieb gewählt werden. Bei diesem ist die Nachweisgrenze geringer. Das Messprinzip besteht darin, dass die entstandenen Ladungsträger im Messvolumen durch ihre eigene Ladung das elektrische Feld verändern, wodurch ein elektrischer Impuls messbar wird. Dieser ist dann lediglich auf ein einziges Primärteilchen zurückzuführen.

Durch eine besondere Form der Elektroden, sogenannte Vieldrahtelektroden, kann das elektrische Feld in der Kammer verändert werden. Dadurch verringert sich die Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger, sodass sogar die Energie der Alphateilchen gemessen werden kann. Damit können Radon und Thoron aufgrund der verschiedenen Zerfallsprodukte unterschieden werden.

Ionisationskammern lassen sich für die Radonmessung in der Raumluft je nach Hersteller auf 2 Arten betreiben:

-Im Diffusionsbetrieb, der lautlos ist und dadurch bei der Anwendung in Wohnhäusern zum Einsatz kommt.

-Im Durchflussbetrieb, bei dem die Außenluft aktiv in die Messkammer hineingepumpt wird.

Die Ionisationskammer ist ein häufig gewähltes Messinstrument, da über einen ausgedehnten Konzentrationsbereich zuverlässige Ergebnisse erzielt werden. Der Nach-

teil der Ionisationskammern ist eine Kontamination mit den Zerfallsprodukten Pb-210 und Po-210, daher muss die Kammer in bestimmten Abständen gespült werden.

Szintillationskammern (Lucas-Kammern)

Szintillationskammern sind in ihrem Inneren mit einer fluoreszenzfähigen Schicht, meistens Zinksulfid, ausgekleidet. Wird die radonhaltige Luft über einen Filter in das Innere der Kammer gepumpt, zerfällt das Radon in der Kammer. Die dabei emittierten Alphateilchen des Radon sowie seiner Folgeprodukte erzeugen in der Szintillatorfolie Lichtblitze. Diese werden über eine Photokathode in elektrische Ladung umgewandelt. Die entstandenen Elektronen werden über einen Photomultiplier verstärkt und ergeben einen Spannungsimpuls. Die Impulsrate ist proportional zur Radonkonzentration der gemessenen Luft.

Der Vorteil des Szintillationszählers ist, dass er, anders als die Ionisationskammer, unempfindlich gegenüber Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Umgebungstemperatur ist. Doch auch bei diesem muss eine regelmäßige Spülung vorgenommen werden, um eine Kontamination mit Blei und Polonium zu vermeiden.

Elektrostatische Abscheidung mit Alphaspektrometrie

Bei diesem Messprinzip befindet sich ein Halbleiterdetektor in der Messkammer, die aus leitfähigem Material besteht. Die Oberfläche des Halbleiters ist gegenüber dem Kammergehäuse auf negatives Potential geschaltet. So bildet sich in der Kammer ein elektrisches Feld aus. Die positiv geladenen Zerfallsprodukte des Radons lagern sich an dem Halbleiterdetektor und der Kammerwand an und zerfallen dort weiter. Die dabei entstehende Alphastrahlung wird von dem Halbleiterdetektor, der in Sperrrichtung betrieben wird, gemessen. Durch die alphaspektrometrische Messung können Radon und Thoron aufgrund der unterschiedlichen Zerfallsprodukte differenziert ermittelt werden. Ebenso kann das Untergrundspektrum, das auch von den Alphastrahlern des Kammerinneren sowie der Wände stammt, subtrahiert werden.

Das Gerät lässt sich auf zwei Arten betreiben: Im Diffusionsbetrieb oder im Pumpbetrieb. Beim Pumpbetrieb wird die Außenluft wie bei den bisher genannten Messverfahren über einen Filter in das Kammerinnere gesaugt. Vorteile des Messprinzips sind die niedrige Nachweisgrenze und der große Konzentrationsbereich, in dem gemessen werden kann. Nachteilig auf die Messung wirkt sich dagegen eine hohe Luftfeuchtigkeit aus, wodurch die zu messende Luft gegebenenfalls vorerst getrocknet werden muss. Im Diffusionsbetrieb gelangt das Radon durch die Kammerwand in das Messgerät. Dies ermöglicht eine platzsparende Ausführung, da der Halbleiter sehr klein ist, sodass es sogar als Personendosimeter genutzt werden kann. Diese Ausführung bringt aber auch eine höhere Nachweisgrenze mit sich.

Doppelfilterverfahren (speziell für Thoron-Messungen)

Beim Doppelfilterverfahren wird die Umgebungsluft über einen Filter angesaugt. An diesem setzen sich die Radon-Zerfallsprodukte der Außenluft ab. Das Radon und Thoron gelangt nun ins Kammerinnere und zerfällt dort. Die Luft strömt dabei weiter über einen Filter nach außen, und die Zerfallsprodukte setzen sich wieder an diesem ab. Sie werden entweder während der Messung mit einem Szintillations- oder Halbleiterdetektor oder im Anschluss mit einem externen Detektor gemessen. Das Verfahren eignet sich speziell für die Messung von Thoron, da die Luft mit einer hohen Geschwindigkeit durch die Kammer fließt um sich nicht in der Kammer abzusetzen. Aufgrund der kurzen Halbwertszeit des Thoron bleibt diesem genug Zeit, in ausreichender Anzahl zu zerfallen. Das Radon mit seiner längeren Halbwertszeit dagegen zerfällt nur in geringem Maße und trägt dabei unwesentlich zum Messsignal bei.³⁹

Geräte zur Messung der Radon-Folgeprodukte

In seltenen Fällen wird nicht die Konzentration des Radongases selber, sondern die der Lungenkrebs auslösenden Folgeprodukte gemessen. So ist die Berechnung der Dosis präziser. Allerdings hat diese Methode auch ihre Einschränkungen. Die Radonfolgeprodukte lagern sich sehr schnell an sich in der Luft befindende Aerosole an. Die Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration der Folgeprodukte können meistens nur diese angelagerte Komponente messen. Es hat sich aber gezeigt, dass nicht immer der gleiche Anteil der Folgeprodukte an Aerosole gebunden ist. So überwiegt bei sehr reiner Luft die Komponente, die nicht an Aerosole gebunden ist, und bei Luft mit einem großen Aerosolgehalt die Komponente, die an diese gebunden ist. Eine Dosisberechnung würde also auch bei dieser Messung zu Fehlern führen.⁴⁰

Bei den Messungen wird die Umgebungsluft mit einer Pumpe angesogen. Die Zerfallsprodukte, die an die Aerosole gebunden sind, lagern sich auf der Filteroberfläche an. Von dort werden sie mit einem Strahlungsdetektor ausgemessen. Da es sich um ein Gemisch der Folgeprodukte handelt, die alle eine unterschiedliche Energie haben, wird die Messgröße als potentielle Alphaenergiekonzentration angegeben.

Übersicht der Messgeräte

Zur besseren Übersicht werden die verschiedenen Messgeräte mit ihren Vor- und Nachteilen tabellarisch dargestellt:

	Aktiv/ Passiv	Mess- zeitraum	Größe	Nachweis- grenze	Mess- unsicher- heit	Vorteile	Nachteile
Kernspur- Detektoren	Passiv	mehrere Monate	Als Perso- nendosi- meter oder in Größen bis zu 100 cm ³ erhält- lich	10 ⁵ - 10 ⁸ Bqh/m ³	25%	einfache Bauweise	geringe Messem- pfindlich- keit
Aktivkohle- messgerä- te	Passiv	Tage	verschie- dene Aus- führungen in Form von kleinen Röhrchen bis hin zu größeren Dosen	10 Bq/m ³	10%-40%	einfache Bauweise	empfindlich gegenüber Luftfeuch- te, große Ungenau- igkeit bei schwän- kender Radon- konzentra- tion
Elektret- verfahren	Passiv	mehrere Monate	verschie- dene Aus- führungen, abhängig vom Messbe- reich	10 ³ Bqh/m ³ bei großem Kammer- volumen	15%	einfache Handha- bung, Ergebnisse sind auch während der Mes- sung aus- lesbar	Messzeit und die ungefähre Radon- konzentra- tion muss bekannt sein, um das Mess- gerät an- zupassen
Ionisati- ons- kammern	Aktiv	Kontinuier- liche Mes- sungen	Volumen von ca. 1l	5 Bq/m ³	5%-10%	sehr zuver- lässig, großer Messbe- reich, gleichzeiti- ge Mes- sung von Radon und Thoron möglich	Kontami- nation von Pb-210 und Po- 210, Luft- feuchtigkeit hat einen Einfluss auf das Mes- ser- ergebnis

Szintillationskammern	Aktiv	Kontinuierliche Messungen	ca. 250 cm ³	20 Bq/m ³	5%	sehr zuverlässig, Umgebungsbedingungen haben geringe Einflüsse	Kontamination von Pb-210 und Po-210
Elektrostatische Abscheidung	Aktiv	Kontinuierliche Messungen	im Diffusionsbetrieb auch als Personendosimeter erhältlich, im Pumpbetrieb mit einem Volumen von ca. 1 l	5 Bq/m ³ für den Pumpbetrieb; 100 Bq/m ³ für den Diffusionsbetrieb	5%-10%	Alphaspektrometrie möglich, Pumpbetrieb: Großer Messbereich; Diffusionsbetrieb: kleine Bauweise	Kontamination von Pb-210 und Po-210 Diffusionsbetrieb: geringe Nachweisgrenze Pumpbetrieb: Luftfeuchtigkeit hat einen Einfluss auf das Ergebnis
Doppelfilterverfahren	Aktiv	Stunden bis Tage	ca. 100l	10 Bq/m ³	10%	Messung von Thoron	keine Messung von Radon, sehr große Maße

Quelle: eigene Anfertigung; Werte der Nachweisgrenze und Messunsicherheit aus: Olaf Sarenio: Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten; Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission Band 47; Urban & Fischer

Methoden der energetischen Sanierung von Gebäuden

Einleitung und gesetzliche Vorgaben

Vor dem Hintergrund klimaschädigender Auswirkungen von CO₂-Emissionen und endlichen Ressourcen fossiler Brennstoffe kommt dem sparsamen Umgang mit Energie eine zunehmende Bedeutung zu. Ein Großteil der hierzulande in Altbauten eingesetzten Energie – üblich ist im Altbaubestand ein Anteil von bis zu 85 % – wird für die Beheizung und Brauchwassernutzung in Wohngebäuden aufgewendet.

Dementsprechend groß ist das Einsparpotential in diesem Bereich, weshalb bereits im Jahr 1976 das Energiespargesetz (EnEG), im Jahr 1977 die Wärmeschutzverordnung (WSchV) und im Jahr 1978 die Heizungsanlagenverordnung (HeizAnIV) erlassen wurden. Diese Verordnungen machten Vorgaben hinsichtlich der Reduzierung des Energieverbrauchs durch bauliche Maßnahmen bzw. durch Anforderungen an Heizungsanlagen. Während in den ersten Fassungen der WSchV anfangs nur Vorgaben zum Wärmedurchgang der Gebäudehülle gemacht wurden, wurde in der Fassung von 1995 erstmals die Bestimmung des Jahres-Heizwärmeverbrauchs gefordert. Die HeizAnIV dagegen setzte Vorgaben für Heizkessel und Einrichtungen zur raumweisen Temperaturregelung (i.d.R. durch Thermostate) fest.

Im Bereich der früheren DDR wurden 1982 in der Vorschrift TGL 28706 verschärfte Anforderungen hinsichtlich des Wärmeschutzes eingefügt. Weitergehende Vorgaben wurden dort Mitte der 1980'er Jahre für die seit 1972 eingeführte Wohnungsbauserie WBS 70 festgeschrieben.

Energieeinsparverordnung (EnEV)

Im Jahr 2002 wurden die beiden o.g. Verordnungen in der Energieeinsparverordnung (EnEV 2002) erstmals zusammengeführt. Weitere Novellierungen erfolgten 2004, 2007 und 2009. Diese wandte sich in erster Linie an Bauherren von Wohn- und Bürogebäuden und hatte zum Ziel, durch eine umfassende energetische Betrachtung den Energieverbrauch zu verringern. Dabei wurden erstmals auch Energieverluste bei Erzeugung, Verteilung, Speicherung und Übergabe berücksichtigt. Eingeführt wurde der Begriff der sog. Endenergie, also die Gesamtenergiezufuhr an der Gebäudegrenze. Ein weiterer Aspekt ist die Bewertung dieser Energiemenge hinsichtlich der zu ihrer Erzeugung benötigten Primärenergie, d.h. es wird auch die Wirtschaftlichkeit und Umweltrelevanz der Stromerzeugung und -verteilung etc. außerhalb der Gebäudegrenzen berücksichtigt.

Durch die Zusammenführung der WSchV und der HeizAnIV wurde es also ermöglicht, bau- und anlagentechnische Aspekte zusammenzuführen und gemeinsam zu bewerten. So kann z.B. eine schlechter gedämmte Gebäudehülle durch eine optimierte Heizungsanlage in der Bilanz teilweise kompensiert werden oder umgekehrt.

Im Jahr 2009 wurde die Verordnung novelliert (EnEV 2009), wobei eine Verschärfung der bis dato geltenden Vorgaben erfolgte.

Die EnEV richtet sich an Gebäudebesitzer und zielt ab auf beheizte Gebäude, in erster Linie Wohngebäude. Ausnahmen (z.B. denkmalgeschützte Gebäude) sind jedoch vorgesehen.

Ein Teil der EnEV stellt dabei Mindestanforderungen für neu zu errichtende Gebäude, während im Rahmen dieses Projektes die Vorgaben für energetische Sanierungsmaßnahmen an bestehenden Gebäuden von Interesse sind, die in Abschnitt C behandelt werden. Die üblicherweise bei solchen Sanierungen berücksichtigten Ansätze sind dort beschrieben.

Im Hinblick auf diese Maßnahmen gibt die EnEV bestimmte Zielwerte vor. So werden u.a. der maximal zulässige Jahres-Primärenergiebedarf und der Transmissionswärmeverlust über die Gebäudehülle festgelegt. Ersterer wird durch eine Energiebilanzierung errechnet (Bilanzierungsverfahren), während im zweiten Verfahren die Transmissionswärmeverluste mithilfe des U-Werts der Gebäudehülle errechnet werden. Bei beiden Betrachtungen darf maximal um 40 % von den entsprechenden Vorgaben für Neubauten abgewichen werden. Energetische Sanierungsmaßnahmen müssen demnach eine bestimmte Mindesteffizienz aufweisen¹, was zuvor nicht vom Gesetzgeber vorgegeben wurde.

Zur Bestimmung der o.g. Parameter muss eine Berechnung der jeweiligen Kenngrößen erfolgen, deren Verfahren ebenfalls in der Verordnung beschrieben sind. Bei Gebäudeerweiterungen, in deren Rahmen die beheizte Nutzfläche um mehr als 50 m² zunimmt, müssen die Kriterien der EnEV für Neubauten erfüllt werden.

Ferner mussten bestimmte ältere gas- oder heizölbetriebene Kessel bis zum 31.12.2008 außer Betrieb genommen werden. Weiterhin müssen in Gebäuden, die seit dem 01.02.2002 den Besitzer wechselten, ungedämmte Wärmeverteilungen, Warmwasserverteilungen und Armaturen mit einer Wärmedämmung versehen werden. Schließlich mussten hier bis Ende 2011 ungedämmte, zugängliche oberste Geschossdecken mit einer Dämmung versehen werden, die mindestens einen Wärmedurchgangskoeffizient von 0,3 W / (m² K) für dieses Bauteil sicherstellt.

Die novellierte EnEV 2009 beinhaltet neben einer Verschärfung verschiedener Anforderungen zusätzlich Auflagen hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes und die Verpflichtung zur Erstellung von Energieausweisen für Gebäude im Falle einer Neuvermietung oder eines Verkaufs.

Eine weitere Novellierung der EnEV wurde im Jahr 2014 durchgeführt.

¹ Ausnahmen für Maßnahmen an Außenbauteilen, die weniger als 10 % deren Oberfläche betreffen, sind möglich.

Relevante DIN-Normen

Während die EnEV hinsichtlich dieser Maßnahmen im Wesentlichen Zielvorgaben beschreibt, wird die konkrete technische Umsetzung in Normen beschrieben. In diesem Zusammenhang sind insbesondere die DIN 4108 („Wärmeschutz in Hochbau“) und die DIN V 4701, Teil 10 (energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen) von Bedeutung, die u.a. verschiedene Berechnungsverfahren und technische Umsetzungen definieren.

Mittelfristig wird diese Norm durch die DIN V 18599 („Energetische Bewertung von Gebäuden“) ersetzt werden, die bereits heute für Nichtwohngebäude ausschlaggebend ist.

Hier ist u.a. das Berechnungsverfahren des Jahresheizwärmebedarfes beschrieben, das die verschiedenen Energieverluste des Gebäudes (Transmissionswärmeverluste, Lüftungswärmeverluste etc.), nicht aber nutzungsbedingte Einflüsse berücksichtigt.

Bei der Betrachtung der Transmissionsverluste ist die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten (sog. U-Wert) der Gebäudehülle von großer Bedeutung. Dessen Berechnung ist in der Norm EN ISO 6946 („Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient“) beschrieben.

Energiestandards

Hinsichtlich des Energieverbrauchs werden Gebäude in verschiedene Kategorien eingeteilt. Dabei wird der jährliche Heizwärme- oder der Primärenergiebedarf ins Verhältnis zur Energiebezugsfläche gesetzt.

Niedrigenergiehäuser dürfen gemäß der EnEV 2002-Vorgaben einen maximalen Heizwärmebedarf von 40 bis 70 kWh / (m² a) aufweisen.

Ein sog. KfW 70 Haus liegt hinsichtlich des Jahresprimärenergiebedarfs um 30% unterhalb eines Neubaus nach EnEV 2009.

Diese Werte beziehen sich allerdings ausschließlich auf die bauliche Ausführung und die Haustechnik, während das Nutzerverhalten, das sich auf den tatsächlichen Energieverbrauch durchaus auswirkt, in diese Werte nicht einfließt.

Energiebilanzierung von Gebäuden

Grundlage für die Planung energetischer Sanierungen muss immer eine Bilanzierung der eingesetzten und der abgegebenen Energieströme sein. Bei der Gegenüberstellung der in einem Jahr zugeführten und im gleichen Zeitraum entweichenden Energiemengen wird der sog. Endenergiebedarf ermittelt.

Anhand dieser Größe wird der energetische Zustand eines Gebäudes bewertet und es werden Ansatzpunkte zur energetischen Optimierung des Gebäudes aufgezeigt.

Die Summe aller gezielt einem Gebäude zugeführten Energieströme wird als Endenergie bezeichnet. Sie umfasst die Nutzenergie (s.u.), die Anlagenverluste (s.u.) und die Hilfsenergie und ergibt sich in der Gesamtbetrachtung aus der eingesetzten Primärenergie nach Abzug der Umwandlungsverluste (Förderung, Transport, Lagerung der Energieträger etc.).

Als Energieeinträge für das Gebäude kommen in Betracht:

Nutzenergie (Energie zum Beheizen des Gebäudes und zur Warmwasserbereitung

solare Gewinne (Aufwärmung durch Sonneneinstrahlung über die Fensterflächen)

interne Gewinne (Wärmeabgabe von Personen, elektrischem Licht, Elektrogeräten etc.)

Wärmeverluste ergeben sich dagegen durch:

Transmission (Wärmeverluste über die Gebäudehülle)

Lüftung (Wärmeverluste über Abluft bzw. Leckagen)

Trinkwassererwärmung (Wärmeverluste über Abwasserableitung)

Anlagenverluste (Abgasverluste der Heizung, Wirkungsgrad des Heizkessels, Verluste von Wärmespeichern, Leitungsverluste durch mangelhafte Dämmung und Regelung etc.)

Bei einer Energiebilanz werden alle o.g. Größen ermittelt und die Endenergie berechnet. Setzt man diese ins Verhältnis zur beheizten Wohn- oder Nutzfläche, so ergibt sich die sog. Energiekennzahl, die eine normierte Maßzahl für den energetischen Zustand eines Gebäudes darstellt. Gebäude gleicher Bauart und Nutzung können so miteinander verglichen werden. Abweichendes Nutzerverhalten kann allerdings bei einer solchen Betrachtung selbstverständlich nicht berücksichtigt werden.

Maßnahmen bei der energetischen Sanierung von Wohngebäuden

Aufgrund einer Energiebilanz ergeben sich verschiedene Ansatzpunkte zur Sanierung.

Dabei sind verschiedene Einzelmaßnahmen möglich, die jeweils individuell auf das Sanierungsobjekt zugeschnitten sein müssen. Je nach Aufwand und Wirtschaftlichkeit werden im Regelfall bestimmte Einzelmaßnahmen vorgezogen, während andere Maßnahmen u.U. von den Gebäudeeigentümern niemals umgesetzt werden. Wichtig

ist jedoch eine Abstimmung aller Einzelmaßnahmen aufeinander, um zu vermeiden, dass im Nachgang Komplikationen auftreten.

Auch die korrekte Planung und Ausführung der einzelnen Maßnahmen ist von zentraler Bedeutung, da eine unsachgemäß durchgeführte Sanierung nicht nur zu einer Minimierung des Sanierungserfolgs in energetischer Sicht führen kann, sondern auch Folgeschäden - z.B. in Form von Kondenswasserbildung infolge einer ungewollten Taupunktverschiebung o.ä. – auftreten können, die bis hin zur Zerstörung von Bauteilen oder zumindest zu Feuchtigkeitsschäden mit der Gefahr einer Kontamination der Raumluft durch Schimmelpilzsporen führen können.

Im Einzelfall können auch Probleme bei der Planung auftreten, wenn Normen oder Vorgaben aus anderen Bereichen (Lärmschutz, Denkmalschutz o.ä.) betroffen sind.

Ein großer Teil der Ansatzpunkte von energetischen Sanierungen betrifft die Dämmung und die Dichtheit der Gebäudehülle. Insbesondere die letztgenannten Maßnahmen wirken sich erheblich auf den Luftwechsel in den Gebäuden aus, was zu einer Zunahme von gesundheitsgefährdenden Substanzen wie z.B. Emissionen aus der Bausubstanz oder aber Radon in der Raumluft führen kann, sofern keine geeigneten Gegenmaßnahmen in Form raumluftechnischer Anlagen ergriffen werden.

Weitere Sanierungen betreffen die Heizungsanlage, die solare Warmwasserbereitung oder die Installation von Fotovoltaikanlagen, um mit Solarenergie Strom zu gewinnen, wobei diese Maßnahmen sich im Regelfall weniger auf die o.g. Problematik auswirken dürften.

Nachfolgend werden typische Sanierungsmethoden hinsichtlich ihrer Ziele, geeigneter Ausführung, typischen Einspareffekten, aber auch typischer Risiken und möglicher Auswirkungen auf den Luftwechsel in Gebäuden beschrieben. Der Überblick über die einzelnen Maßnahmen orientiert sich an den unter Kapitel 2 genannten Wärmeverlustpfaden.

Maßnahmen zur Verringerung von Verlusten durch Transmission

Transmissionsverluste stellen einen sehr großen Anteil an den Energieverlusten dar und entstehen beim Wärmedurchgang durch Bauteile. Sie werden daher in erster Linie durch Dämmmaßnahmen beseitigt.

Die Dämmwirkung eines Bauteils berechnet sich grundsätzlich als Produkt seines U-Wertes (Materialkonstante, die ein Maß für den Wärmestrom durch das Bauteil bei einer bestimmten Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen darstellt) und seiner Dicke.

Die häufig geäußerte Befürchtung, dass das Anbringen einer Dämmung an den Außenwänden zu Problemen führen könnte, da dadurch der Austausch mit Außenluft

verhindert würde, ist nicht haltbar, da nach gesicherten Ergebnissen wissenschaftlicher Untersuchungen nur 1 – 2 % (bei Mauerziegelwänden maximal 5 %⁴¹) des Luft-, Feuchte- und Gasaustauschs über die Wandflächen erfolgen.

Es wird zwischen verschiedenen Dämmmaßnahmen unterschieden, die sich z.T. ergänzen können (z.B. Deckung der Kellerdecke in Kombination mit anderen Dämmmaßnahmen), sich aber auch gegenseitig ausschließen. Nachfolgend werden die einzelnen Ansätze vorgestellt.

Außendämmung

Die Außenwände von Gebäuden bewirken häufig aufgrund ihrer großen Flächen einen Großteil der Wärmeverluste. Je nach Gebäudetyp gehen bei Altbauten mit z.B. gut wärmeleitendem Lochziegelmauerwerk bis zu 40 % des jährlichen Heizenergiebedarfs über die Außenwände verloren⁴².

Das Prinzip der Außendämmung beruht darauf, die Gebäudeaußenwände fassadenseitig zu dämmen. Auf diese Weise bleibt im beheizten Gebäude die eigentliche Wand auf einer Temperatur, die nahezu auf Höhe der Raumtemperatur liegt, was sehr positiv im Hinblick auf die Behaglichkeit ist.

Der Taupunkt wird dabei auf die Wetterseite der Wand verschoben, so dass eine raumseitige Kondenswasserbildung im Regelfall ausgeschlossen werden kann, die z.B. bei einer unsachgemäßen Innendämmung auftreten und eine versteckte Schimmelbildung nach sich ziehen kann (s. 1.3).

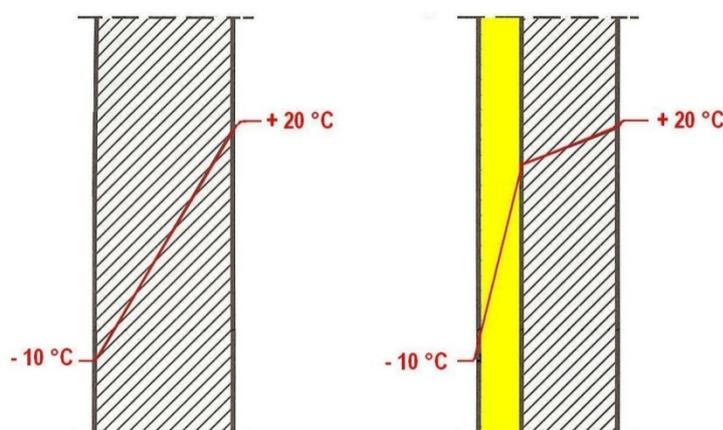


Abbildung 5: Prinzip der Außendämmung:

Die rote Kurve zeigt den Temperaturverlauf innerhalb der Wandkonstruktion ohne (links) und mit (rechts) Außendämmung (gelb dargestellt) bei einer Außentemperatur von -10°C und einer Raumtemperatur von $+20^{\circ}\text{C}$. Ohne Dämmung fällt die Temperatur in der Wand annähernd linear ab. Mit Außendämmung findet der Temperaturabfall überwiegend innerhalb des Dämmstoffs ab. Möglicherweise anfallendes Kondensat befindet sich auf der Fassaden­seite und kann bei einer diffusionsoffenen Konstruktion in die Außenluft ent-

Weitere Vorteile gegenüber der Innendämmung sind die Möglichkeit, viele geometrische Wärmebrücken einfacher auszuschalten und außerdem im Innenraum keinen Platz aufgrund der einzubauenden Dämmebene zu verlieren.

Als Nachteil können die großen Waddicken aufgrund der zusätzlichen Dämmschicht gelten, die an Fenstern u.U. einen „Schießcharteneffekt“ bewirken können. Ferner bleiben auskragende Bauteile (z.B. an die Geschossdecke angeschlossene Balkone, Betonpfeiler etc.) Schwachstellen, die im Zuge einer energetischen Sanierung entweder komplett gedämmt oder aber thermisch vom Restgebäude entkoppelt werden müssen.

Auch die gelegentlich praktizierte Vorgehensweise, die Fassade nur bis zur Kellerdecke zu dämmen, ist problematisch, da es dann zu einer Auskühlung des Kellerdeckenaufagers durch die kalte Kelleraußenwand kommen kann. Aus diesem Grund wird die Dämmung i.d.R. als Sockeldämmplatte (Perimeterdämmung) bis mindestens 50 cm unterhalb der Kellerdecke ausgeführt. Besonderes Augenmerk muss bei der Umsetzung auch auf die Anschlüsse von Fenster- und Türabnungen gelegt werden.

Unterschieden wird grundsätzlich zwischen Wärmeverbundsystemen und hinterlüfteten Vorhangfassaden.

Wärmeverbundsystem (WDVS)

Das WDVS eignet sich vor allem für einschalige, verputzte Wände oder Wände mit Vormauerschale.

Ein WDVS besteht aus Dämmstoffplatten, die auf die vorhandene Fassade (inkl. vorhandenen Putz) mit einem mineralischen Kleber aufgeklebt und zusätzlich verdübelt werden. Dabei ist auf eine annähernd vollflächige Verklebung der Platten zu achten, um eine Hinterlüftung der Platten zu vermeiden. Auf die Dämmplatte wird ein Armierungsgewebe aufgebracht, auf die dann eine Grundierung und ein geeigneter Außenputz o.ä. aufgebracht werden.

Als Dämmstoffe kommen in erster Linie Polystyrol, Mineralfaser, Holzwolle-Leichtbauplatten oder PUR-Hartschaumplatten zum Einsatz.

Hinterlüftete Vorhangfassade

Während beim WDVS ein Verbund zwischen Dämmstoff und tragender Wand hergestellt wird, ist bei dieser Maßnahme ein mehrschichtiger Aufbau zu verzeichnen. Auf die zu dämmende Wand wird eine Unterkonstruktion montiert, dann werden die Dämmplatten ein- oder zweilagig auf die Wand geklebt bzw. gedübelt. Fassadenseitig vor der Dämmebene wird ein Luftspalt freigehalten, über den Feuchtigkeit aus eingedrungenem Regenwasser, Oberflächenkondensat etc. abgeführt werden kann. Genaue Anforderungen zur Größe der Belüftungsöffnungen finden sich in einschlägigen DIN-Normen. Den Abschluss und Wetterschutz bildet dann eine davor gesetzte Beplankung mit Fassadenplatten.

Wichtig ist die winddichte Montage der Dämmplatten, da ansonsten kalte Luft hinter die Dämmebene geraten und eine Abkühlung der Wand bewirken kann. Glasvliesoberflächen auf Mineralfaserdämmplatten stellen i.d.R. eine ausreichend luftdichte, aber wasserdampfdiffusionsoffene Schicht dar. Ansonsten ist im Einzelfall der Einbau einer wasserdampfdiffusionsoffenen Unterspannbahn angezeigt.

Im Gegensatz zum WDVS müssen hier Dämmstoff und Unterkonstruktion über eine bauaufsichtliche Zulassung verfügen. Davon ausgenommen sind sog. "Halbzeuge", deren Brauchbarkeit rechnerisch nachzuweisen ist (z. B. Aluminium, Kupfer, Titanzink) und kleinformatige Platten zur Fassadenbekleidung (Liste C des DIBt).

Eine Schwachstelle dieses Systems stellt die Unterkonstruktion dar, wenn sie direkt auf die Wand montiert wird, da sie dann den Dämmstoff durchdringt und somit eine Wärmebrücke bildet. Anzustreben ist deshalb der Einsatz von z.B. Aluminium-Abstandhaltern, durch die die Unterkonstruktion vor eine erste Dämmebene verschoben wird.

Hier kommen als Dämmstoffe häufig Platten aus Mineralwolle oder Hartschaumplatten zum Einsatz.

Als Außenwandbekleidung werden häufig Holzbretter oder -schindeln, Schieferplatten, Steinplatten, Faserzementplatten, Aluminiumplatten o.ä. verwendet. Die o.g. bauaufsichtliche Zulassung gilt immer für spezielle Kombinationen aus Dämmstoff, Unterkonstruktion und Fassadenbekleidung. Eine beliebige Kombination dieser Einzelkomponenten ist nicht zulässig.

Anforderungen der EnEV 2009

Sollen Außenwände beheizter Räume mit einem U-Wert über $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ neu verputzt werden, so ist eine Wärmedämmung obligatorisch. Dies gilt erfahrungsgemäß für die meisten Gebäude, die vor ca. 1990 erbaut wurden. Ferner wird gefordert, dass bei allen neuen Außendämmungen ein Wärmedurchgangskoeffizient von maximal $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreicht wird, wobei bei Vorhangfassaden der Anteil der Unterkonstruktion zu berücksichtigen ist. Dämmmaßnahmen mit einer geringeren Einsparung sind nicht zulässig.

Innendämmung

Im Gegensatz zur unter 1.1 beschriebenen Außendämmung wird bei der Innendämmung die Dämmebene raumseitig auf die Außenwände aufgebracht. Dies ist z.B. oftmals gefordert, wenn Gebäude unter Denkmalschutz stehen und deshalb keine Veränderungen an der Außenfassade vorgenommen werden dürfen, wenn aufgrund räumlicher Gegebenheiten keine Außendämmung möglich ist, Kellerräume nachträglich gedämmt werden sollen o.ä..

Auch ist sie geeignet für Gebäude, die regelmäßig nur kurzzeitig aufgeheizt werden sollen, da dann nicht die gesamte Wandkonstruktion aufgeheizt werden muss.

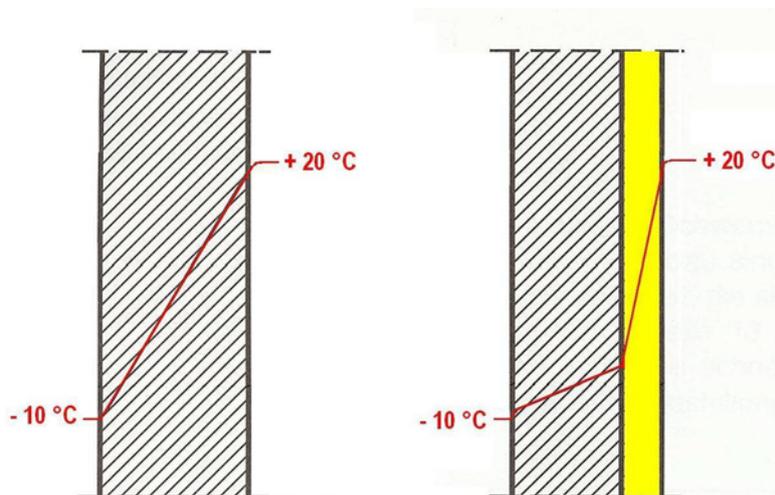


Abbildung 6: Prinzip der Innendämmung:

Die rote Kurve zeigt den Temperaturverlauf innerhalb der Wandkonstruktion ohne (links) und mit (rechts) Innendämmung (gelb dargestellt) bei einer Außentemperatur von -10°C und einer Raumtemperatur von $+20^{\circ}\text{C}$. Ohne Dämmung fällt die Temperatur in der Wand annähernd linear ab. Mit Innendämmung findet der Temperaturabfall überwiegend innerhalb des Dämmstoffs ab. Möglicherweise anfallendes Kondensat befindet sich hier zwischen Dämmstoff und Wand. Dort kann es zu versteckter Schimmelbildung und zur Setzung des Dämmstoffs kommen, zumal das Kon-

Im Regelfall handelt es sich bei einer Innendämmung um eine mehrschichtige Konstruktion. Auf die vorhandene Wand werden eine Tragekonstruktion und der Dämmstoff aufgebracht, raumseitig schließt sich dann eine Dampfbremse bzw. Sperre und eine Verkleidung an. Die Dampfbremse bzw. Sperre^{II)} ist immer dann erforderlich, wenn die Verkleidung nicht wasserdampfdiffusionsdicht ist.

Ansonsten könnte warme Raumluft mit einem entsprechend hohen Wasserdampfgehalt in die Dämmschicht eindiffundieren und dort abkühlen, worauf es zur Bildung von Kondensat kommt, das ein Zusammensacken des Dämmstoffs und die Ansiedlung von Schimmelpilzen nach sich ziehen kann. Die Dampfbremse ist in der Regel eine PE-Folie mit einer Stärke von 0,2 bis 0,3 mm, die diese Diffusion unterbindet. Alternativen sind Kraftpapiere, die auftapeziert werden, Schaumglasplatten (insbesondere für stark feuchtebelastete Räume) oder Anstriche (Dispersionen, Bitumen, Ölfarben, Polyurethan). Ihr Einbau und insbesondere der dichte Anschluss an die Rohdecken, Fensteranschlüsse, Installationsöffnungen etc. erfordert große Sorgfalt, da es ansonsten zur o.g. Kondensatbildung kommen kann, wobei aufgrund der fehlenden Hinterlüftung ein Abtrocknen des Kondensats u.U. nicht stattfinden kann. Zur Herstellung dichter Anschlüsse stehen doppelseitige Klebebänder aus Butylkautschuk, vorkomprimierte Fugendichtungsbänder, Acryl- oder Korkkleber oder Silikon-

^{II)} Grundsätzlich Dampfbremse oder Sperre, je nach Dampfdruck. Bei einem Sd-Wert gleich größer 100 handelt es sich in der Regel um eine Dampfsperre.

bzw. Acryldichtungsmassen für Fugenverschlüsse zur Verfügung. Stöße von Folien sind überlappend mit Butylkautschuk-Klebebändern zu verbinden und zusätzlich mit einer Anpresslattung auf der Ständerkonstruktion zu fixieren.

Neben der Ausführung mit einer Unterkonstruktion gibt es hier auch Systeme, bei denen Verbundplatten aus Dämmstoff, integrierter Dampfbremse und Deckplatte eingesetzt werden, Innenputzsysteme, bei denen die Dämmplatten direkt verputzt werden oder Dämmputze, die direkt auf die Wand aufgetragen werden.

Verbundplatten werden meistens aus Hartschaum oder Mineralwolle mit einer Gipskarton- oder Gipsfaserplattenbeplankung hergestellt. Als Dämmschicht in Dämmungen mit Unterkonstruktion sind Mineralfasern oder Zellulosedämmungen gebräuchlich.

Die Luftdichtheit der Verbundplattenstöße wird dann durch ein Verspachteln erreicht, wobei ein Armierungsgewebe eingezogen wird. Um eine Rissbildung auch im Bereich von Anschlüssen zu erreichen, sind hier dauerelastische Dehnungsfugen aus Silikon oder Acryl vorzusehen, die nicht verspachtelt werden dürfen.

Als direkt verputzte Dämmplatten kommen z.B. Holzwolleleichtbauplatten, Polyurethan- oder Polystyrolplatten (ggf. mit integrierter Dampfbremse) oder Calciumsilikatplatten zum Einsatz. Wichtig ist hier die Verwendung eines diffusionsoffenen Putzes, der ein schnelles Austrocknen der Dämmplatten nach Kondensatbildung ermöglicht. Die DIN 4108 nennt in Teil 3 Konstruktionen, die ohne Dampfbremse ausgeführt werden können. Dabei ist vorausgesetzt, dass die Wand gemauert ist, dass der Dämmstoff verputzt wird, um eine Luftdichtheit sicherzustellen und dass der Dämmstoff eine leicht dampfbremsende Wirkung hat (S_d -Wert $> 0,5$ m). Demnach sind z.B. Hartschaumplatten oder Schaumglas als Materialien geeignet. In jedem Fall ist sicherzustellen, dass keine Fugen offen bleiben, über die Raumluft direkt an die kühle Außenwand diffundieren kann und dort dann kondensiert.

Die Stärke des Dämmstoffs muss einzelfallbezogen festgelegt werden, wobei sie im Regelfall ca. 8 cm beträgt (bei einer Wärmeleitfähigkeit von $0,35$ W/(mK)), da größere Stärken verhältnismäßig geringe Einsparsteigerungen ergeben, andererseits aber zu größeren Grundflächenverlusten in den Räumen führen. Grund für diese Begrenzung der Effizienz ist die Tatsache, dass einige Wärmebrücken – im Gegensatz zur Außendämmung – nicht komplett ausgeschaltet werden können, z.B. Innenwände im Randbereich zu Außenwänden und Geschossdecken. Hier ist zu beachten, dass die Dämmung auch noch den Randbereich (30 bis 50 cm breiter Randstreifen) der angrenzenden Bauteile (Innenwand bzw. einbindende Geschossdecke) mit einbeziehen muss, da es ansonsten in genau diesen Bereichen aufgrund des starken Temperaturgefälles zu einer Kondenswasserbildung kommen kann. Gleiches gilt für Fenster- und Außentürlaibungen.

Wie bei der Außendämmung ist auch hier bei Anwendung einer Unterkonstruktion zu berücksichtigen, dass diese eine Wärmebrücke darstellen kann. Sinnvoll kann daher

ein Aufbau mit zwei Dämmlagen sein, wodurch eine Trennung von Lattung und Konterlattung und damit eine flächige Dämmschicht erreicht werden kann.

Auch bei dieser Dämmvariante werden bei sachgemäßer Ausführung raumseitig höhere Oberflächentemperaturen an den Außenwänden erreicht, was die Behaglichkeit steigert und die Gefahr von oberflächlicher Schimmelbildung aufgrund durch Kondenswasser befeuchteter Abschnitte verringert.

Emissionen der verwendeten Dämmstoffe könnten prinzipiell in die Raumluft abgegeben werden, wobei nach heutigem Kenntnisstand bei den gängigen Materialien im Regelfall keine derartigen Emissionen zu erwarten sind^{III} und beim Einbau einer Dampfbremse u.U. eine wirkungsvolle Barriere vorliegt.

Berücksichtigt werden muss auch, dass in der Außenwand verlegte Leitungen nach erfolgter Innendämmung einer erhöhten Frostgefahr unterliegen, da die Wand dann wesentlich stärker auskühlen wird. Gegebenenfalls müssen daher im Vorfeld Wasser- oder Abwasserleitungen verlegt werden.

Auch muss berücksichtigt werden, dass z.B. bei Holzbalkendecken die in der Außenwand sitzenden Balkenköpfe stärker auskühlen und bei einem Eintritt von warmer Raumluft sehr leicht durch Kondensat bzw. sich dadurch ansiedelnde Pilze geschädigt werden können. Hier muss daher entweder eine gezielte Dämmung der Balken erfolgen oder aber ein Zutritt von Raumluft in die Deckenkonstruktion zuverlässig unterbunden werden. Voraussetzung dabei ist, dass ein Zutritt von Feuchtigkeit in die Holzbalkendecke – z.B. über Schlagregen – ausgeschlossen ist.

Schließlich muss auch hier sichergestellt sein, dass keine Feuchtigkeit (z.B. durch aufsteigende Feuchtigkeit o.ä.) in der Wand auftritt, da nach Anbringung der Dämmung ein Abtrocknen nicht mehr erfolgen wird.

Sofern in beheizten Räumen Außenwände mit einem U-Wert über $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ mit einer Bekleidung oder Verschalung versehen werden, so muss laut den Anforderungen der EnEV 2009 nach erfolgter Sanierung für den gesamten Wandaufbau ein U-Wert von maximal $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreicht werden. Im Regelfall genügt hier eine 8 cm starke Innendämmung. Gegenüber der Außendämmung gelten hier also verminderte Anforderungen hinsichtlich des Dämmumfangs. Ausnahmen sind bei einer nachweislichen Nichtwirtschaftlichkeit der Maßnahme möglich.

^{III} Bei der Verwendung von Polystyrolplatten kann es anfangs noch zu einer Freisetzung von herstellungsbedingten Restmonomeren des gesundheitsgefährdenden Styrols kommen, die allerdings innerhalb weniger Monate komplett verschwindet.

Dämmung der Dachkonstruktion

Die Dachkonstruktion älterer Gebäude stellt erfahrungsgemäß häufig eine energetische Schwachstelle dar, weshalb hier einige Sanierungsmaßnahmen ansetzen.

Häufig wird im Zuge der nachträglichen Dämmung der vorhandene Dachstuhl samt Eindeckung belassen und mit einer Zwischensparrendämmung versehen, bei der die Dämmung also zwischen den vorhandenen Sparren eingebaut wird. Alternativ kann – sofern das Dach neu eingedeckt werden soll und z.B. die Sparrendicke nicht als Dämmstärke ausreicht – auch eine Aufsparrendämmung vorgenommen werden.

Zwischensparrendämmung

Grundsätzlich wird unterschieden zwischen einer *Kaltdach-* und einer *Warmdachkonstruktion*.

Das Kaltdach ist eine zweischalige, belüftete Konstruktion. Ähnlich wie bei der Vorhangfassade (s. 1.1) wird hier raumseitig die Dämmebene mit einer Dampfbremse versehen, die ein Eindringen von Feuchtigkeit über Raumluft verhindern soll. Auf der nach außen liegenden Seite der Dämmung wird eine diffusionsoffene Winddichtung (Unterspannbahn oder festes Unterdach) eingezogen, die den Eintritt von Schlagregen, eingedrungenem Schnee o.ä. in den Dämmstoff verhindern soll. Sie wird an die Dachrinne angeschlossen, so dass anfallendes Wasser direkt abgeleitet wird. Ferner kann aufgrund der diffusionsoffenen Bauweise Feuchtigkeit im Dämmstoff nach außen entweichen. Oberhalb der Unterspannbahn schließt sich dann die Konstruktion der eigentlichen Dacheindeckung an. Dabei ist wichtig, dass die Unterspannbahn nicht gegen die Unterkonstruktion gedrückt werden darf, wenn z.B. der Dämmstoff nicht maßhaltig ist.

Dagegen verfügt das *Warmdach* über keine Belüftung, sondern hier ist die Dachhaut direkt auf dem Dämmstoff aufgebracht. Um eine Kondensatbildung zu vermeiden, wird auf der raumzugewandten Seite des Dämmstoffs eine Dampfsperre eingebaut.

Als Luftdichtung bzw. Dampfbremse / -sperre werden häufig Aluminiumfolien von 0,05 mm Stärke oder PE-Folien (Stärke mindestens 0,2 mm) eingesetzt. Auch sog. adaptive Dampfbremsschichten sind erhältlich, deren Diffusionswiderstand je nach relativer Luftfeuchte (Sommer / Winter) verschieden ist, um ein bestmögliches Austrocknen der Dachkonstruktion im Sommer und gleichzeitig eine gute Diffusionsbegrenzung im Winter zu ermöglichen. Auch beschichtete Kraftpapiere oder Holzwerkstoffplatten, deren Fugen und Anschlüsse mit Klebestreifen abgedichtet werden müssen, können eingesetzt werden.

Zur Abdichtung von Fugen stehen die zuvor genannten Materialien zur Verfügung.

Als winddichtende Schicht werden diffusionsoffene Unterspannbahnen (Sd-Wert zwischen 0,04 und 5,0 m) aus PE oder aber Unterdächer aus bituminierten Holzweichfaserplatten oder Holzschalungen mit einer Auflage aus Bitumendachbahnen eingesetzt.

Aufsparrendämmung

Im Gegensatz zur Zwischensparrendämmung wird hier die Dämmung von außen auf den bestehenden Dachstuhl aufgebaut. Wichtig ist eine vorherige statische Prüfung.

Ein wichtiges Detail ist die dichte Fortführung der Dampfbremse / -sperre an der über den Ortgang hinauslaufenden Holzschalung. Die Folie wird hier üblicherweise mit einem vorverdichteten Fugenband auf dem Mauerwerk angepresst, um zu verhindern, dass Außenluft in den Dämmstoff dringen kann und es dadurch zu einer Auskühlung des Dämmstoffes kommt.

Weitere Probleme können auftreten hinsichtlich der Luftdichtigkeit, da die Sparren i.d.R. als Sichtsparren raumseitig unterhalb der Luftdichtigkeitsebene liegen. Die Durchdringungen der Sparren durch die Außenwände müssen daher luftdicht verschlossen werden, wobei sich die dichte Ausführung häufig schwierig gestaltet, da nicht nur das Drempelmauerwerk, sondern auf die einzelnen Sparren dicht mit Klebeband eingebunden werden müssen.

Alternativ können z.B. die Sparrenköpfe zurückgeschnitten und die Dampfbremse bzw. /-sperre an das Mauerwerk angebunden werden, bevor neue Sparrenköpfe hergestellt werden.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Untersparrendämmung dar, bei der – i.d.R. in Kombination mit einer Zwischensparrendämmung – auf der Innenseite eine zusätzliche Dämmung erfolgt, wenn die Sparrenstärke nicht ausreicht und eine Neueindeckung nicht stattfinden soll oder kann.

Einfluss von Wind

Da das Dach gegenüber den sonstigen Gebäudeteilen besonders exponiert ist, treten hier je nach Windrichtung und –stärke die stärksten Beeinflussungen hinsichtlich der Luftströmungen auf.

Aber auch die Steilheit des Daches spielt hierbei eine bedeutende Rolle:

Bei relativ flachen Dächern (Dachneigung $< 30^\circ$) entsteht durch die vorbeiziehende Luft ein Unterdruck oberhalb der Dachhaut, so dass Luft von innen nach außen strömt.

Bei steileren Dächern bildet die Dachhaut auf der windzugewandten Seite (Luv) zumindest im unteren Bereich eine Angriffsfläche, wodurch die Außenluft einen Überdruck bewirkt und Luft von außen nach innen strömt. Im Bereich des Firsts und der windabgewandten Seite (Lee) dagegen bildet sich oberhalb der Dachhaut ein Unterdruck aus und Luft strömt von innen nach außen.

Angesichts dieser Druckdifferenzen bzw. Strömungen können sehr große Luftmengen innerhalb kurzer Zeit durch die Dachkonstruktion bewegt werden. Eine unsachgemäße Ausführung der Dampfbremse / -sperre ist deshalb besonders kritisch, da

einströmende Warmluft aus dem Wohnbereich viel Feuchtigkeit mitführt, die beim Kondensationsvorgang zu einer erheblichen Befeuchtung des Dachstuhls führt. Nachfolgend kann es zu schwerwiegenden Schäden der Konstruktionshölzer (Ansiedlung holzerstörender Pilze, Verfaulen etc.) kommen.

Eine Fuge von nur 1 mm Breite und 1 m Länge in der eingebauten Dampfbremse kann – verglichen mit der Wasserdampfdiffusion über 1 m² der Dachfläche - die bis zu 2.700-fache Wasserdampfmenge in der gleichen Zeit in diesen Bereich befördern.

Kritische Bereiche hinsichtlich der Luftdichtheit – aber auch der Winddichtigkeit - stellen erfahrungsgemäß häufig Anschlüsse von Durchdringungen des Daches (z.B. Abwasserentlüftungsrohre, Dachfenster, Kamine), Anschlüsse von Dachgauben oder Dachfenstern, Zwischenräume von eingezogenen Trockenbauwänden, die mit dem Spitzboden in Verbindung stehen oder Beschädigungen der Dampfbremse durch nachträglich eingezogene Installationen dar. Entstehende Anschlussfugen können durch geeignete Klebebänder mit zusätzlichen Anpresslattenkonstruktionen und vorverdichteten Fugenbändern abgedichtet werden.

Vorzuziehen ist allerdings eine vorausschauende Planung, die z.B. durch eine vor die Luftdichtheitsschicht vorgezogene Installationsebene derartige Durchdringungen bestmöglich vermeidet.

Ferner tritt bei unsachgemäßer Ausführung Zugluft auf, die der Behaglichkeit entgegensteht. In Dachgeschossen wurden an windigen Tagen schon Luftwechsel von 17 h⁻¹ gemessen.⁴³

Laut Anforderungen der EnEV 2009 müssen Dächer von Altbauten einen U-Wert von 0,24 W / (m²K) einhalten, wenn im Zuge einer Sanierung mindestens 10% der Dachfläche erneuert werden sollen.

Dämmung der Kellerdecke oder der Bodenplatte

Eine Dämmung der Kellerdecke wirkt sich in erster Linie positiv auf die Fußwärme im EG und damit auf die Behaglichkeit aus. Infolge dessen müssen die betroffenen EG-Räume weniger stark beheizt werden, was den Energieverbrauch reduziert.

Hier kommen verschiedene Konstruktionen zum Einsatz, z.B. Platten aus Polystyrol o.ä., die direkt auf die Unterseite der Kellerdecke geklebt und gedübelt werden oder aber Dämmungen aus Mineralwolle mit einer Beplankung und entsprechender Unterkonstruktion.

Probleme mit Tauwasserbildung sind hier im Normalfall nicht zu erwarten, da die Dämmung auf der unbeheizten Seite der Decke erfolgt.

Eine nachträgliche Dämmung der Bodenplatte im Bestand ist im Regelfall kaum umsetzbar.

Die EnEV 2009 fordert einen maximalen U-Wert von $0,30 \text{ W} / (\text{m}^2\text{K})$. Ist dies aus technischen Gründen nicht möglich, so gelten die Anforderungen als erfüllt, wenn die maximal mögliche Dämmstoffstärke mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,040 \text{ W} / (\text{mK})$ eingebaut wird.

Dämmung sonstiger Geschossdecken

Dämmung der obersten Geschossdecke

Soll die oberste Geschossdecke anstelle der Dachschrägen (s. Kapitel 1.3) gedämmt werden, so bleibt der Dachboden kalt. Hier kann es zu Problemen kommen, wenn warme und feuchte Raumluft durch eine undichte Einstiegluke in diesen Bereich strömen, da die Luke eine Öffnung der luftdichten Ebene darstellt. Daher ist bei einer derartigen Dämmung unbedingt eine Dichtung der Dachleiterklappe vorzusehen. Dies kann durch das Anbringen einer aufliegenden Dämmplatte und die Einnutung einer umlaufenden Lippendichtung im Rahmen erfolgen.

Die Dämmung selbst ist i.d.R. unproblematisch und kann durch aufgelegte Dämmplatten, die entweder direkt begehbar sind oder aber mit (diffusionsoffenen!!) trittfesten Platten belegt werden. Wichtig ist das direkte Aufliegen der Platten auf der Decke, da im Falle der Hinterlüftung durch kalte Luft die Dämmwirkung abgeschwächt wird. Aus diesem Grund werden die Dämmplatten oder -matten zweilagig mit versetzten Stößen verlegt, um die Wärmebrücken der Stoßnähte zu verringern. Um eine Hinterlüftung der Deckenkonstruktion auszuschließen muss eine Winddichtigkeit hergestellt werden.

Empfohlen wird eine diffusionshemmende Folie unter der Dämmschicht, wenn eine dampfdichtere Abdeckung auf den Dämmstoff gelegt wird und die Geschossdecke darunter eine diffusionsoffene Holzbalkenkonstruktion ist. Hintergrund ist der mögliche Feuchtigkeitseintrag über Raumluft durch die Holzbalkendecke.

Eine Alternative bei nicht zugänglichen Spitzböden kann ein Einblasen von Dämmstoff (z.B. Zelluloseflocken oder Perlite) in diesen Bereich sein.

Anforderungen der EnEV 2009

Zum 31.12.2011 wurde eine Dämmung der obersten Geschossdecke unter unbeheizten Dachräumen gefordert, die für diese Decke einen U-Wert von $0,24 \text{ W} / (\text{m}^2\text{K})$ erreicht. Dies gilt für alle begeh- und nicht begehbaren, aber zugänglichen Dachgeschosse, sofern nicht das darüber liegende Dach gedämmt wird.

Fenster und Außentüren

Fenster und Außentüren können sowohl aufgrund unzureichenden Dämmvermögens als auch aufgrund von undichten Fugen zu Energieverlusten führen. Ferner verringern die kalten Glasoberflächen die Behaglichkeit im betreffenden Raum erheblich. Hier setzen zahlreiche Sanierungen an, indem derartige Bauteile durch neuartige Bauteile mit besseren Standards ersetzt werden.

a) Fenster

Nach heutigem Stand weisen einfachverglaste Fenster, aber auch Zweischeiben-Isolierglas, wie es bis Mitte der 1990'er Jahre üblich war, unzureichende Dämmeigenschaften auf, die gegenüber den heutigen Standards einen etwa um ca. 50% schlechteren Wärmeschutz bewirken.

Der Wärmeschutz von Verglasungen wird durch den U_g -Wert beschrieben, der den Wärmeenergiedurchgang durch die Scheibe in Abhängigkeit von Fläche und Temperaturdifferenz beschreibt.

Nachfolgende Tabelle stellt einige Verglasungsarten und typische U_g -Werte gegenüber⁴⁴:

Verglasung	U-Wert (W / (m ² K))
Einscheibenglas	5,6
Zweischeibenisolierglas	2,9 – 3,1
Dreischeibenisolierglas	2,1
Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung	1,1 – 1,6
Dreischeibenwärmeschutzverglasung	0,4 – 0,8

Tabelle 1: Typische Werte zum Wärmeschutz von Glas

Das im Gebäudebestand verbreitete *Zweischeibenisolierglas* besteht aus zwei Scheiben, die über einen Aluminiumrandverbund miteinander verbunden sind. Seit Einführung der Wärmeschutzverordnung von 1995 dürfen derartige Verglasungen nicht mehr eingebaut werden.

Dreischeibenisolierglas wurde als Weiterentwicklung – nicht zuletzt im Hinblick auf Schallschutz - eingebaut.

Die *Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung* ist prinzipiell ähnlich wie das Zweischeibenisolierglas aufgebaut, wobei eine Edelgasfüllung des Zwischenraumes und eine

dünne, unsichtbare Metallbedampfung der raumseitigen Scheibe im Zwischenraum zu einer Verbesserung gegenüber dem Zweischeibenisolierverglasung um 50 – 65 % führen. Die Metallbedampfung bewirkt eine Reflexion von Wärmestrahlung in den Raum, so dass ein Teil der Strahlungswärmeverluste zurück gewonnen werden kann bzw. bei Südausrichtung im Jahresmittel sogar mehr Wärmeenergie durch Sonneneinstrahlung gewonnen werden kann als über die Fensterfläche verloren wird. Da die verwendeten Scheiben hinsichtlich Stärke und Gewicht vergleichbar zu den althergebrachten Zweischeibenisolierverglasungen sind, können sie im Regelfall problemlos anstelle dieser eingebaut werden.

Die *Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung* schließlich ist derzeit die effektivste Verglasung. Hier wird eine dritte Scheibe sowie eine zusätzliche Metallbedampfung und die Füllung mit Argon oder Krypton verwendet. Beim Einbau dieser Verglasungen muss berücksichtigt werden, dass die Glasfläche im Winter aufgrund des guten Wärmeschutzes u.U. wärmer ist als die – nicht gedämmten – Außenwände und es darauf hin dort zu Kondenswasserbildung kommen kann.

15 bis 35 % der Fensteröffnung werden allerdings nicht von der Verglasung, sondern vom Fensterrahmen eingenommen, weshalb auch über den Rahmen größere Energieverluste auftreten.

Die Rahmen sind kammerartig aufgebaut, um eine bestmögliche Dämmung und thermische Entkopplung zu erreichen.

Je nach Aufbau und Material des Rahmens variieren hier die Wärmedurchgangskoeffizienten erheblich. So beträgt der U-Wert für übliche Holzrahmen 1,4 bis 1,7 W / (m² K), für ältere, zweikammerige PVC-Rahmen 2,8 W / (m² K), für neue PVC-Rahmen mit sieben Kammern nur noch 1,1 W / (m² K).

Die teilweise noch anzutreffenden Aluminiumrahmen ohne Isoliersteg weisen U-Werte von 5 bis 6 W / (m² K) auf, während thermisch optimierte Profile mit einer internen Entkopplung durch Kunststoff-Abstandhalter bei ca. 1,5 W / (m² K) liegen. Hochdämmende Rahmen weisen U-Werte von ca. 0,8 W / m² K auf. Diese gehen in den U_w-Wert ein, der im Gegensatz zum o.g. U_g-Wert den Wärmedurchgangskoeffizienten für das gesamte Bauteil (Rahmen, Verglasung und Glasrandverbund) beschreibt.

Vor diesem Hintergrund muss heute jedes Fenster, das als Ganzes getauscht wird, eine Wärmeschutzverglasung und einen gedämmten Rahmen besitzen (s.u.).

Anforderungen der EnEV 2009

Bei einer kompletten Fenstererneuerung in beheizten Räumen fordert die EnEV 2009 für das gesamte Fenster (also Verglasung mit Rahmen und Glasrandverbund) einen U_w-Wert von maximal 1,3 W / (m²K). Soll der (bereits gedämmte) Rahmen erhalten bleiben und nur die Verglasung ausgetauscht werden, darf diese maximal einen U_g-Wert von 1,1 W / (m²K) besitzen.

b) Außentüren

Die Dämmeigenschaften von Türen hängen in erster Linie vom verwendeten Material und der Konstruktion bzw. der Dicke der Tür ab. Nachfolgend sind einige Beispiele aufgeführt:

Türkonstruktion	U-Wert (W / (m ² K))
Vollholz oder Kunststoff, 40 mm stark	2,2 W / (m ² K)
Schwere Vollholztür, 60 mm stark	1,7 W / (m ² K)
Holztür mit großflächiger Verglasung aus - 7 mm Drahtglas - 20 mm Isolierglas	4,5 W / (m ² K) 2,8 W / (m ² K)
Leichtmetallrahmentür mit großflächiger Verglasung aus - 7 mm Drahtglas - 20 mm Isolierglas	5,5 W / (m ² K) 3,5 W / (m ² K)
Holz- oder Kunststofftüren im Neubau (Standard)	1,9 W / (m ² K)
Wärme gedämmte Holz- / Kunststofftür mit Dreifachglas	0,7 W / (m ² K)

Tabelle 2: Dämmeigenschaften von Türen

Anforderungen der EnEV 2009

Bei einer Erneuerung von Außentüren dürfen nur Türen eingebaut werden, deren Türfläche einen U-Wert von maximal 1,9 W / (m²K) besitzt.

Maßnahmen zur Verringerung von Lüftungsverlusten

Lüftungsverluste entstehen sowohl beim aktiven Lüften als auch durch Leckagen der Gebäudehülle.

Aktive Lüftung

Im Durchschnitt geht man davon aus, dass der Anteil der Lüftung an den Wärmeverlusten eines Altbaus (Baujahr bis Anfang der 1970'er Jahre) ca. 20 bis 35 % beträgt.

Bei Altbauten mit dichten Fenstern und Außentüren, die gemäß der Vorgaben der EnEV 2009 saniert wurden, liegt der Anteil der Lüftungsverluste an den verbleibenden Wärmeverlusten bei bis zu 45 %, da teilweise unsachgemäß gelüftet wird und andererseits die Transmissionsverluste über die gedämmten Außenwände sehr stark zurückgegangen sind.

Bei Niedrigenergiehäusern steigt der Lüftungsanteil aus dem letztgenannten Grund sogar auf bis zu 67 %, da hier die Transmissionsverluste über die Außenwände durch entsprechende Dämmmaßnahmen massiv verringert werden. Hier muss die Lüftung über eine schlüssig konzipierte technische Anlage erfolgen, um zuverlässig Feuchteschäden etc. zu vermeiden.

Als Maß für die Lüftung wird die sog. Luftwechselrate „n“ herangezogen. Sie gibt an, wie oft das Raumvolumen pro Stunde ausgetauscht wird. Die EnEV rechnet für normal undichte Gebäude mit einem Wert von $n = 0,7 \text{ h}^{-1}$ und für luftdichtheitsgeprüfte Gebäude ($n_{50} \leq 3 \text{ h}^{-1}$) mit $n = 0,6 \text{ h}^{-1}$.

Proportional zum ausgetauschten Luftvolumen und damit der Luftwechselrate nehmen logischerweise die Energieverluste zu.

Bei allen Maßnahmen zur Abdichtung der Gebäudehülle – z.B. nach dem Einbau neuer Fenster - muss einer angemessenen Belüftung unbedingt Rechnung getragen werden, da erfahrungsgemäß aufgrund der dicht schließenden Fenster der natürliche Luftwechsel der Gebäude erheblich reduziert wird. Daraus resultierend kann es zu einer Erhöhung der Luftfeuchte und nachfolgender Kondenswasserbildung an kühlen Abschnitten der Außenwandoberflächen kommen, die die Ansiedlung von Schimmelpilzen etc. nach sich ziehen.

Auch im Hinblick auf die Anreicherung von Kohlendioxid oder vorhandenen Raumluftschadstoffen, die aus Baumaterialien oder Verbrauchsprodukten emittiert werden, ist eine verstärkte gezielte Lüftung der Räume notwendig.

Insbesondere das in der ausgeatmeten Luft oder bei Verbrennungsprozessen entstehende Kohlendioxid führt bei höheren Konzentrationen zu Befindlichkeitsstörungen, Ermüdung und Konzentrationsstörungen. Als maximal zulässige Konzentration gilt hier ein Wert von 0,1%.

Abhängig von der Anzahl der anwesenden Personen, deren Größe und körperlichen Aktivität wird eine mehr oder weniger große Menge an Kohlendioxid in die Raumluft abgegeben. Letztendlich hängt davon auch der Frischluftanteil ab, der durch Lüftungsmaßnahmen in den Raum eingebracht werden muss.

Ein zweiter ausschlaggebender Parameter ist die Raumluftfeuchtigkeit, also der in der Raumluft enthaltene Wasserdampf. Auch er wird größtenteils durch Aktivitäten der Raumnutzer freigesetzt (ausgeatmete Luft, Kochen, Duschen, Baden, Waschen etc.).

Unterschieden wird zwischen absoluter Feuchte (angegeben in g Wasserdampf / m³ Luft) und relativer Feuchte (angegeben in % der maximal von der Luft aufnehmbaren Wasserdampfmenge).

Mit zunehmender Temperatur kann Luft deutlich mehr Wasserdampf aufnehmen, was bedeutet, dass zwar die absolute Luftfeuchte beim Erwärmen oder Abkühlen gleich bleibt, die relative Luftfeuchte dagegen ab- bzw. zunimmt. Steigt die relative Luftfeuchte – z.B. in der Nähe kühler Oberflächen - auf Werte um ca. 80%, so können sich hier bereits Schimmelpilze ansiedeln, ab 100 % kommt es zum Niederschlagen von Kondenswasser.

Empfohlen werden für die relative Luftfeuchte Werte von 40 bis 65 %.

Grundsätzlich lassen sich die manuelle Fensterlüftung und die Lüftung über technische Lüftungsanlagen unterscheiden. Die Diffusion von Wasserdampf von innen durch die Außenwände nach außen kann dagegen vernachlässigt werden. So beträgt der Anteil dieses Transportwegs beispielsweise bei Mauerziegelwerk (gilt als besonders diffusionsoffen) nur 2 bis 5 % der über die Fenster ausgetauschten Luftmenge. Relevant ist hier in erster Linie der Innenputz bzw. die Innenwandbekleidung, also die ersten 1 bis 2 cm, in denen Wasserdampf vorübergehend gespeichert (sorbiert) wird, bevor er wieder an die Raumluft abgegeben wird bzw. zu vernachlässigbaren Anteilen in die Wand eindringen kann.

Ein gutes Sorptionsvermögen besitzen z.B. Naturfasern, Papier und poröse Holzweichfaserplatten, mineralische Kalk- oder Lehmputze sowie unbehandeltes Holz nehmen auch noch größere Mengen an Wasserdampf auf, während lack- oder Ölfarbenanstriche, Kunststoffoberflächen, keramische Fliesen oder Zementputze keinen oder nur vernachlässigbare Mengen an Wasserdampf speichern können.

Manuelle Lüftung

Beim Öffnen der Fenster drängt die Raumluft aufgrund von Thermik nach oben und strömt durch das Fenster ab. Das Bestreben der Luft ist dabei umso größer, je größer die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen ist. Dieser Zusammenhang gilt als die bedeutendste Antriebskraft bei der manuellen Lüftung.

Allerdings sollte die Lüftung entweder mittels mehrmaliger Stoß- bzw. Querlüftung oder einer raumlufttechnischen Anlage (im Idealfall mit Wärmerückgewinnung) und

nicht über Kipplüftung der Fenster erfolgen, da es ansonsten zu einer starken Auskühlung der Fensterlaibungen und des Fenstersturzes kommt und größere Wärmeverluste auftreten.

Eine weitere wichtige Einflussgröße stellt Wind dar, der schon bei geringen Geschwindigkeiten (5 m/s) und gekipptem Fenster aufgrund von Über- oder Unterdruckbildung zu einer Verdopplung der ausgetauschten Luftmenge führen kann.

Neben dem gezielten Lüften über geöffnete Fenster können auch regulierbare Lüftungsspalten im Fensterrahmen eingebaut werden, die aufgrund von Druckunterschieden zwischen innen und außen dosierbare Luftmengen durchziehen lassen.

Als Durchschnittswerte werden für verschiedene Lüftungsarten folgende Luftwechselraten angegeben:

Lüftungsart	durchschnittliche Luftwechselrate
Fenster und Türen dicht	0,1 – 0,3 h ⁻¹
undichte Häuser (Mittelwert)	≤ 2,0 h ⁻¹
regulierbare Lüftungsspalte (Dosierlüfter)	0,2 – 0,8 h ⁻¹
Kipplüftung	
- ohne Querlüftung	0,8 – 2,5 h ⁻¹
- mit Querlüftung	2 – 4 h ⁻¹
Stoßlüftung	
- ohne Querlüftung	9 - 15 h ⁻¹
- mit Querlüftung	> 20 h ⁻¹

Tabelle 3: Luftwechselraten bei verschiedenen Lüftungsarten

Technische Lüftung

Im Gegensatz zur manuellen Fensterlüftung kann eine technische Lüftungsanlage auch innen liegende Räume mit Frischluft versorgen, einen kontinuierlichen Luftaustausch sicherstellen und auch unabhängig von Belästigungen durch Außengeräusche, Maßnahmen des Einbruchschutzes o.ä. betrieben werden. Ferner besteht hier die Möglichkeit, der Abluft Wärme zu entziehen und damit Frischluft zu wärmen.

Vom Prinzip her handelt es sich immer um eine Abluftanlage, die im Bereich eines Raums mit erhöhter Feuchtigkeit (z.B. Badezimmer, Küche) Raumluft absaugt und nach außen führt. Durch den entstehenden Unterdruck strömt Luft aus benachbarten Räumen nach und ersetzt die abgesaugte Luft. Moderne Anlagen lassen über spezi-

elle Frischlufteinlässe in Außenwänden Außenluft einströmen, die dann von diesen Zulufräumen in Richtung der Absaugung nachströmt. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass in den Zulufräumen (i.d.R. die Räume mit den höchsten raumlufthygienischen Anforderungen, z.B. Schlaf-, Wohn oder Kinderzimmer) die beste Luftqualität vorliegt und dass z.B. keine Feuchtluft aus den Nassbereichen (sog. Ablufträume) in trockenere Räume dringt, wo es ansonsten zur Bildung von Kondenswasser kommen könnte. Die Räume dazwischen (z.B. Flure, offene Treppenhäuser etc.) werden als Überstromzonen bezeichnet.

Durch diese gezielte Luftführung kann die benötigte Luftzufuhr erfahrungsgemäß um 10 bis 15 % vermindert werden. Sinnvoll ist im Regelfall eine Querlüftung, die – im Gegensatz zur Einzelraumlüftung - alle Räume mit einbezieht.

Voraussetzung für eine gezielte Luftführung ist allerdings immer eine dichte Gebäudehülle, da schon kleine Leckagen zu sehr großen Luftdurchsätzen führen (s.o.).

Wärmerückgewinnung

Eine deutliche Erhöhung der Wirtschaftlichkeit lässt sich - allerdings in der Praxis bevorzugt bei Neubauten – häufig durch eine Wärmerückgewinnung erreichen.

Hier werden Zu- und Abluft durch einen Wärmetauscher geleitet, in dem sie direkt – nur durch sehr dünne Bleche oder Kunststofffolien getrennt – aneinander vorbeigeleitet werden.

Unterschieden werden Kreuzstromwärmetauscher mit quadratischen Plattenstapeln und Kreuzgegenstromwärmetauscher mit langgezogenen Austauschflächen. Der Anteil der rückgewonnenen Wärmeenergie beträgt dabei je nach Hersteller ca. 70 bis 90%. Beim Einbau muss dringend darauf geachtet werden, dass die Strecke des Luftkanals zwischen Außenwand und Wärmetauscher möglichst kurz und gut gedämmt ist, da es ansonsten an dessen Außenseite zum Niederschlagen von Kondenswasser kommen kann und Wärme verloren wird.

Ferner fällt bei niedrigen Außentemperaturen bei der Abkühlung der Abluft Kondenswasser an, das abgeleitet werden muss. Bei Außentemperaturen unter -5 °C kann es zum Gefrieren dieses Kondensats im Tauscher kommen, wobei der Plattenstapel beschädigt wird. Dementsprechend muss ein kleines elektrisches Heizregister in den Frischluftstrom eingebaut werden (ökologisch und energetisch nicht optimal) oder die angesaugte Luft wird über einen Erdreichwärmetauscher vorgewärmt.

Diese Erdreichwärmetauscher sind in einer Tiefe von ca. 1,8 m eingebaut, wo ganzjährig Temperaturen von 7 °C bis 14 °C vorliegen. Beim Erdreich-Luft-Wärmetauscher verlegt man das Ansaugrohr einfach im Erdreich und die angesaugte Luft wärmt sich auf dem Weg zum Lufteinlass des Wärmetauschers im Gebäude auf. Dabei werden relativ lange Rohrlängen (mehrere -zig Meter) zum Austausch benötigt. Bei hoher Feuchtigkeit der Außenluft kann es zu einem Niederschlagen von Kondenswasser im Rohrsystem kommen, weshalb die Rohre mit einseitigem Gefälle

(ca. 4%) und einer geeigneten Revisionsöffnung zur Reinigung versehen werden müssen. In einigen Fällen sind solche Wärmeregister aufgrund fehlender Radondichtigkeit als Ursache erhöhter Radonkonzentrationen identifiziert worden.

Beim Erdreich-Sole-Luft-Wärmetauscher wird die angesaugte Luft nicht durch das Erdreich geleitet, sondern in einem vorgeschalteten Wärmetauscher vorerwärmt, der seine Wärme indirekt über eine Sole aus dem Erdreich zieht, indem ein wässriges Wärmeträgermedium über eine Umwälzpumpe in einem Kunststoffrohrkreislauf durch das Erdreich geführt wird. Günstig wirkt sich dabei aus, dass der Wärmetauscher / das Lüftungsgerät nicht mehr unbedingt im Kellerraum aufgestellt werden muss, da der Sole-Kreislauf zum Erwärmen auch problemlos bis unter das Dach geführt werden kann. Nachteilig dagegen ist der zusätzliche Energieverbrauch aufgrund der Umwälzpumpe. Vorteilhaft ist dagegen, dass diese Installation auch zur Kühlung eingesetzt werden kann.

Eine Steigerung dieser Technologie stellen Kompaktgeräte dar. Sie werden in Passivhäusern eingesetzt. Hier wird die Abluft durch eine Kleinstwärmepumpe noch weiter heruntergekühlt, wobei Wärme zur Beheizung der Räume gewonnen wird.

Im Gegensatz zur einfachen Abluftanlage ist bei der Wärmerückgewinnung ein Anschluss aller Zu- und Abluftöffnungen erforderlich, da ja die angesaugten und die abgeleiteten Luftströme alle erfasst werden müssen. Dadurch ergibt sich ein deutlich umfangreicheres Kanalsystem im gesamten Gebäude. Aus energetischen Gründen sollten diese Kanäle einen geringen Strömungswiderstand aufweisen, Schalldämpfer enthalten und Revisionsöffnungen für regelmäßige Reinigungen besitzen.

Üblich sind hier Elemente aus Wickelfalzrohr aus verzinktem Stahlblech oder Kunststoff-Wellrohr. Eine Alternative stellen dezentrale WRG-Anlagen dar, die kein Kanalnetz benötigen.

Dichtheit der Gebäudehülle

Die Luftdichtheit eines Gebäudes betrifft den Luftaustausch durch die Gebäudehülle aufgrund von Druckdifferenzen zwischen Umgebung und Gebäudeinnerem.

Sie wird mittels eines Drucktest (landläufig Blower-Door-Test genannt^{IV}) ermittelt, indem in die Öffnung der Haustür oder eines Fensters ein Gebläse eingeklemmt wird, dass im Gebäude einen Über- oder Unterdruck gegenüber außen von 50 Pascal aufbaut. Dabei wird parallel die pro Stunde durchgesetzte Luftmenge ermittelt. Teilt man diesen Wert durch das Rauminhalt des Gebäudes, so erhält man den sog. n_{50} -

^{IV} Blower-Door ist der Firmenname eines Herstellers der Anlagen zur Messung. Diese legen mittlerweile sehr viel Wert darauf, dass der Name geschützt bleibt und untersagen die Verwendung dieser Bezeichnung, wenn nicht explizit dieses spezielle Gerät benutzt wird.

Wert, der die Luftwechselrate bei der vorgegebenen Druckdifferenz angibt. Dieser Wert ist das Maß für die Luftdichtheit. Teil 7 der DIN 4701 sieht für Neubauten mit Fensterlüftung maximal einen Wert von $n_{50} = 3\text{h}^{-1}$, für Neubauten mit Lüftungsanlage $n_{50} = 1,5\text{h}^{-1}$ und für zertifizierte Passivhäuser $n_{50} < 0,6\text{h}^{-1}$ vor.

Fenster und Türen

Neben den Dämmeigenschaften kommt auch der Dichtheit der Fugen an den Fenstern bzw. Außentüren eine große Bedeutung zu. Schon relativ kleine Undichtigkeiten können zu einem großen Luftaustausch führen, der mit entsprechenden Energieverlusten und Zuglufterscheinungen verbunden ist.

Dies betrifft einerseits deren ordnungsgemäßen Einbau, andererseits die Dichtungen an den Schließkanten der Bauteile.

Beim Einbau muss ein dichter Anschluss des Rahmens an die luftdichte Ebene der Wand sichergestellt sein. Diese wird bei einer massiven Wand durch den Innenputz gebildet. Der Anschluss wird durch ein Ausschäumen des Zwischenraums und eine Abdichtung mit z.B. einem vorverdichteten Fugenband bewerkstelligt.

Bei Leichtbaukonstruktionen oder im Dachbereich dagegen muss ein dichter Anschluss an Platten oder Folien erfolgen.

Die Abdichtung der Schließkanten der Fensterflügel bzw. der Außentüren erfolgt durch Lippendichtungen, die im Laufe der Zeit verspröden können und undicht werden. Auch die korrekte Einstellung der Beschläge ist von großer Bedeutung, um ein dichtes Schließen zu erreichen.

Anforderungen der EnEV 2009

Fugen in der Umfassungsfläche des Gebäudes (z.B. zwischen Fertigteilen oder Tragwerk und Ausfachungen) müssen dauerhaft und luftundurchlässig abgedichtet sein. Eine Prüfung der Luftdichtheit kann über einen Drucktest (s.o.) erfolgen. Für Gebäude ohne technische Lüftungsanlagen ist bei einer Druckdifferenz zwischen Außen- und Innendruck von 50 Pa maximal ein dreifacher Luftwechsel pro Stunde zulässig. Für Gebäude mit technischer Lüftung gilt für den Luftwechsel ein Grenzwert von $1,5\text{h}^{-1}$.

Die DIN 4108 gibt in Teil 3 Mindestanforderungen an den S_d -Wert für Dampfbremsen je nach deren Einbau vor.

3.3 Heizungsanlage und Warmwasserbereitung

Aufgrund fortschreitender Technik konnten im Bereich der Heizkessel in den letzten Jahren Verbesserungen erreicht werden, die den Wirkungsgrad auf 90 % bis zu über 100 % (Brennwerttechnik) steigerten. Dies wird durch eine optimierte Verbrennung erreicht, weshalb weniger Abwärme vom Kessel an die Umgebung bzw. über die Abluft nach außen übertragen wird. In diesem Zusammenhang kann der Schadstoffausstoß bei modernen Kesseln um über 80 % verringert werden.

Weitere Einsparpotentiale bieten die Dämmung der Rohrleitungen des Verteilersystems im Gebäude und die Dimensionierung der Umwälz- und Zirkulationspumpen, wo sich im Falle einer Überdimensionierung über lange Sicht relevante Stromeinsparpotentiale auftun.

Heizkessel

Während ursprünglich sogenannte Standardkessel eingesetzt wurden, die mit einer konstanten Temperatur von 70 bis 90 °C betrieben wurden, wurden später Niedertemperaturkessel entwickelt, deren Kesseltemperatur bei zunehmender Außentemperatur entsprechend abgesenkt wird.

Der Vorteil gegenüber den Konstanttemperaturkesseln liegt in geringeren Abgas- und Abstrahlverlusten, da durch das angepasste Aufheizen eine im Durchschnitt deutlich niedrigere Temperatur erreicht werden muss. So werden Nutzungsgrade von 91 bis 94 % erreicht. Üblich sind Kessel mit gas- oder ölbetriebenen Brennern, wobei die Brenner z.T. mit Gebläseunterstützung arbeiten. Bei atmosphärischen Brennern – Brennern, die über keine Gebläseunterstützung verfügen – kommt es aufgrund der abgasseitigen Nebenluftöffnung zu einem ständigen Luftzug aus dem Kamin, was zu einem ständigen Luftaustausch im Heizraum, aber auch zu einer ständigen Abkühlung des Kessels und des Heizraums führt.

Brennwertkessel sind die aktuell effektivste Generation an Kesseln und erreichen Nutzungsgrade von 103 bis 108%. Die Abgastemperatur ist dabei so gering, dass ein Teil des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes noch im Kessel kondensiert und seine Kondensationswärme an das Heizmedium abgibt.

Das anfallende Kondensat wird dann in das häusliche Abwassernetz abgegeben, wobei im Falle von Öl-Brennern u.U. eine vorherige Neutralisation erfolgen muss, da das Kondensat aufgrund im Öl enthaltener Schwefelverbindungen einen leicht sauren pH-Wert aufweist. (Auch bei Gasbrennwertgeräten über 50kW sind Vorgaben der Kommunen hinsichtlich des einzuleitenden Abwassers zu beachten.)

Beim nachträglichen Einbau derartiger Kessel muss in der in den Kamin ein Edelstahl-, Kunststoff- oder Aluminiumrohr eingezogen werden, um den Querschnitt zu verringern und damit das Abziehen des Abgases zu erleichtern. Außerdem wird so der Kamin vor Versottung geschützt, die ansonsten aufgrund des zu erwartenden, aggressiven Kondenswassers (geringere Abgastemperatur!) erfahrungsgemäß auftritt.

Heizverteilungen

Einen weiteren Ansatzpunkt stellt die Dämmung des Verteilernetzes dar. Dies betrifft sowohl die Rohrleitungen als auch die Pumpen und Armaturen. Die Dicke der Um-mantelung liegt dabei mindestens beim einfachen Rohrdurchmesser.

Durch einen sog. hydraulischen Abgleich des Rohrsystems kann erreicht werden, dass an allen Heizkörpern der benötigte Heizwasserdurchfluss sichergestellt ist. Dies wird durch Drosseln an voreinstellbaren Ventilen oder an den Rücklaufverschrau-bungen der Heizkörper erreicht und verhindert, dass z.B. bevorzugt periphere Heiz-körper nicht oder erst nach längerer Zeit warm werden, während Heizkörper in der Nähe des Kessels übermäßig aufheizen.

Auch durch die optimierte Dimensionierung und Steuerung von Zirkulations- und Umwälzpumpen kann Energie eingespart werden.

Insbesondere zur Unterstützung der Warmwasserbereitung ist – je nach Dimensio-nierung der Anlage, Ausrichtung des Gebäudes, Anzahl der Bewohner etc.) im Ein-zelfall auch eine Solarthermieanlage sinnvoll.

Anforderungen der EnEV 2009 und der 1.BImSchV

In Gebäuden mit mehr als fünf Wohnungen, die über elektrische Speicherheizungen verfügen, müssen diese ab 2020 durch andere Heizsysteme ersetzt werden. Dies gilt auch für alle sonstigen Gebäude, in denen Elektrospeicherheizungen vor 1990 instal-liert wurden.

Heizkessel mit konstanter Betriebstemperatur, die vor 1978 gebaut wurden, müssen ausgetauscht werden. Ferner gibt die 1. BImSchV maximal zulässige Abgasverluste für Heizungsanlagen vor, die sich an deren Nennwärmeleistung orientieren (11% bei 4 bis 25 kW, 10 % bei 25 bis 50 kW, ansonsten 9%).

Die EnEV 2009 fordert eine Regelung jeder Zentralheizungsanlage und eine Tempe-raturregelung in jedem einzelnen beheizten Raum. Üblich ist eine Kopplung der Vor-lauftemperatur an die Außentemperatur, sodass keine unnötig hohen Kesseltempe-raturen mit entsprechenden Abgas- und Abstrahlverlusten auftreten. Die raumbezo-gene Temperaturregelung erfolgt im Regelfall über Thermostatventile an den Heiz-körpern.

Heizverteilungen in unbeheizten Räumen von Bestandsgebäuden müssen gemäß der EnEV 2009 umgehend gedämmt werden.

Arbeitspaket 2, Teil 1: Vorstellung der Messobjekte

Messobjekt 1

Es handelt sich um ein massives Einfamilienhaus aus dem Jahr 1956 mit neuem Anbau. Es befindet sich in oberer Hanglage mit angrenzender Stadtmauer an der Gebäuderückseite. Das Haus ist teilunterkellert. Die Aufteilung der einzelnen Etagen in verschiedene Nutzräume ist in den nachfolgenden Grundrissen (Abbildung 7, Abbildung 8, Abbildung 9) ersichtlich. Diese zeigen auch farblich und alphanummerisch codiert die Standorte der Messgeräte in den jeweiligen Etagen. Im Folgenden steht ein blaues Rechteck mit der Codierung AT für ATMOS und ein grünes Rechteck mit der Codierung AG für AlphaGUARD. Eine folgende Nummer steht für die Nummer des Messgerätes, um eine eindeutige Zuordnung der Messdaten zu den entsprechenden Geräten und Standorten gewährleisten zu können. Zusätzlich zu den Radonmessgeräten wurden jeweils CO₂-Messgeräte der Firma Wöhler am Ort der Radonmessung platziert. Bei den AlphaGUARDS, die selbst in der Lage sind, Lufttemperatur, -druck und -feuchte aufzunehmen, wurde dies genutzt. Bei den ATMOS-Geräten hingegen, die diese Funktion nicht aufweisen, wurden zusätzlich Temperatur-Datenlogger am Messort platziert. Die Messgeräte mussten innerhalb der Wohnräume so aufgestellt werden, dass die vorhandenen Steckdosen genutzt und die Bewohner durch die Geräte oder Kabel nicht gestört werden. Das führt dazu, dass aus messtechnischer Sicht nicht in allen Fällen der optimale Gerätestandort genutzt werden konnte. Die Renovierungsmaßnahmen beschränken sich in diesem Messobjekt auf den Austausch der Fenster und die Dämmung des Dachbodens.

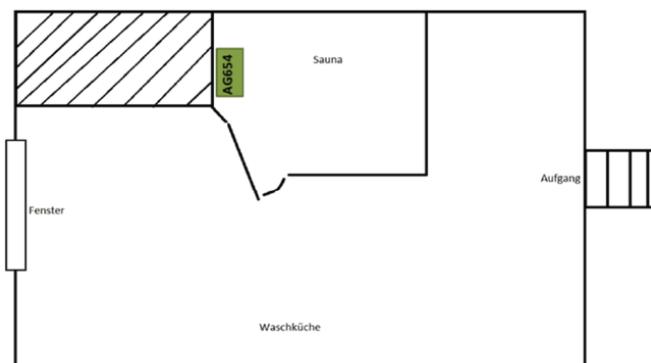


Abbildung 7: Skizze des Kellergrundrisses Messobjekt 1. Der Keller befindet sich nur unter einem Teil des Hauses, nicht unter dem Wohnzimmer.

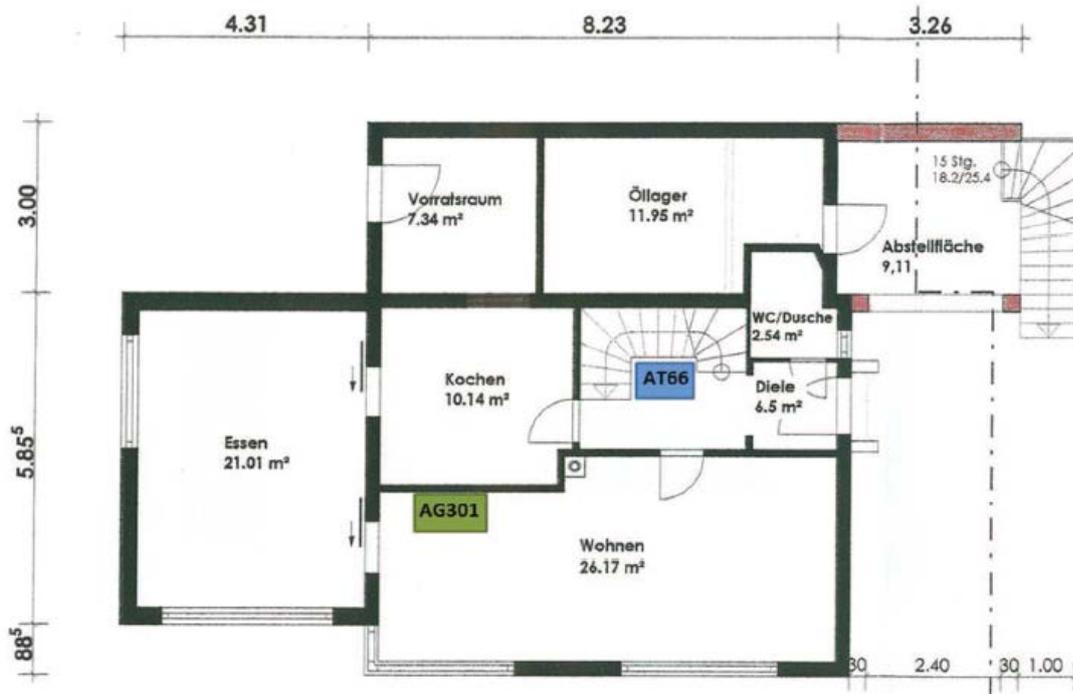


Abbildung 8: Grundriss des Erdgeschosses des Messobjekts 1.



Abbildung 9: Grundriss des Obergeschosses von Messobjekt 1.

Vom 31.5.2012 bis 27.7.2012 wurden die Messungen vor der Sanierung in Messobjekt 1 durchgeführt (Messreihe 30). Dabei sind die Messungen der Kellerräume nicht

verlässlich, woraufhin diese vom 21.9.2012 bis 8.10.2012 (Messreihe 33) im Keller wiederholt wurden und vom 20.12.2013 – 16.01.2014 (Messreihe 64) im gesamten Haus.

Die Messungen nach der Sanierung fanden im Zeitraum vom 26.05. bis 04.07.14 statt (Messreihe 74-76). Die Unterdruck-Messung wurde am 13.06.2014 durchgeführt.

Messobjekt 2

Es handelt sich um ein unterkellertes, massiv gebautes Einfamilienhaus aus dem Jahr 1974, welches als Wohngemeinschaft genutzt wird. Das Gelände ist als unterer Hang einzuordnen. Der Zeitraum der Radonmessungen vor der Sanierung lag vom 10.10.2012 bis 7.12.2012 vor der winterlichen Kälteperiode. Die Messungen zur Ermittlung der Dichtigkeit der Gebäudehülle wurden am 7.12.2012 durchgeführt. Nach der Sanierung erfolgte die Messung vom 16.04. bis 26.05.14 mit der Unterdruck-Messung am 12.05.2014.

Übergangsweise besaß das Messobjekt zwei übereinander liegende Dächer: Unten das alte Spitzdach, welches weggerissen werden soll, oben das neue Pultdach. Der Abriss des alten unteren Dachs begann entgegen den Absprachen bereits während des ersten Messzeitraums. Ein erhöhter Luftwechsel ist deshalb besonders im Dachgeschoss des Objektes zu erwarten. Vorrangig war jedoch während der Messzeit die Hälfte des Hauses betroffen, in der keine Messgeräte aufgebaut waren. Die Tür zu diesem Bereich wurde vom Hausbesitzer am 23.11.2012 luftdicht verklebt. Weitere durchgeführte Sanierungsmaßnahmen beinhalten eine Fassadendämmung, Erneuerung der Fenster und das Einsetzen einer Tür am Übergang zum Kellerbereich. In den Kellerräumen werden die Fenster nicht erneuert. Die Anordnung der Messgeräte ist aus den folgenden Grundrissen (Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12) ersichtlich. Die schwarzen Umrahmungen zeigen den alten Zustand vor der Sanierung, während rot das Sanierungsvorhaben aufzeigt.

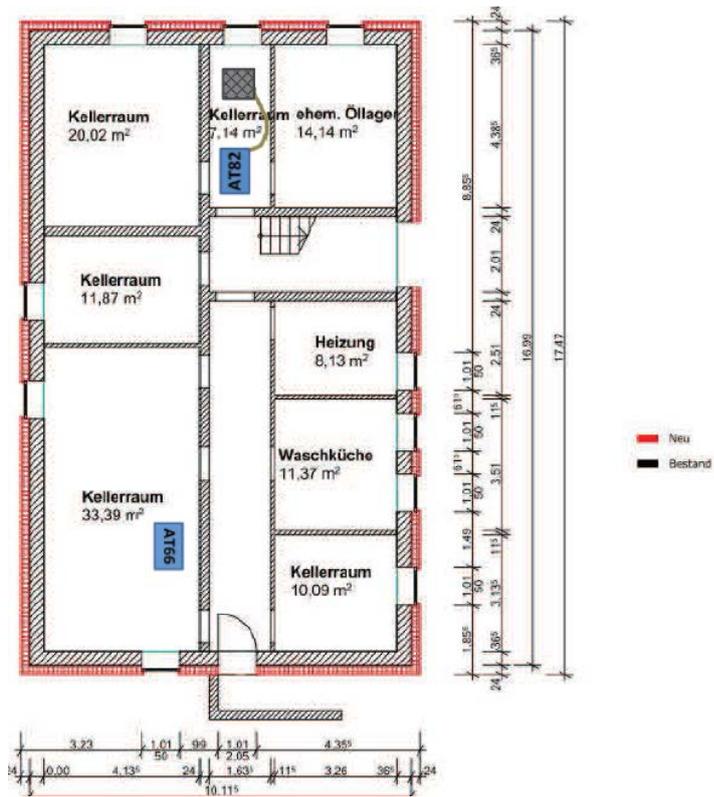


Abbildung 10: Kellergeschoss des zweiten Messobjekts

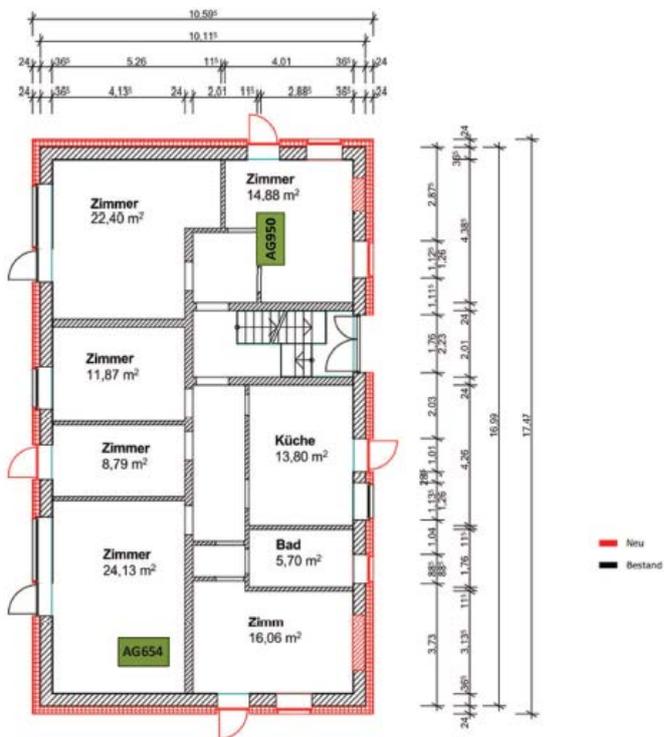


Abbildung 11: Erdgeschoss von Messobjekt 2

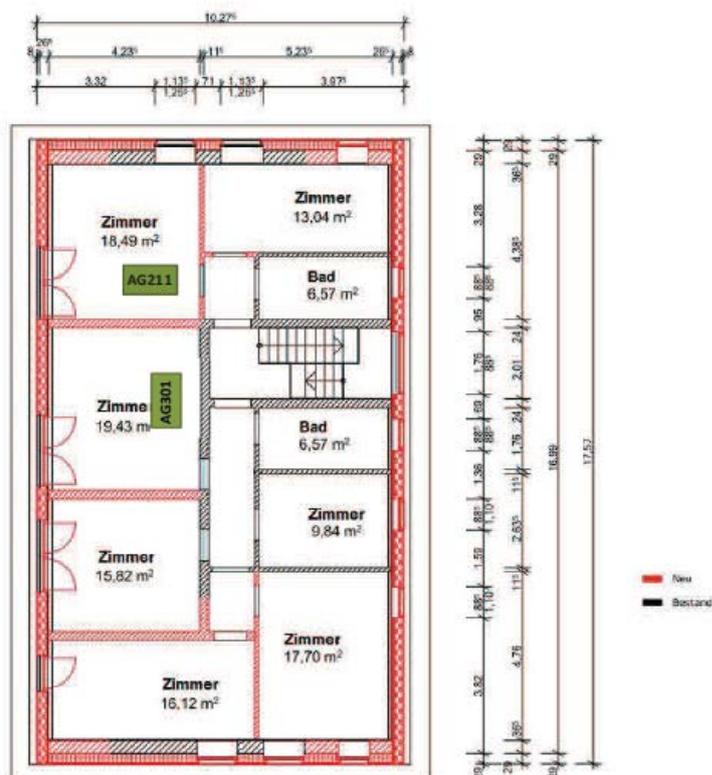


Abbildung 12: Obergeschoss von Messobjekt 2

Vor dem Beginn der Messungen vor der Sanierung wurde im Keller der Aufbaueffekt aufgenommen. Zu diesem Zweck wurden alle Türen und Fenster im Keller für ca. 15 Minuten geöffnet und im Anschluss für ca. 3 Tage verschlossen, gehalten. Zusätzlich wurde während des Messzeitraums am 7.11.2012 in allen Wohnräumen der Aufbaueffekt aufgezeichnet. Dafür wurden die entsprechenden mit Messgeräten versehenen Räume für 25 Minuten gelüftet, um die Radonkonzentration innen an die Außenkonzentration anzupassen. Dann wurden alle Fenster und Türen verschlossen und die Aufbaukurve aufgenommen. Nicht alle Wohnräume konnten aus Nutzungsgründen für mehrere Tage verschlossen bleiben.

Messobjekt 3

Es handelt sich um ein Wohn- und Bürohaus, welches sich auf ebenem Gelände befindet. Es wurde ca. 1965 auf einem Streifenfundament, mit einer darunter eingebrachten Kies bzw. Schotterschicht, gebaut. Das Objekt wurde im Messzeitraum von zwei Erwachsenen bewohnt und ein Büroraum täglich zur Arbeit genutzt. Die Messungen von Radon und zugehörigen Einflussparametern wurden vom 03.04.2013 bis

12.06.2013 vor der Renovierung und vom 06.03. - 16.04.14 nach der Renovierung durchgeführt. Die Messungen zur Ermittlung der Dichtigkeit der Gebäudehülle wurden am 12.06.2013 sowie am 18.03.2014 durchgeführt.

Die Sanierungsmaßnahmen umfassten die Isolierung der Kellerdecke, die Fassaden-Dämmung einzelner Gebäudeteile und eine teilweise Dämmung des Daches. Außerdem wurden einige Fenster (Büro, Schlafzimmer, Verteilerraum) erneuert, wobei die Dachfenster im Speicher schon vor Beginn der Messungen ausgetauscht wurden. Die Erneuerung der anderen genannten Fenster wurde bereits im letzten Viertel des ersten Messzeitraums vorgenommen. Zusätzlich wurde das Objekt mit einer neuen Heizung ausgestattet, wobei die Heizung von Öl auf Gas umgestellt wurde.

Die Standorte der Messgeräte sowie Aufteilung der einzelnen Etagen in verschiedene Nutzräume sind in den nachfolgenden Grundrissen (Abbildung 13, Abbildung 14) ersichtlich.

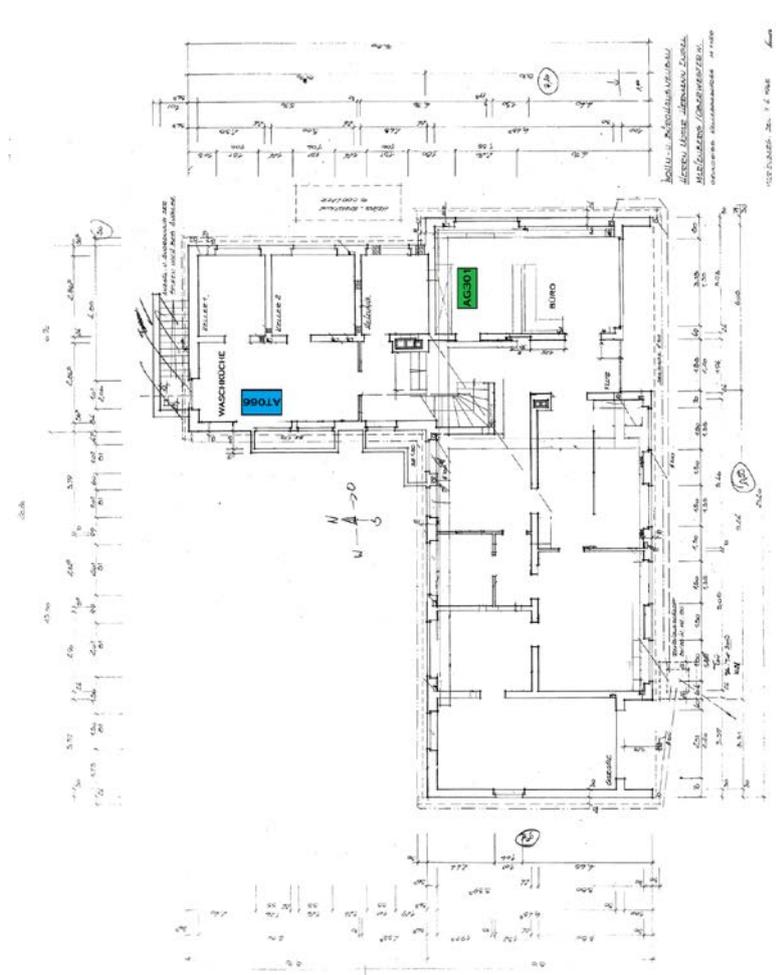


Abbildung 13: Grundriss des Untergeschosses/Souterrain

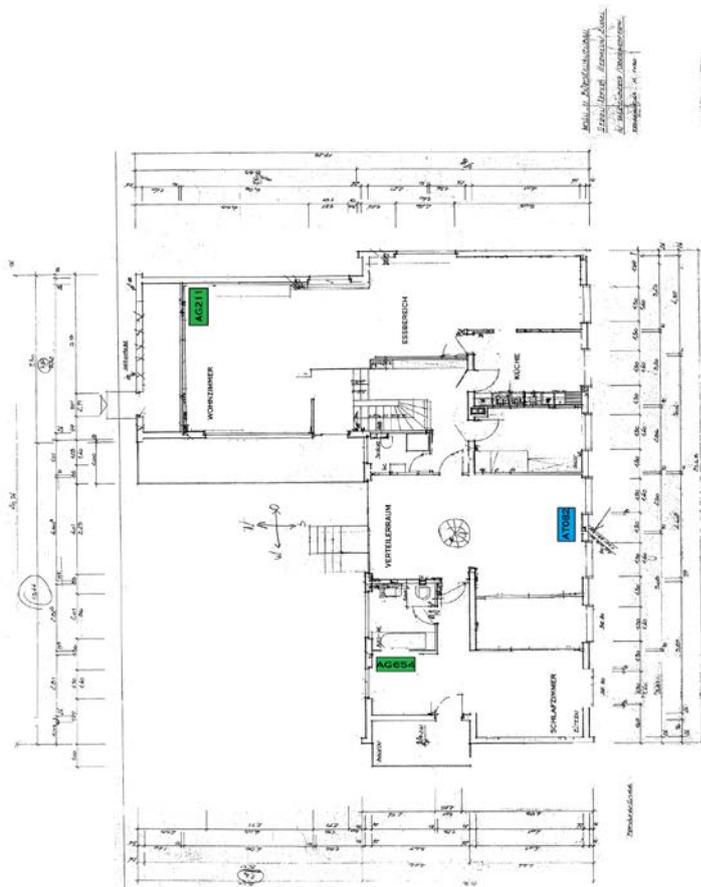


Abbildung 14: Grundriss des Erdgeschosses mit Wohnzimmer (ebenerdig) und Verteilerraum (Zwischenetage).

Messobjekt 4

Das Objekt wurde 1970 erbaut. Die bewohnte Fläche beträgt ca. 170m². Es handelt sich um ein freistehendes Einfamilienhaus mit Hanglage. Das Haus teilt sich in einen bewohnten Bereich im oberen Geschöß und einem unbewohnten Bereich im unteren Geschöß auf. Das untere Geschöß besteht aus einem bewohnbaren Bereich, dem Souterrain, und einem unbewohnbaren Bereich mit Kellercharakter.

Bei den durchgeführten Sanierungsmaßnahmen handelt es sich lediglich um den Austausch der Fenster im Erdgeschoss. Die Messungen vor der Sanierung wurden vom 8.10.13 bis 12.12.13 mit der Unterdruck-Messung am 24.10.13 ausgeführt. Von 15.12.14 bis 10.02.15 erfolgten die Messungen nach der Sanierung des Gebäudes mit der Unterdruck-Messung am 27.1.2015. Die Aufteilung der einzelnen Etagen in verschiedene Räume sowie die Standorte der Messgeräte ist in den nachfolgenden Grundrissen (Abbildung 15, Abbildung 16) ersichtlich.

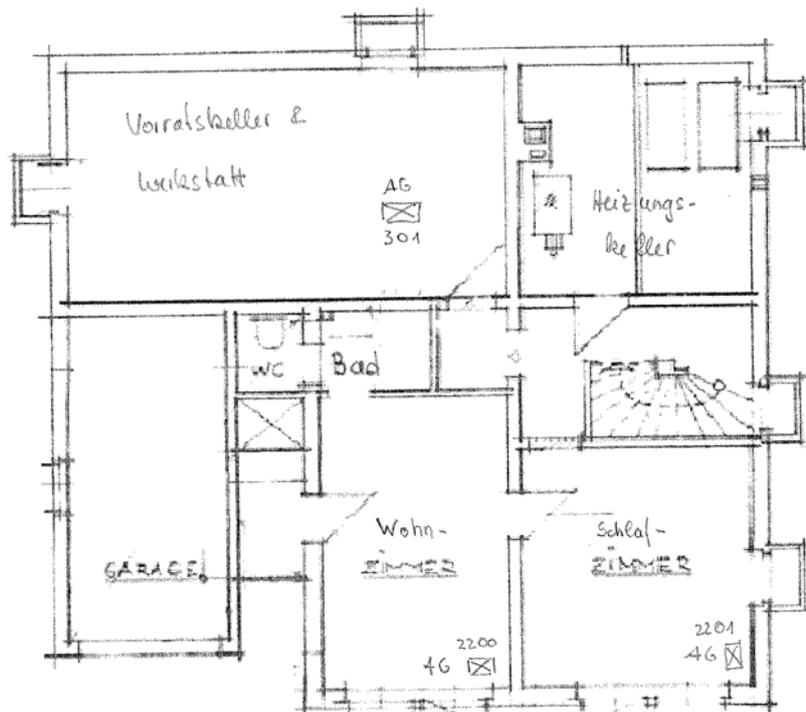


Abbildung 15: Gerätestandorte im Untergeschoss von Messobjekt 4

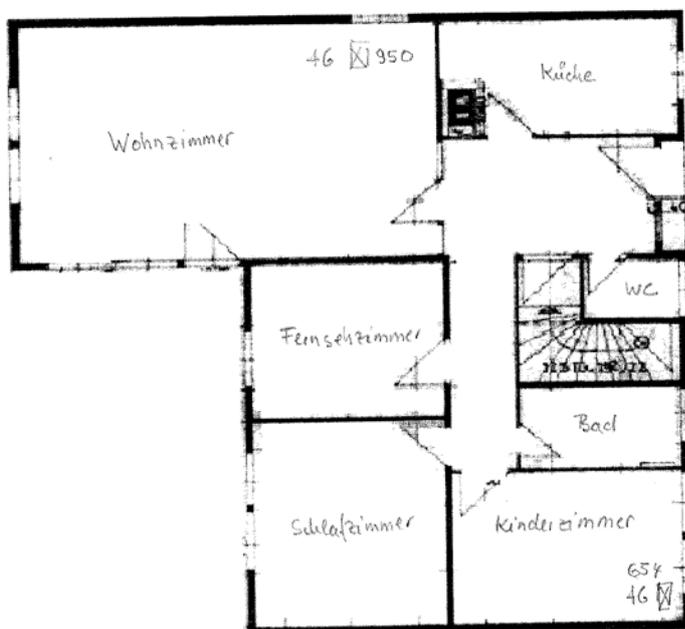


Abbildung 16: Gerätestandorte im Obergeschoss von Messobjekt 4

Messobjekt 5

Es handelt sich um ein massives Einfamilienhaus aus dem Jahr 1959. Es befindet sich auf ebenem, sehr leicht abschüssigem Gelände. Das Haus ist vollunterkellert. Die Aufteilung der einzelnen Etagen in verschiedene Räume sowie die Standorte der Messgeräte ist in den nachfolgenden Grundrissen (Abbildung 17, Abbildung 18, Abbildung 19) ersichtlich. Die Renovierungsmaßnahmen beschränken sich in diesem Messobjekt auf den Austausch der Glasbausteine im Treppenhaus, eine neue Haustür, ein eingebauter Kaminofen im Wohnzimmer (der allerdings aufgrund der Jahreszeit während der zweiten Messphase nicht genutzt wurde), Kellerdeckendämmung sowie eine Dachbodendämmung. Hier wurden insbesondere die massiven Undichtigkeiten in der Gaube des Treppenhauses abgedichtet.

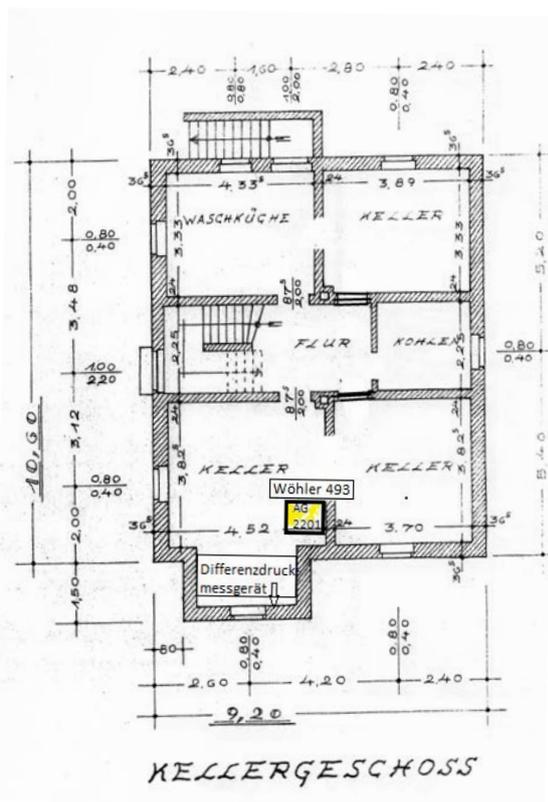


Abbildung 17: Kellergeschoss mit dem jeweiligen Standort der Messgeräte

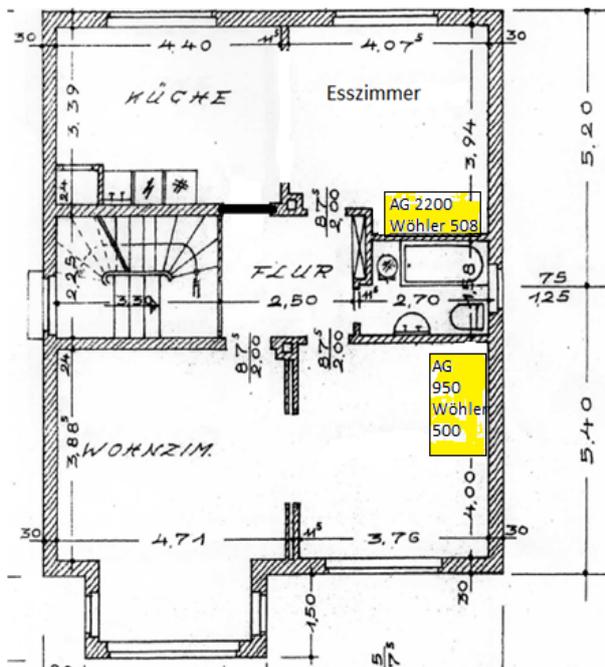


Abbildung 18: Erdgeschoss mit dem jeweiligen Standort der Messgeräte

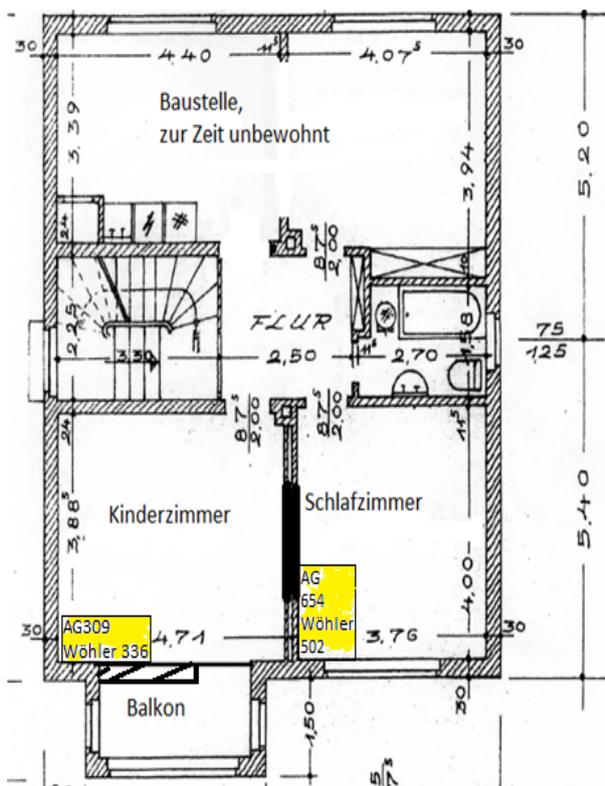


Abbildung 19: Obergeschoss mit dem jeweiligen Standort der Messgeräte

In Messobjekt 5 wurden vom 16.01. – 27.02.14 vor den Renovierungsarbeiten die Radonkonzentration sowie die weiteren Parameter wie CO₂ und Wetterdaten gemessen. Die Unterdruck-Messung wurde 4.2.14 durchgeführt.

Die Aufbaukurve wurde im Keller vom 26.1.14 – 29.1.14 aufgenommen. Dafür wurden das Untergeschoss und das Erdgeschoss sehr gut durchlüftet. Im Obergeschoss konnten die Fenster zu dem Zeitpunkt leider nicht geöffnet werden. Das Kellergeschoss wurde nach dem Lüften verschlossen und erst am 29.1.14 wieder betreten. Das Erdgeschoss wurde bewohnt sodass sich die Türen dort bereits am 30.1.14 wieder öffneten.

Nach den Sanierungsarbeiten wurden die Messungen vom 4.7.14 bis 19.9.14 durchgeführt. Dabei waren vom 4.7.14 bis 21.8.14 die Kellerfenster durchgehend wegen Schimmelbefall geöffnet. Die Unterdruck-Messung wurde am 26.8.14 durchgeführt.

Ein quantitativer Vergleich der Radonkonzentrationen ist in diesem Messobjekt schwierig, weil die Messphase nach der Sanierung des Hauses bei deutlich wärmeren Temperaturen und vermehrter Lüftung stattfand.

Arbeitspaket 2, Teil 2: Methode

Gebäudeaquisition

Für die Radonmessungen wurden fünf Einfamilienhäuser mit unterschiedlichen Sanierungsmaßnahmen ausgewählt. Die Untersuchungsobjekte, die in die Studie aufgenommen wurden, sollten in Gebieten mit hoher Wahrscheinlichkeit für eine erhöhte Radonkonzentration in der Innenraumluft liegen. In die Untersuchung wurden Häuser, bei denen man in der Bodenluft eine größere Aktivität als 80 kBq/m^3 erwartet, aufgenommen. Diese Wahrscheinlichkeitsinformationen wurden der Radonkarte des BfS (Stand: 15.5.2012) entnommen. Auch Häuser, die unmittelbar an gefährdete Bezirke grenzen, werden in die Untersuchung eingeschlossen. Allerdings dürfen die Messobjekte nicht in der näheren Umgebung bergbaulicher Anlagen liegen. Durch die natürliche und künstliche Bewetterung des Grubengebäudes kann die Radonaktivitätskonzentration in den darüber befindlichen Häusern stark beeinflusst werden.

Um eine gute Vergleichbarkeit zu schaffen, handelt es sich bei den Häusern einheitlich um Einfamilienhäuser. Die Renovierungsmaßnahmen können vielfältig sein, sofern die Radonaktivitätskonzentration davon beeinflusst werden kann. Auch Objekte, bei denen nur eine einzige Renovierungsmaßnahme vorgenommen wird, können in die Studie aufgenommen werden, da diese den Vorteil bieten, dass der Effekt direkt der Maßnahme zugeordnet werden kann.

Zu den Sanierungsmaßnahmen, von denen eine Änderung der Radonkonzentration erwartet wird, gehören alle, bei denen mit einer Variation des Luftwechsels innerhalb der einzelnen Wohnräume oder zwischen Gebäudeinnerem und der Außenluft gerechnet wird. Dazu zählen insbesondere der Einbau neuer Fenster und Türen, eine neue Fassaden- bzw. Geschossdeckendämmung sowie ein neues Dach. Aber auch der Einbau einer Lüftungsanlage oder Heizung mit komplett anderem Funktionsbetrieb bzw. Standort kann zu einer Änderung führen und wurde in den Untersuchungen mit betrachtet.

Es zeigte sich jedoch, dass die Anzahl der in Frage kommenden Häuser begrenzt war und deshalb jedes Haus, das die Vorgaben erfüllte, als Messobjekt angenommen wurde. Da beim vierten Messobjekt im Anschluss an die erste Messperiode nicht klar war, ob das Haus tatsächlich renoviert wird, haben wurde ein fünftes Messobjekt hinzugezogen. So wurde erwartet, am Ende der Projektlaufzeit in wenigstens vier Häusern vor- und nach der Renovierung für mindestens 6 Wochen die Radonkonzentration gemessen zu haben. Die Akquisition der Messobjekte wurde über den Projektpartner UBERA unter Berücksichtigung des Vorhandenseins geeigneter Bodenradonluftwerte, jedoch keiner bergbaulichen Beeinflussung realisiert.

In den ausgewählten Objekten sind die Radonkonzentrationen in jeweils zwei Zimmern aller bewohnten Etagen inklusive einer Reihe von Einflussparametern erfasst worden. Die Aufnahme der Messdaten fand jeweils über einen Zeitraum von mindes-

tens vier Wochen vor und nach den Sanierungsarbeiten, unter Vermeidung extremer Witterungsverhältnisse, statt.

Zu Beginn der Messungen füllen die Hausbesitzer einen Fragebogen aus, in dem das Gebäude sowie die Lage spezifiziert werden. Desweiteren werden Angaben zu der Nutzung und Lüftung der Räume, in denen Messgeräte stehen, gemacht. Die Bewohner werden dazu angehalten, ihr Verhalten bezüglich des Wohnraumlüftens nicht aufgrund der Messungen zu verändern und tragen Abweichungen von ihren Angaben in ein einfaches Protokoll ein. Die bevorstehenden Renovierungsmaßnahmen werden besprochen und protokolliert. Auch der Standort der Geräte wird in die Grundrisse eingetragen und fotografiert, um im zweiten Messzyklus die gleichen Positionen zu finden.

Vorgehen bei den Messungen von Radon und zugehörigen Parametern

Erfassung von Gebäudeparametern

Bei einem ersten Termin mit den Hausbesitzern wird das entsprechende Wohngebäude gesichtet und seine Eignung für das Projekt begutachtet. Dem Hausbesitzer wird das Projekt und die dazugehörige Vorgehensweise erläutert und das Einverständnis für alle erforderlichen Messungen und Maßnahmen eingeholt. Bei einem Rundgang durch das Gebäude werden die notwendigen Informationen gesammelt, um anschließend die Gebäude- und Standortdaten mittels des zur Verfügung stehenden Fragebogens zu erfassen. Außerdem werden alle vom Energieberater vorgeschlagenen Energiesparmaßnahmen für das Objekt und die vom Hausbesitzer tatsächlich geplanten Maßnahmen schriftlich festgehalten. Um die Eignung des Messobjekts abschließend abzusichern, wird ein AlphaGUARD-Radonmessgerät für ungefähr eine Woche in einem Gebäudeteil mit Bodenkontakt aufgestellt. Anschließend werden, bei ausreichender Radonkonzentration, die Messgeräte im gesamten Haus aufgestellt. Es wird darauf geachtet, dass die Hausbewohner die Absicht haben, während der Messzeiten die Räumlichkeiten normal zu nutzen. Nach Abschluss aller Sanierungsmaßnahmen werden die Messgeräte nach Möglichkeit an den gleichen Orten wie vor der Sanierung aufgestellt. Der Messzeitraum beträgt auch hier wieder mindestens sechs Wochen, um einen vergleichbaren Datenumfang vor und nach der Sanierung zu gewährleisten.

Während des Messzeitraums wird eine Aufbaukurve der Radonkonzentrationswerte aufgenommen. Während der Aufnahme dieser Kurve sollte der Raum mehrere Tage nicht betreten werden, um Luftwechsel und damit eine Störung der Kurve so gering wie möglich zu halten. Leider ist es nicht immer möglich die Aufbaukurve aufzunehmen, da die Bewohner die Räume nutzen wollen.

Radonmessungen

Für die Radonmessungen standen anfangs vier AlphaGUARD-Geräte der Firma Saphymo und zwei ATMOS-Geräte der Firma Gammadata zur Verfügung. Beide Gerätetypen arbeiten nach dem Prinzip einer Vieldraht-Ionisationskammer. Da die ATMOS-Geräte eine große Untergrund-Zählrate haben, waren diese für die Messung von geringen Konzentrationen schlechter geeignet. Aus diesem Grund wurde im Laufe des Projekts das Messsortiment auf 6 AlphaGUARDs umgestellt.

Das Messintervall der Radonmonitore wird auf zehn Minuten eingestellt, um Schwankungen der Radonkonzentration schnellstmöglich wahrnehmen und Zusammenhänge mit anderen Parametern erkennen zu können. Der Messzeitraum beträgt in jedem Objekt 4 bis 8 Wochen. So können bei der Auswertung unvorhersehbare Zeiten, z.B. extreme Wetterlagen oder Fehler bei den Messgeräten, eliminiert werden. Es wurde sichergestellt, dass in jedem Messobjekt am Ende der Messungen vollständige Messdaten von 4 Wochen vorliegen.

Messung meteorologischer Daten

Zur Erfassung der meteorologischen Daten werden die entsprechenden Funktionen der Radonmonitore genutzt, um an jedem Punkt der Radonmessung Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Druck in Abhängigkeit von der Zeit aufzuzeichnen.

Zusätzlich werden im Freien mithilfe einer Wetterstation zeitlich aufgelöste Werte der Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftdruck sowie Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Niederschlagsmengen erfasst. Um die Daten der Wetterstation abzusichern, werden zum Vergleich Daten offizieller Wetterstationen aus der Nähe hinzugezogen. So kann vermieden werden, dass durch lokale Effekte an der Wetterstation Messergebnisse und somit die Radonausbreitung im Gebäude falsch interpretiert werden.

Des Weiteren erfolgt in einem der Räume parallel zur Radonmessung eine separate Messung der Druckdifferenz zwischen Innen- und Außenluft. Im späteren Verlauf des Projekts wurde die Druckdifferenz im Untergeschoss gemessen, da ein Unterdruck eine Folge von Luftbewegungen im Haus ist und die Radonausbreitung im Untergeschoss ihren Ursprung hat.

Erfassung der Raumnutzung

Neben den baulichen und meteorologischen Bedingungen hat das Nutzungsverhalten der Bewohner eines Gebäudes maßgeblichen Einfluss auf die Radonkonzentrationen.

on in den Wohnräumen. Um diesen Einfluss quantifizieren zu können, werden über den gesamten Messzeitraum an jedem Punkt der Radonmessung Zeitreihen der CO₂-Konzentration aufgenommen. Dieser zeitliche Verlauf erlaubt Rückschlüsse auf den Luftwechsel und die Anwesenheit von Personen und somit auf die Raumnutzung. Des Weiteren werden die Bewohner gebeten, in Protokollen die übliche Raumnutzung und Abweichungen von dieser zu dokumentieren. Auch Abwesenheiten ab einem Tag sollen auf den Protokollen vermerkt werden. Die Protokolle können maßgeblich zur Interpretierbarkeit der Messergebnisse beitragen, sind aber im Gegenzug auch stark von den Bewohnern und deren Dokumentation aller nennenswerten Ereignisse abhängig.

Dichtemessungen an Gebäuden

Mit Hilfe eines modifizierten Differenzdruck-Messverfahrens (Blower-Door-Test) wurde vor und nach den Sanierungen die Dichtigkeit der Messobjekte festgestellt. Das Ziel war darüber hinaus auch die zeitgleiche Messung der Radonkonzentration, abhängig von dem eingestellten Unterdruck.

Dafür wurde die Radonkonzentration mit aktiven Radonmessgeräten in jeder Etage, teilweise auch in mehreren Räumen pro Etage, gemessen. Je nach eingestellter Druckdifferenz ist es möglich, dass in Gebäudeteilen, deren Untergrund weniger dicht als die Gebäudehülle ist, das abgesaugte Radon durch den Unterdruck ständig nachströmt. Dieses lässt sich mithilfe der Radonmonitore nachweisen. So kann man das vorhandene Radonpotential erkennen oder Hinweise auf mögliche Radoneintrittspfade erhalten.

Der Unterdruck wurde in drei Schritten stufenweise erhöht und sollte bis zur Sättigung der Radonkonzentration konstant gehalten werden. Die ersten beiden Stufen wurden unter 30 Pascal Unterdruck gehalten, um ein Nachströmen der Luft durch die Gebäudehülle gering zu halten. Es sollte sozusagen das Radon aus dem Boden gesogen werden. Praktisch zeigte sich aber, dass es aufgrund langer Wartezeiten durch stark schwankende Radonkonzentrationen nicht möglich war, den Sättigungsbereich abzuwarten, ehe eine neue Druckstufe eingestellt wurde. Aus diesem Grund wurde bei jeder Druckstufe mindestens so lange gewartet, bis im kompletten Haus rechnerisch ein kompletter Luftwechsel stattgefunden hat. Anschließend wurde nach Ermessen etwas länger gewartet oder die nächste Stufe eingestellt. Längeres Warten konnte aufgrund stetig steigender Radonkonzentrationen bewirkt werden.

Im Anschluss an die drei Unterdruckstufen wurde der Radonverlauf bei Überdruck gemessen. So konnte die Luftwechselrate, der sogenannte n_{50} -Wert, bestimmt werden. Dieser charakterisiert die Luftdichtheit eines Gebäudes. Der n_{50} -Wert wird bei einem Über- und Unterdruck von 50 Pascal bestimmt. Die Ergebnisse der Dichtemessung werden im Zusammenspiel mit den anderen Messergebnissen interpretiert

und können unterstützend wirken bei der Beschreibung der Radonausbreitung im Gebäude. Zudem lassen sich daraus Informationen ableiten, ob die Sanierungsarbeiten erfolgreich waren und wo weiterhin Leckagen bestehen.

Arbeitspaket 3: Vorgehen bei der Auswertung

Einflussfaktoren auf die Radonkonzentration

Anhand von Messdaten werden Abhängigkeiten der Radonkonzentration von diversen Einflussgrößen (klimatische Parameter und das Nutzerverhalten) ermittelt. Bei den klimatischen Parametern handelt es sich im Wesentlichen um die Temperaturen, die Luftdrücke und die Luftfeuchte der Außenluft und der Innenraumluft aller Räume. Zur Beschreibung des Nutzerverhaltens dient als Leitgröße die CO₂-Konzentration. Ein Anstieg der CO₂-Konzentration deutet auf die Anwesenheit von einem oder mehreren Raumnutzern hin. Eine Quantifizierung der Raumnutzung ist über bestimmte Annahmen möglich. Betreibt der Raumnutzer beispielsweise Büroarbeit, so kann eine durchschnittliche CO₂-Emissionsrate von 18 l/h angenommen werden⁴⁵. Wird zusätzlich die Luftwechselrate ermittelt, so kann die Anwesenheit von Raumnutzern annähernd beschrieben werden.

Zur Analyse der gewonnenen Daten aus Radonkonzentrationen und Umgebungsparametern werden die Zeitreihen vorerst visuell betrachtet. Daraus ergibt sich häufig ein Verdacht bezüglich der Einflussfaktoren und Abhängigkeiten voneinander. Diese werden dann im weiteren Verlauf mathematisch überprüft. Dafür wird mit dem Statistik-Programm R die Korrelation überprüft. Da die Funktion in dieser Auswertung immer auf zwei Zeitreihen angewendet wird, handelt es sich um die Kreuzkorrelation. Für eine genauere Interpretation der Radonkonzentrationen wurden Zeitreihenanalysen mit dem Statistik-Programm R durchgeführt. Es wurden Tagesgänge, Tagesmittelwerte sowie der Rest separat voneinander aufgetragen. Dabei entspricht die Zeitreihe „seasonal“ den Tagesschwankungen der Radonkonzentration, die normalerweise auf den „trend“ überlagert. Der „trend“ beschreibt die Tagesmittelwerte, also die Rohdaten der Radonkonzentration über einen Tag geglättet. Im „remainder“ ist der Rest, also die Differenz zwischen den Rohdaten und den Tagesschwankungen mit Tagesmittelwerten.

Die Überprüfung der Korrelationen der Tagesschwankungen von Umgebungsparametern und Radonkonzentration macht wenig Sinn, da beide den Charakter von Tagesgängen aufweisen und die periodischen Schwankungen damit zwangsläufig korrelieren. Dies macht dann keine Aussage darüber, ob tatsächlich ein Einfluss auf die Radonkonzentration vorliegt, oder dieser Effekt durch die ebenfalls tageszeitlich variierende Gebäudenutzung entsteht. Auch der „Rest“ wird nicht zur Überprüfung herangezogen.

Für die Überprüfung der Einflussfaktoren auf die Radonkonzentration werden demnach nur die Rohdaten und die Tagesmittelwerte herangezogen.

Ermittlung der Luftwechselrate

Die Beschreibung des mathematischen Zusammenhangs zwischen der Radonkonzentration und der Luftwechselrate erfolgt über eine Differentialgleichung. Hierbei werden die in Abbildung 20 schematisch dargestellten Parameter berücksichtigt.

Die Modellierung geschieht zunächst unter der Annahme, dass das Gebäude aus einem einzelnen Raum besteht und somit ein Ein-Raum-Modell darstellt ⁴⁶.

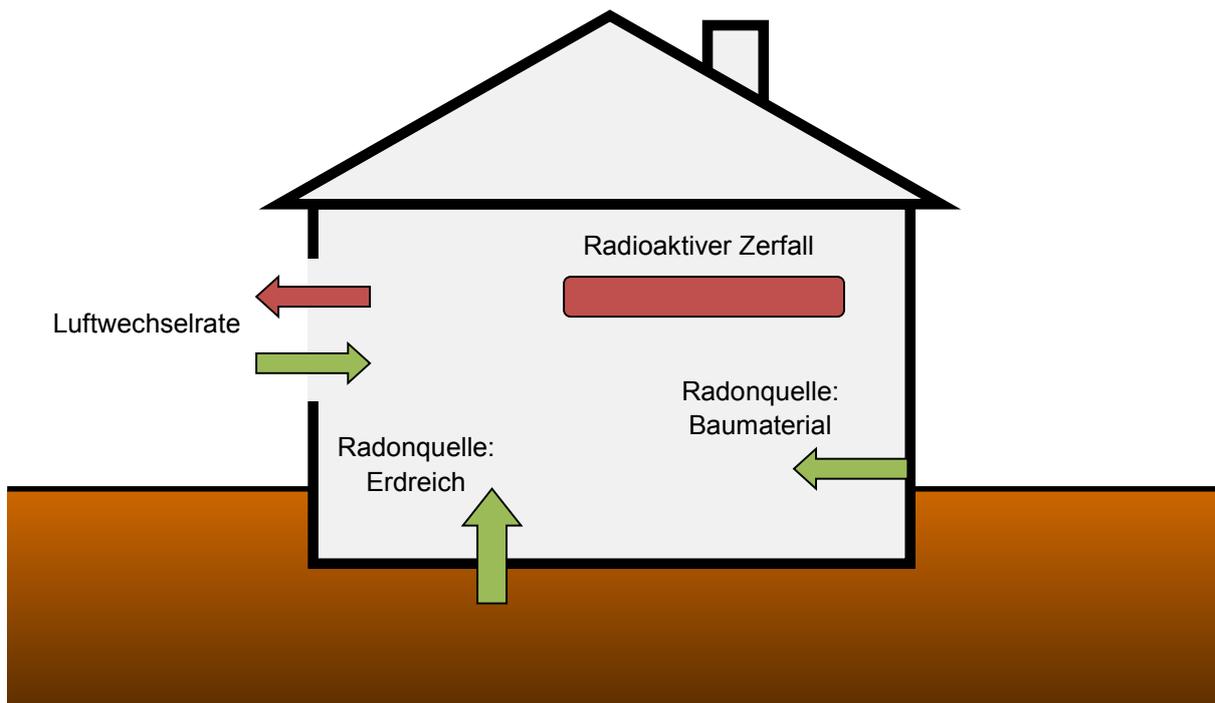


Abbildung 20: Einflussgrößen der Radonkonzentration im Rauminnen

Als Radonquellen $Q_{Rn,V}(t)$ sind hier das Erdreich und das Baumaterial aufgeführt. Der radioaktive Zerfall mit der Zerfallskonstanten λ sorgt für einen Verlust an Radonkonzentration. Zur Herstellung des Zusammenhangs zwischen Luftwechselrate $k(t)$ und Radonkonzentration $c_{Rn}(t)$ ist die Luftwechselrate mit Zu- und Abluft dargestellt:

$$\frac{dc_{Rn}(t)}{dt} = -\lambda \cdot c_{Rn}(t) + Q_{Rn,V}(t) + k(t) \cdot c_{Rn,a} - k(t) \cdot c_{Rn}(t)$$

Formel 1

Die Lösung der Differentialgleichung ermöglicht die Berechnung des Verlaufs der Radonkonzentration $c_{Rn}(n)$ aus der Luftwechselrate $k(n)$ (mit $n = 0, 1, 2, \dots$):

$$c_{Rn}(n) = e^{-(\lambda+k(n))\cdot\Delta t} \cdot \left(c_{Rn}(n-1) - \frac{Q_{Rn,V}(n)+c_{Rn,a}\cdot k(n)}{\lambda+k(n)} \right) + \frac{Q_{Rn,V}(n)+c_{Rn,a}\cdot k(n)}{\lambda+k(n)}$$

Formel 2

Diese Gleichung kann jedoch nicht nach der Luftwechselrate umgestellt werden. Um den Verlauf der Luftwechselrate aus dem Verlauf der Radonkonzentration zu berechnen, ist es notwendig, die Differentialgleichung in eine Differenzgleichung umzuformen, die dann eine Umstellung nach der Luftwechselrate ermöglicht:

$$k(n) = \frac{\frac{c_{Rn}(n+1)-c_{Rn}(n)}{\Delta t} - Q_{Rn,V}(n) + \lambda \cdot c_{Rn}(n)}{c_{Rn,a} - c_{Rn}(n)}$$

Formel 3

Mit dieser Gleichung steht das Grundwerkzeug zur Rekonstruktion der Luftwechselrate aus der Radonkonzentration zur Verfügung.

Bei Anwendung von Formel 3 auf reale Messdaten besteht aufgrund des Terms $c_{Rn}(n+1) - c_{Rn}(n)$ eine hohe Rauschempfindlichkeit, da zur Berechnung immer zwei aufeinander folgende Radonmesswerte herangezogen werden. Daher ist es notwendig, die Messdaten vor der Berechnung einer Filterung zu unterziehen, die beispielsweise durch den Einsatz von Fensterfunktionen erfolgen kann⁴⁷.

Weit weniger Rauschempfindlich ist die Berechnung der Luftwechselrate aus dem Verlauf der CO₂-Konzentration. Steigt die Radonkonzentration an, während die CO₂-Konzentration abfällt, ist dies ein Zeichen dafür, dass eine Person den Raum verlassen hat und dieser geschlossen ist. Für diese Zeitpunkte kann die Luftwechselrate berechnet werden, die der natürlichen Luftwechselrate des Hauses entspricht. Dazu wird an den Kurvenverlauf der CO₂-Abnahme eine e-Funktion angepasst. Der negative Exponent, d.h. die reziproke Zeitkonstante der e-Funktion entspricht der Luftwechselrate. So kann aus gegebenen CO₂-Verläufen die Luftwechselrate berechnet werden.

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der Luftwechselrate ist die Unterdruckmessung. Diese liefert als Ergebnis eine mittlere Luftwechselrate k des Gebäudes unter Normalbedingungen, die aus der Luftwechselrate n_{50} , die durch die Unterdruck-

Messung gewonnen wurde, berechnet wird. Man erhält so allerdings keine Luftwechselrate die spezifisch zu einem zeitlichen Verlauf passt, sondern die mittlere Luftwechselrate während eines gesamten Jahres. Der aktuelle Wert, der zu der aktuellen Radonkonzentration gehören würde, hängt sehr von den Windverhältnissen ab, die bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden. Für die Berechnung liegen die mittleren Werte eines gesamten Jahres zugrunde.

Die Umrechnung der Luftwechselrate n_{50} in die Luftwechselrate unter Normalbedingungen wird laut Formel 1 und DIN V 4108-6 Tabelle 4 vorgenommen.

$$k = e * n_{50}$$

Formel 4: Berechnung der Luftwechselrate k unter Normalbedingungen (Quelle: DIN EN 832)

Die Windschutzkoeffizienten e werden abhängig von der Lage und dem Windschutz des Hauses aus Tabelle 4 abgelesen.

Tabelle 4 — Windschutzkoeffizienten für unterschiedliche Lagen eines Gebäudes

Lage	Windschutzkoeffizient e_{wind}	
	mehr als eine dem Wind ausgesetzte Fassade	eine dem Wind ausgesetzte Fassade
freie Lage	0,10	0,03
halbfreie Lage	0,07	0,02
geschützte Lage	0,04	0,01

Tabelle 4: Koeffizienten e zur Umrechnung der Luftwechselrate n_{50} in die Luftwechselrate unter Normalbedingungen laut DIN V 4108-6 Tabelle 4

Bestimmung der Radonquellstärke

Quellstärkenberechnung über Aufbaukurve nach Durchlüftung

Zur Anwendung von Formel 3 ist die Kenntnis einiger Parameter notwendig. Die Zerfallskonstante λ ist als physikalische Konstante bekannt. Die messtechnisch zugängliche Radonaußenkonzentration $c_{Rn,a}$ kann ebenfalls als konstant angenommen werden. Eine Zeitabhängigkeit kann in Form von $c_{Rn,a}(t)$ berücksichtigt werden. Komplizierter gestaltet sich jedoch die Ermittlung der Radonquellstärke.

Die auf das Raumvolumen normierte Radonquellstärke $Q_{Rn,V}(t)$ stellt die vollständige Charakterisierung eines zu untersuchenden Raumes dar. Sie kann unter der An-

nahme einer konstanten Radonquellstärke über die Aufnahme einer Sättigungskurve der Radonkonzentration ermittelt werden, wobei durch eine Erhöhung der Luftwechselrate (Lüften) zunächst die Radonkonzentration im Gebäudeinneren auf Werte nahe der Radonaußenkonzentration gesenkt wird. Anschließend wird die Luftwechselrate wieder normalisiert (Beenden der „Lüftungssituation“), was zu einem Aufbau der Radonkonzentration führt und somit eine Sättigungskurve liefert, die unter Gewährleistung einer möglichst konstanten Luftwechselrate einem Exponentialverlauf folgt.

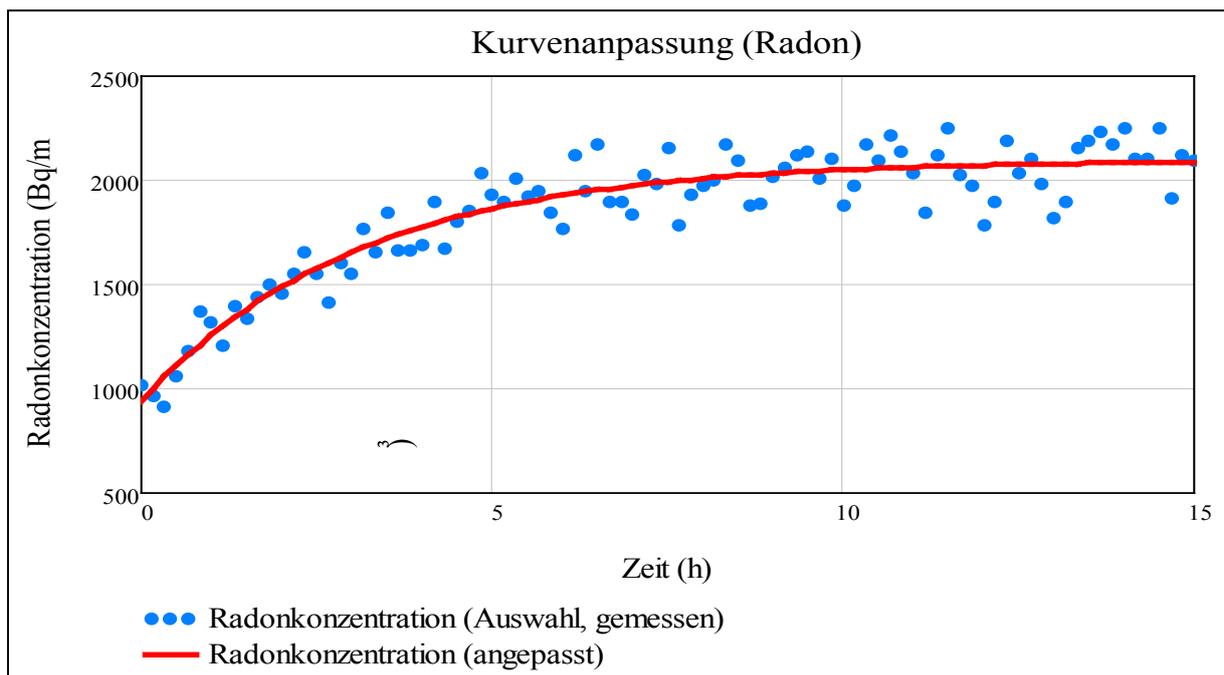


Abbildung 21: Beispiel einer gemessenen Sättigungskurve mit eingezeichneter Anpassungskurve

Diese Sättigungskurve wird mit einem Radonmonitor aufgezeichnet. Durch Anwendung des Levenberg-Marquardt-Algorithmus werden die Zeitkonstante τ , die Anfangskonzentration $c_{Rn}(0)$ und die Sättigungskonzentration $c_{Rn}(\infty)$ an folgende Funktion angepasst:

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

Formel 5

Über die angepasste Zeitkonstante τ und die angepasste Sättigungskonzentration $c_{Rn}(\infty)$ kann über folgende Gleichung die Radonquellstärke berechnet werden [1]⁴⁸:

$$Q_{Rn,V} = \frac{c_{Rn}(\infty)}{\tau} - c_{Rn,a} \cdot \left(\frac{1}{\tau} - \lambda\right)$$

Formel 6

Hierbei wird zunächst von einer konstanten Radonquellstärke ausgegangen. In realen Wohngebäuden sind jedoch Schwankungen der Radonquellstärke zu erwarten. Kurzzeitige Schwankungen im Bereich von wenigen Stunden können je nach gewünschter Zeitauflösung als unkritisch betrachtet werden. Langzeitschwankungen im Bereich von mehreren Tagen können zu einem Drift der rekonstruierten Luftwechselrate führen und bei Langzeitmessungen das Ergebnis verfälschen. Je nach Ausprägung dieser Langzeitschwankung ist eine wiederholte Ermittlung der Radonquellstärke im Abstand von wenigen bis mehreren Tagen notwendig.

Quellstärkenberechnung über Dichtheitsmessung

Eine weitere und von dem oben beschriebenen Verfahren unabhängige Möglichkeit, die Radonquellstärke zu bestimmen, besteht über die Dichtheitsmessung, die häufig durch das Blower-Door[®]-Verfahren erfolgt. Zur Durchführung einer Dichtheitsmessung kommt ein Ventilator zum Einsatz, dessen Förderleistung so geregelt wird, dass eine bestimmte Druckdifferenz zwischen Gebäudeinnerem- und äußerem erreicht wird (z.B. $\Delta p = 50 Pa$). Über den Volumenstrom und das Gebäudevolumen kann die Luftwechselrate für die eingestellte Druckdifferenz berechnet werden.

$$k_{\Delta p} = \frac{\dot{V}_{\Delta p}}{V}$$

Formel 7

Um auf die Radonquellstärke schließen zu können wird in dem Raum, in dem der Ventilator installiert ist, die Radonkonzentration c_{Rn} gemessen. Hat die Radonkon-

zentration einen stabilen Zustand erreicht, so handelt es sich dabei um diejenige Radonkonzentration, die durch die Radonquelle nachgeliefert wird. Die Radonquellstärke, die bei einer eingestellten Druckdifferenz besteht, errechnet sich schließlich über:

$$Q_{Rn,V,\Delta p} = k_{\Delta p} \cdot c_{Rn}$$

Formel 8

Werden mit dem Ventilator unterschiedliche Druckdifferenzstufen angefahren, so kann die Radonaustrittsrate in Abhängigkeit der Druckdifferenz ermittelt und aufgetragen werden. Ein Nachteil der Methode ist, dass nur die Quellstärke unter besonderen Bedingungen, also dem angelegten Unterdruck, bestimmt wird. Diese ist deutlich größer als unter Normalbedingungen. Aus dem Verlauf der Quellstärke bei angelegtem Unterdruck kann die Quellstärke unter Normalbedingungen (im Mittel ca. 2,5 Pa) durch Extrapolation abgeschätzt werden. Anschließend kann ein Vergleich mit der über die Aufbaukurve ermittelten Radonquellstärke erfolgen.

Die Messunsicherheit (2σ) für die Radonaustrittsrate berechnet sich mit Formel 9:

$$\frac{\Delta R_A}{R_A} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V^\circ}{V^\circ}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2}$$

Formel 9: Berechnung der Messunsicherheit für die Radonaustrittsrate

Mit:

R_A = Radonaustrittsrate

V° = Volumenstrom

c = Radonkonzentration

Die Unsicherheit der Radonkonzentration setzt sich aus der statistischen Unsicherheit mit $2 \cdot \sqrt{n}$ und der Gerätemessunsicherheit mit 7% zusammen. Für die Berechnung wird die Radonkonzentration in die Impulsrate umgerechnet. Bei einem Messin-

tervall von 10 Minuten entsprechen 2 Bq/m³ einer Impulsrate von 1 Imp/10 min. Die Messunsicherheit für den Volumenstrom beträgt ebenfalls 7%.

Quellstärkenermittlung über die ermittelten Luftwechselraten

Die Luftwechselrate, berechnet aus dem Verfahren des CO₂-Abfalls oder der Unterdruck-Messung, wird mit der Anfangs- und Endkonzentration des Radons in Formel 10 eingegeben.

$$Q = \frac{-c_{(n-1)} \cdot (k + \lambda) + c_{(n)} \cdot (k + \lambda) \cdot e^{(k+\lambda) \cdot t} - c_A \cdot k \cdot (e^{(k+\lambda) \cdot t} - 1)}{e^{((\lambda+k) \cdot t)} - 1}$$

Formel 10: Berechnung der Radonquellstärke

Mit: Q= Quellstärke

C_A= Radon-Außenkonzentration

k= Luftwechselrate

λ= Zerfallskonstante

t= Zeit für den Anstieg des Radons von c_(n-1) auf c_(n)

c_(n-1)= Anfangskonzentration des Radons

c_(n)= Endkonzentration des Radons

Die Radonkonzentrationen c_(n-1) und c_(n) wurden aus dem Radonverlauf abgelesen. Es wurden Verläufe gewählt, in denen zeitgleich ein CO₂-Abfall und ein Radonanstieg zu erkennen sind. So ist sichergestellt, dass beide Methoden Anwendung finden, um die Ergebnisse im Abschnitt „Auswertung und Ergebnisse“ miteinander vergleichen zu können. Die fehlende CO₂-Konzentration in den Kellerräumen verhindert die Bestimmung der Quellstärke mit der CO₂-Methode in diesen Räumen. Aus diesem Grund wurde jeweils ein Raum ausgewählt, in dem sich ausreichend CO₂ konzentriert, um daraus die Luftwechselrate zu bestimmen. Es wurde darauf geachtet, dass sich dieser Raum nicht im Obergeschoss befand.

Dennoch stellt die willkürliche Auswahl des Messortes sowie des Zeitpunktes eine erhebliche zusätzliche Unsicherheit bezüglich der Sättigungskonzentration dar. Die

berechnete Quellstärke stellt durch diesen Fehlereinfluss und die Ungenauigkeit der beiden Methoden zur Berechnung der Luftwechselrate lediglich eine erste Näherung dar. Die Quellstärke aus der Berechnung der Luftwechselrate die mit der Unterdruck-Messung bestimmt wurde, bezieht sich auf den Zeitraum eines gesamten Jahres. Die Quellstärke aus dem CO₂-Abfall bezieht sich nur auf den Tag der Berechnung.

Die Ergebnisse der Quellstärkenbestimmung über die Dichtheitsmessung sowie über den CO₂-Abfall werden für jedes Haus im Abschnitt „Auswertung und Ergebnisse“ dargestellt. Das Verfahren über die Sättigungskurve wird anhand eines Beispiels in diesem Kapitel erläutert.

Filterung

Bei Berechnung der Luftwechselrate $k(n)$ nach Formel 3 bestehen hohe Anforderungen an das Radon-Messsignal. Durch den Term $c_{Rn}(n+1) - c_{Rn}(n)$ besteht eine hohe Rauschempfindlichkeit, da zur Berechnung immer Radon-Messwerte-Paare herangezogen werden. Dies kann mit Hilfe von Abbildung 18 veranschaulicht werden, die den Beispiel-Verlauf aus Abbildung 22 behandelt. Dieses Messsignal weist ein Rauschen auf, das im Vergleich mit einer eingezeichneten Anpassungskurve gut sichtbar wird. Bei Betrachtung benachbarter Radonmesswerte können durch das Rauschen bedingte Differenzen von z.B. $\Delta c_{Rn} = c_{Rn}(n+1) - c_{Rn}(n) = -400 \frac{Bq}{m^3}$ auftreten, wo gemessen an der Anpassungskurve eine Differenz von ca. $\Delta c_{Rn} = 20 \frac{Bq}{m^3}$ vorliegt. Wird die durch das Rauschen beeinflusste Differenz zur Berechnung der Luftwechselrate $k(n)$ nach Gleichung 3 herangezogen, können große Abweichungen in der berechneten Luftwechselrate auftreten.

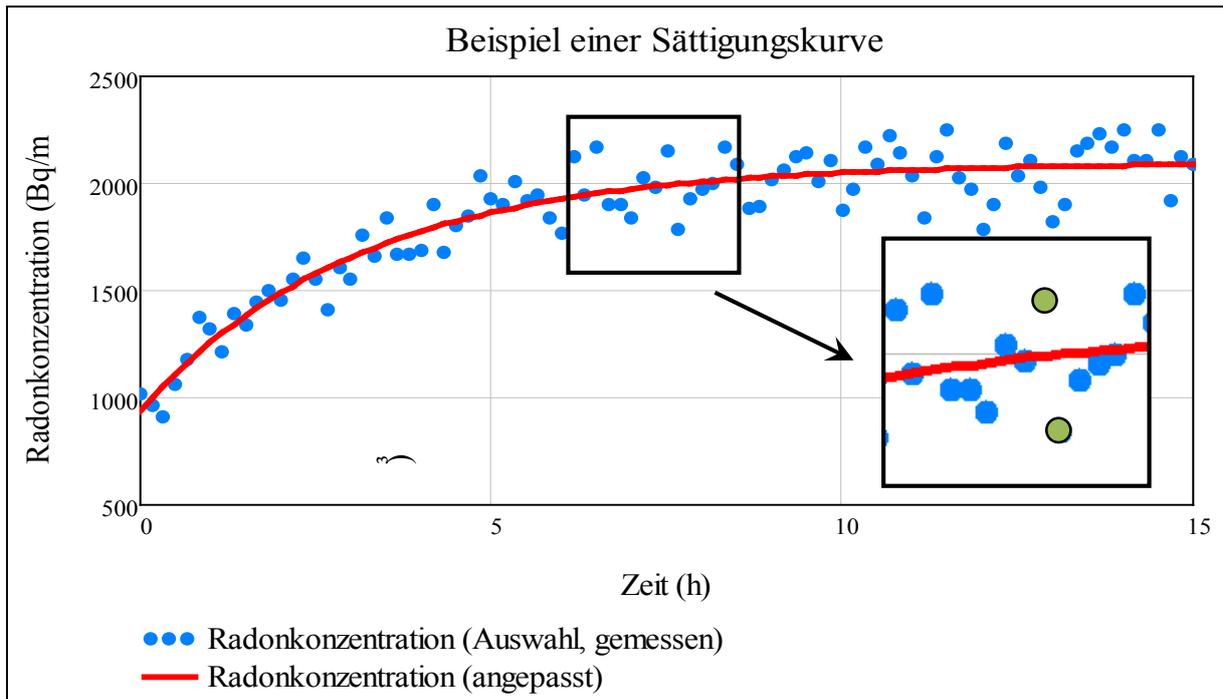


Abbildung 22: Beispiel einer gemessenen Sättigungskurve (blaue Punkte) mit eingezeichneter Anpassungskurve (roter Verlauf). Der hervorgehobene Bereich zeigt ein Beispiel einer durch das Rauschen bedingten Abweichung. Die grün markierten Punkte stellen benachbarte Radonmesswerte dar. Ihre Differenz liegt bei $\Delta c_{Rn} \approx -400 \frac{Bq}{m^3}$. Bei Betrachtung der zugehörigen Anpassungskurve wird ersichtlich, dass die tatsächliche Differenz an dieser Stelle jedoch bei $\Delta c_{Rn} \approx 20 \frac{Bq}{m^3}$ liegt.

Aufgrund dieser Rauschempfindlichkeit ist es notwendig, das Messsignal mit geeigneten Filtern zu bearbeiten. Der Einsatz von Fensterfunktionen erweist sich hier als gut geeignet⁴⁹. Die Vorgehensweise erfolgt in vier Schritten:

1. Die Datenreihe des Messsignals wird mittels des sogenannten „zero-paddings“ mit Nullen erweitert, so dass dessen Datenlänge mit der Datenlänge der Fensterfunktion übereinstimmt.
2. Die erweiterte Datenreihe wird über die Fouriertransformation in den Frequenzbereich transformiert.
3. Das Frequenzspektrum wird mit einer passenden Fensterfunktion multipliziert.
4. Schließlich erfolgt eine inverse Fouriertransformation, um das gefilterte Frequenzspektrum wieder in den Zeitbereich zu transformieren.

Um eine optimale Filterung mit möglichst wenig Verlust von Nutzsignalen zu erreichen, ist eine passende Wahl der Filterfunktion und der Fensterbreite von großer Bedeutung. Diese Auswahl hängt individuell vom Frequenzspektrum des gemessenen

Signals ab. Die so gefilterte Datenreihe kann schließlich für die Rekonstruktion der Luftwechselrate herangezogen werden.

Anwendung auf Gebäude

In einem realen Gebäude existiert aufgrund des komplexen Aufbaus (mehrere Räume, mehrere Etagen) eine Vielzahl an Mechanismen der Radonausbreitung. In den Kellerräumen und anderen erdberührenden Räumen erfolgt der Radoneintritt, da dort die relevanten Radonquellen zu erwarten sind. Durch Konvektion und Diffusion zwischen den einzelnen Räumen erfolgt die Radonausbreitung.

Um sich einem solchen System, bestehend aus mehreren Räumen, mathematisch anzunähern, kann basierend auf dargestelltem Modell ein Gleichungssystem erstellt werden. In diesem Gleichungssystem wird jeder Raum über eine eigene Differentialgleichung beschrieben, die Luftströmungen anstelle der Luftwechselrate enthalten. Für jeden Raum müssen alle möglichen Luftströmungen zu Nachbarräumen oder zur Außenluft und alle vorhandenen Radonquellen berücksichtigt werden. Bei der Berechnung dieses Systems besteht die Schwierigkeit, dass mehr Unbekannte als Gleichungen vorliegen. Jedoch kann eine iterative Näherung erfolgen, indem zunächst Schätzwerte der einzelnen Strömungen angegeben werden. Unter Verwendung der berechneten Luftströmungen erfolgt eine erneute Berechnung. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die Ergebnisse konvergieren.

Diese iterative Vorgehensweise birgt besonders in komplexen Systemen das Risiko, dass die Luftströmungen gegen falsche Werte konvergieren. In der Praxis besteht das Problem, dass eine Überprüfung der Berechnungen nicht erfolgen kann, da die Luftströmungen in einem realen Gebäude messtechnisch nicht zugänglich sind.

Im Rahmen des Projektes wird von der Anwendung eines solchen Gleichungssystems abgesehen, da dieses auf die Berechnung aller im Gebäude auftretenden Luftströmungen abzielt. Die Kenntnis aller Luftströmungen wird als nicht zielführend angesehen, da der Aufwand der Berechnung nicht in Relation zum Nutzen steht. Vielmehr besteht Interesse an dem Luftaustausch des gesamten Innenraums mit der Außenluft, der über die Gesamtluftwechselrate beschrieben ist. Die Kenntnis dieser Gesamtluftwechselrate ermöglicht die Beurteilung der Situation des gesamten Gebäudes und wird daher als die maßgebliche Größe erachtet. Zur Ermittlung der Gesamtluftwechselrate wird das gesamte Gebäude als ein einzelner Raum betrachtet.

Vorgehensweise

Um ein Gebäude als einen einzelnen Raum betrachten zu können, ist es notwendig, zeitliche Verläufe der Radonkonzentration aller Räume zu einem gemittelten Verlauf

zusammenzufassen und die Radonquellstärke des gesamten Gebäudes zu berechnen. Die notwendigen Mittelwertbildungen erfolgen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Raumvolumina. Insgesamt ergibt sich folgende Vorgehensweise:

1. Ermittlung der Radonquellstärken der Kellerräume und anderer erdberührender Räume. Äquivalent zu den im Kapitel „Bestimmung der Radonquellstärke“ beschriebenen Zusammenhängen gilt für Raum x :

$$Q_{Rn,V,x} = \frac{c_{Rn,x}(\infty)}{\tau_x} - c_{Rn,a} \cdot \left(\frac{1}{\tau_x} - \lambda \right)$$

Formel 11

Bildung der mittleren Radonquellstärke des Gebäudes $\bar{Q}_{Rn,V}$ unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Raumvolumina V_x :

$$\bar{Q}_{Rn,V} = \sum Q_{Rn,V,x} \cdot \frac{V_x}{\sum V_x}$$

Formel 12

2. Bildung eines gemittelten Verlaufs der Radonkonzentration $\bar{c}_{Rn}(t)$ unter Berücksichtigung der jeweiligen Raumvolumina V_x :

$$\bar{c}_{Rn}(t) = \sum c_{Rn,x}(t) \cdot \frac{V_x}{\sum V_x}$$

Formel 13

3. Filterung des gemittelten Verlaufs der Radonkonzentration $\bar{c}_{Rn}(t)$ nach den in Kapitel Filterung“ erläuterten Zusammenhängen.

4. Rekonstruktion des Gesamtluftwechselrate $\bar{k}(n)$ nach Gleichung 3 mit der mittleren Radonquellstärke $\bar{Q}_{Rn,V}$ und dem gemittelten Verlauf der Radonkonzentration $\bar{c}_{Rn}(t)$ bzw. $\bar{c}_{Rn}(n)$

$$\bar{k}(n) = \frac{\bar{c}_{Rn}(n+1) - \bar{c}_{Rn}(n) - \bar{Q}_{Rn,V} + \lambda \cdot \bar{c}_{Rn}(n)}{c_{Rn,a} - \bar{c}_{Rn}(n)}$$

Formel 14

Anwendungsbeispiel 1: Mittlere Tagesgänge

Als Anwendungsbeispiel für die erläuterte Vorgehensweise werden Messdaten herangezogen, die im Rahmen des Projektes aufgenommen wurden. An drei Messpunkten im Kellergeschoss und an zwei Messpunkten im Erdgeschoss des Messobjekts wurden die jeweiligen Verläufe der Radonkonzentration gemessen. Bei gut erkennbaren Tagesgängen, wie im vorliegenden Beispiel, wird es als sinnvoll erachtet, über den Messzeitraum (im Beispiel 14 Tage) für jeden Messpunkt mittlere Tagesgänge zu bilden, um die tageszeitlich abhängigen Radonverläufe statistisch zu stabilisieren (siehe Abbildung 23). Tageszeitlich unabhängige Einflüsse, wie z.B. die Wetterlage, können dabei aber nicht ermittelt werden.

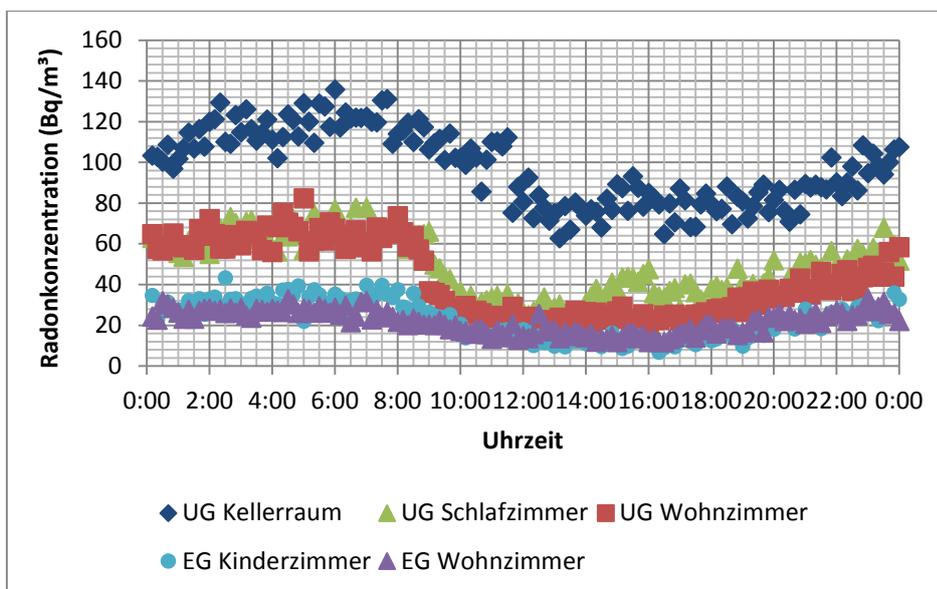


Abbildung 23: Mittlere Tagesgänge der Radonkonzentration in den einzelnen Räumen des Messobjekts

In den drei Räumen des Untergeschosses werden die jeweiligen Radonquellstärken ermittelt. Es ergeben sich folgende Werte:

$$Q_{Rn,V,UG_Kellerraum} = 60 \frac{Bq}{m^3h}$$

$$Q_{Rn,V,UG_Wohnzimmer} = 37 \frac{Bq}{m^3h}$$

$$Q_{Rn,V,UG_Schlafzimmer} = 19 \frac{Bq}{m^3h}$$

Unter Berücksichtigung der jeweiligen Raumvolumina ergibt sich nach Gleichung 12 die mittlere Radonquellstärke des Gebäudes.

$$\bar{Q}_{Rn,V} = 44 \frac{Bq}{m^3h}$$

Um mit dieser Radonquellstärke die Gesamtluftwechselrate zu rekonstruieren, wird im Folgenden, ebenfalls unter Berücksichtigung unterschiedlicher Raumvolumina, zunächst über Gleichung 13 ein über alle Räume gemittelter Verlauf der Radonkonzentration berechnet (siehe Abbildung 24). Vor der Bildung des mittleren Verlaufs wird geprüft, ob eine Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Verläufen erkennbar ist, die durch die Dynamik der Radonausbreitung bedingt sein kann.

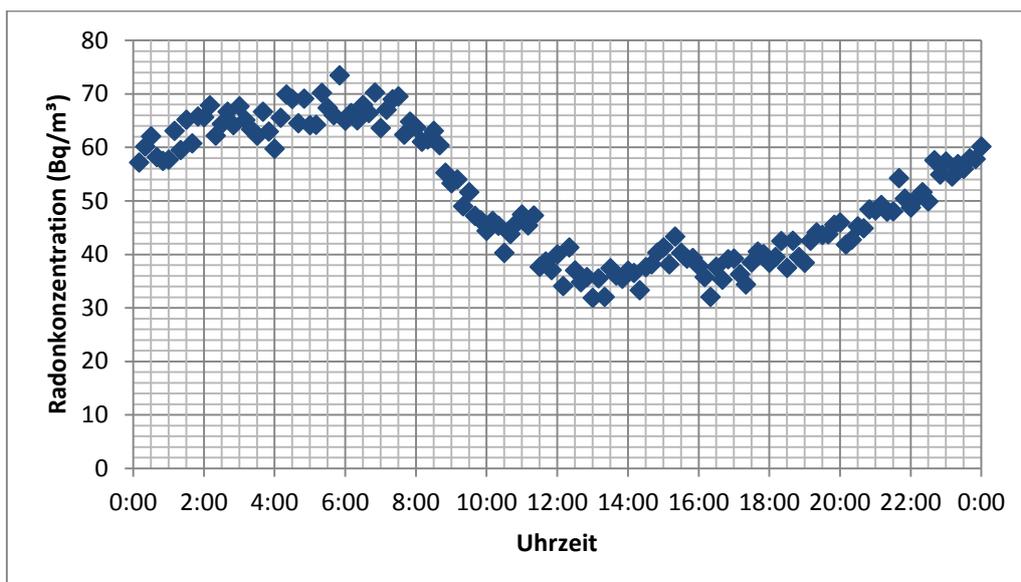


Abbildung 24: Mittlerer Tagesgang des mittleren Verlaufs der Radonkonzentration

Nach einer Filterung dieses Verlaufs ergibt sich schließlich über Anwendung von Gleichung 14 die Gesamtluftwechselrate, deren Verlauf in folgender Abbildung dargestellt ist.

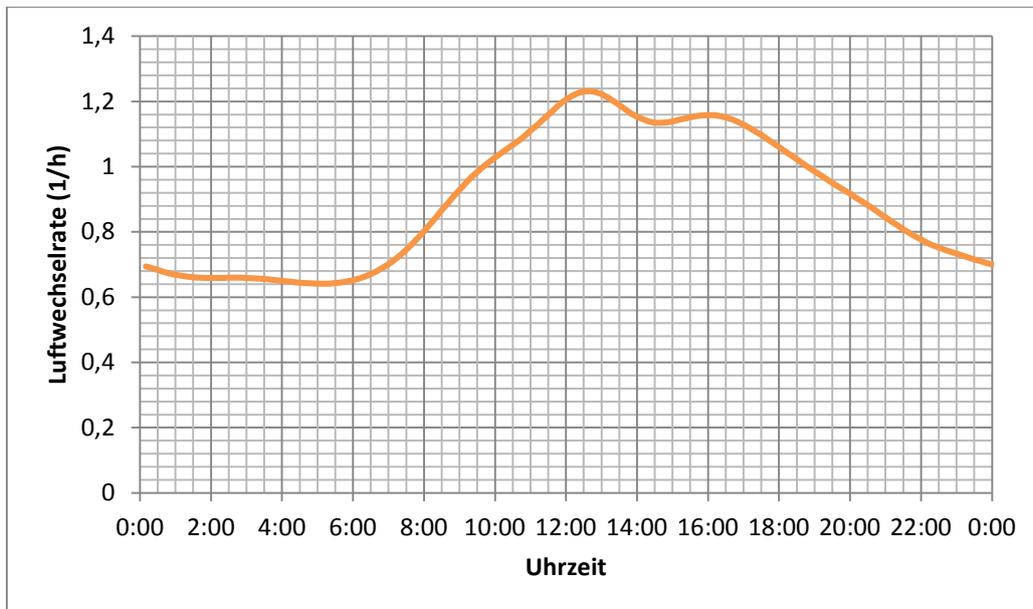


Abbildung 25: Mittlerer Tagesgang der Gesamtluftwechselrate. Es wurde eine mittlere Radonquellstärke von $\bar{Q}_{Rn,V} = 44 \frac{Bq}{m^3h}$ verwendet.

Der in Abbildung 25 dargestellte Verlauf der Gesamtluftwechselrate stellt für den Messzeitraum über 14 Tage den mittleren Tagesgang dar.

Die mittleren Tagesgänge der mittleren Radonkonzentration und der Gesamtluftwechselrate werden im Weiteren zur statistischen Analyse herangezogen, um den Einfluss tageszeitabhängiger Einflussgrößen zu untersuchen.

Anwendungsbeispiel 2: Langzeitverlauf

Im Gegensatz zu Anwendungsbeispiel 1 wird im folgenden Beispiel auf eine Bildung von mittleren Tagesgängen verzichtet und mit Langzeitverläufen gearbeitet. Die Messdaten wurden ebenfalls im Rahmen des Projektes aufgenommen. Die Laufzeit der Messung betrug 13 Tage. Die Vorgehensweise erfolgt äquivalent zu Anwendungsbeispiel 1 nach Kapitel „Vorgehen“. Hierbei ergibt sich der folgende mittlere Verlauf der Radonkonzentration:

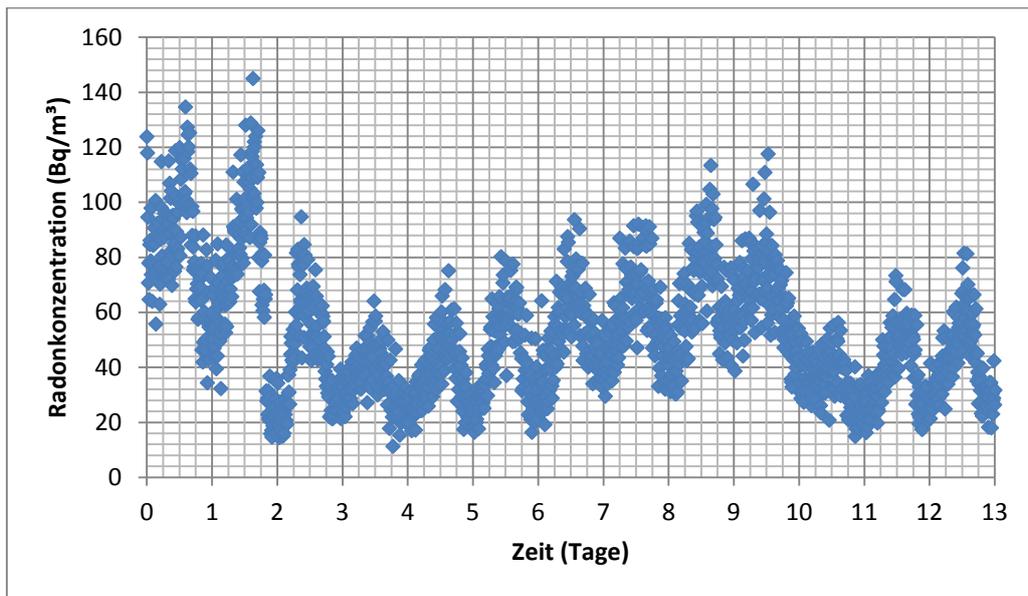


Abbildung 26: Mittlerer Verlauf der Radonkonzentration einer Langzeitmessung

Aus diesem Verlauf wird, nachdem er einer Filterung unterzogen wurde, über Gleichung 14 die Gesamtluftwechselrate berechnet.

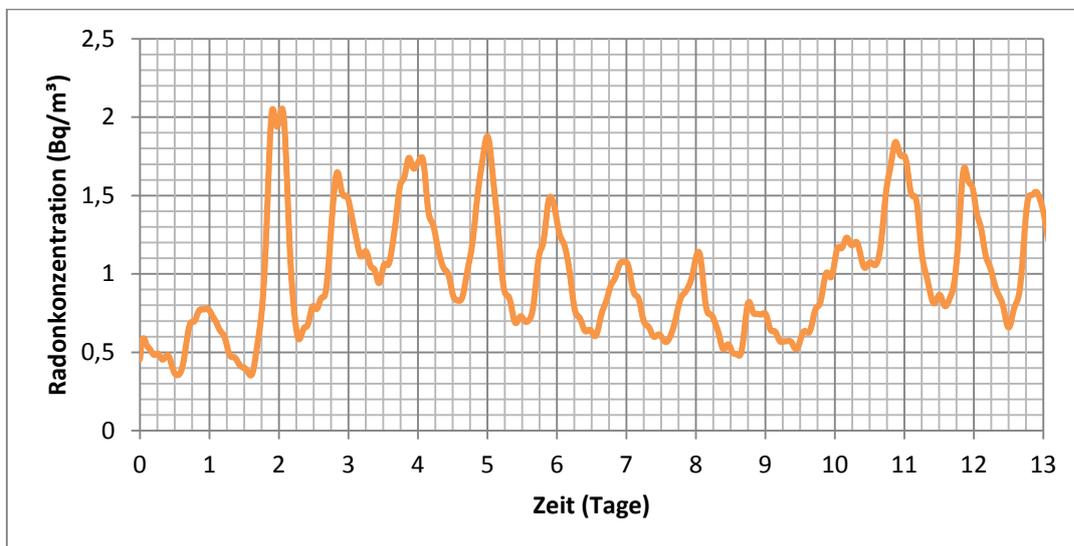


Abbildung 27: Gesamtluftwechselrate

Dieses Beispiel macht deutlich, dass auch Langzeitverläufe rekonstruiert werden können. Im Gegensatz zur Bearbeitung mittlerer Tagesgänge ist es bei Langzeitverläufen möglich, tageszeitlich unabhängige Einflüsse zu ermitteln.

Untersuchung der Radonausbreitung

Zur Untersuchung der Radonausbreitung werden die Radonmessreihen der einzelnen Räume herangezogen und verglichen. Sind markante Ereignisse oder Tagesgänge auflösbar, so können die Radonmessreihen auf Phasenverschiebungen untersucht werden. Diese können auftreten, wenn die Wege des Radons innerhalb eines Gebäudes Verzögerungen von ca. > 1 Stunde unterworfen sind. Geringere Verzögerungen können in der Regel aufgrund der Trägheit und der statistischen Unsicherheit der Messgeräte nicht erfasst werden.

Neben einer möglichen Phasenverschiebung ist das in den einzelnen Räumen gemessene Niveau der Radonkonzentration für den Ausbreitungspfad ausschlaggebend. Die Räume, in welchen die höchsten Radonkonzentrationen im Vergleich zu den anderen Räumen des Gebäudes vorliegen, besitzen die für das Gebäude relevanten Radonquellen. Ausgehend von diesen Räumen verteilt sich das Radon im Gebäude. Entlang des Ausbreitungspfades nimmt die Radonkonzentration erwartungsgemäß ab, da die radonhaltige Luft von Raum zu Raum verdünnt wird. Ein Vergleich der Radonkonzentrationsniveaus ermöglicht somit eine Beschreibung des Radoneintritts und der Radonausbreitung in einem Gebäude.

Arbeitspaket 4: Auswertung und Ergebnisse

Mittlere Radonkonzentrationen - Vergleich zwischen vorher und nachher

Messobjekt 1

In Messobjekt 1 wurden vor den Sanierungsmaßnahmen zwei Messintervalle zu verschiedenen Zeiten (Messreihe 030 und Messreihe 064, für kurze Zeit auch Messreihe 033) durchgeführt. Beide großen Messreihen wurden mit dem Messintervall nach den Sanierungsarbeiten (74_76) verglichen. In Messreihe 030 fehlen die Radonkonzentrationen im Keller, da diese nicht vertrauenswürdig waren. Bei dem Messgerät wurde im Nachhinein ein Fehler festgestellt. Die Messwerte im Gästezimmer sind im Verlauf plausibel, allerdings wurde der Nulleffekt vermutlich als zu hoch angesetzt, wodurch der Absolutwert in dieser Messreihe nicht verlässlich ist. Dennoch wurde Messreihe 030 für den Vergleich der mittleren Radonkonzentrationen herangeführt, da die Temperaturen in den beiden Zeiträumen am besten übereinstimmen.

In Abbildung 28 ist die Radonkonzentration im Keller (Untergeschoss), Wohnzimmer (Erdgeschoss) und Schlafzimmer (Obergeschoss) aufgetragen. Im Folgenden sind die Radonkonzentration immer auf der linken Achse und andere Einflussfaktoren auf der rechten Achse aufgetragen.

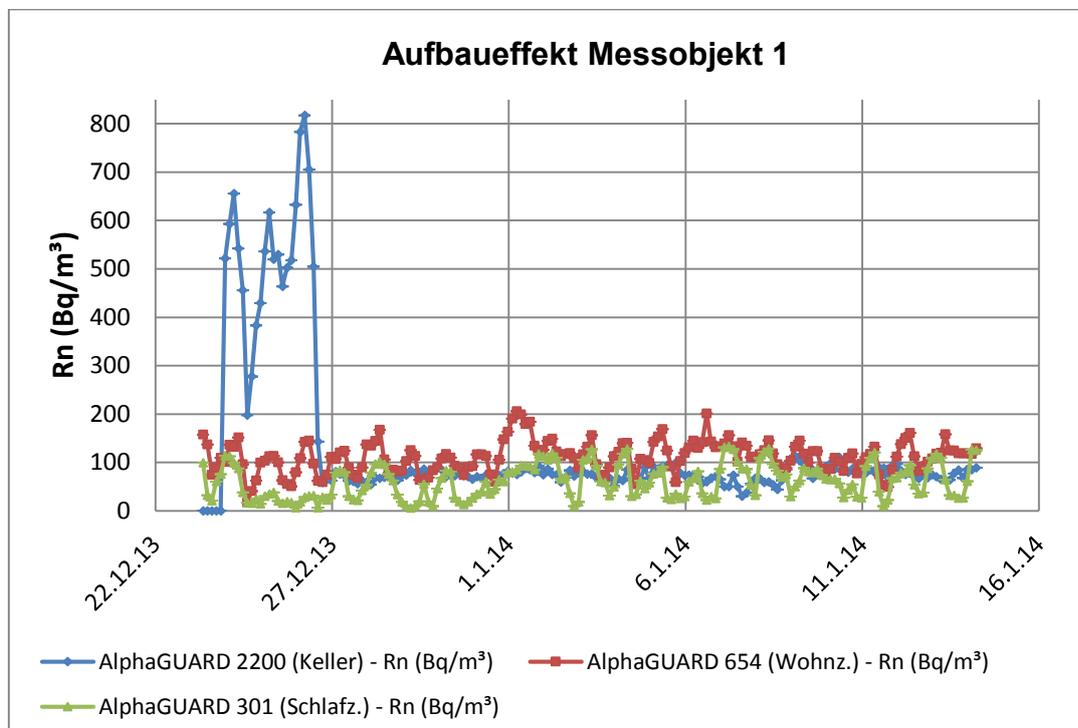


Abbildung 28: Überblick über den Verlauf der Radonkonzentrationen während zwei Wochen inklusive Messung des Aufbaueffekts im Keller

Es ist zu sehen, dass sich im Keller eine große Radonkonzentration ergibt, sobald nicht gelüftet wird. Während der restlichen Messzeit wurde das Fenster im Keller überwiegend gekippt, wodurch sich das Radon nicht mehr konzentrieren konnte. Das Wohnzimmer liegt im Erdgeschoss. Da das Haus in diesem Bereich nicht unterkellert ist, hat das Wohnzimmer eine direkte Verbindung zum Erdreich. Alle Räume sind sehr konsequent gelüftet worden. Dies geschah meist morgens für mindestens 15 Minuten.

Abbildung 29 zeigt den Verlauf der Radonkonzentration sowie der CO₂-Konzentration im Schlafzimmer. Es zeigt sich, dass die Anstiege und Abfälle in etwa zeitgleich stattfinden. Der CO₂-Wert dient als guter Marker zum Erkennen von Abwesenheitszeiten und Lüftung.

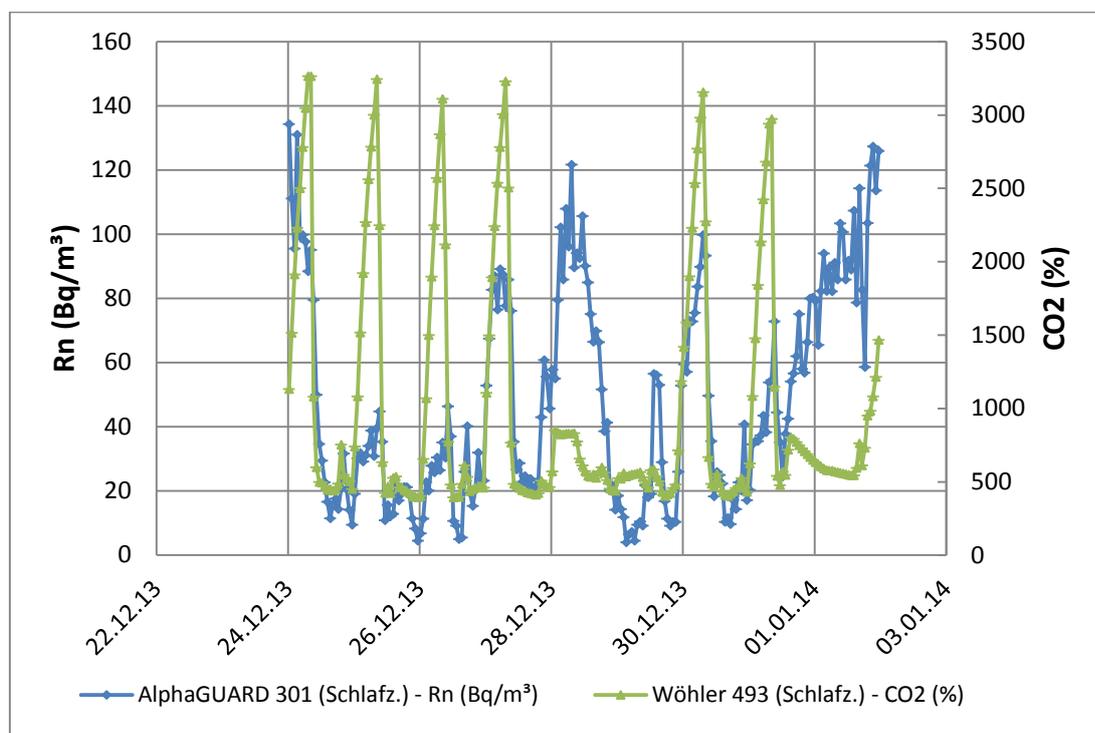


Abbildung 29: Verlauf der Radonkonzentration sowie der CO₂-Konzentration im Schlafzimmer von Messobjekt 1

In Abbildung 30 ist zu sehen, wie die Radonkonzentrationen nach den Renovierungsmaßnahmen verlaufen. Das Kellerfenster war in diesem Zeitraum verschlossen. Das Kinderzimmer wurde in diesem Messzeitraum nur sporadisch genutzt und nicht

so häufig gelüftet wie die bewohnten Räume. Wohn- und Schlafzimmer wurden regelmäßig gelüftet, teilweise über mehrere Stunden.

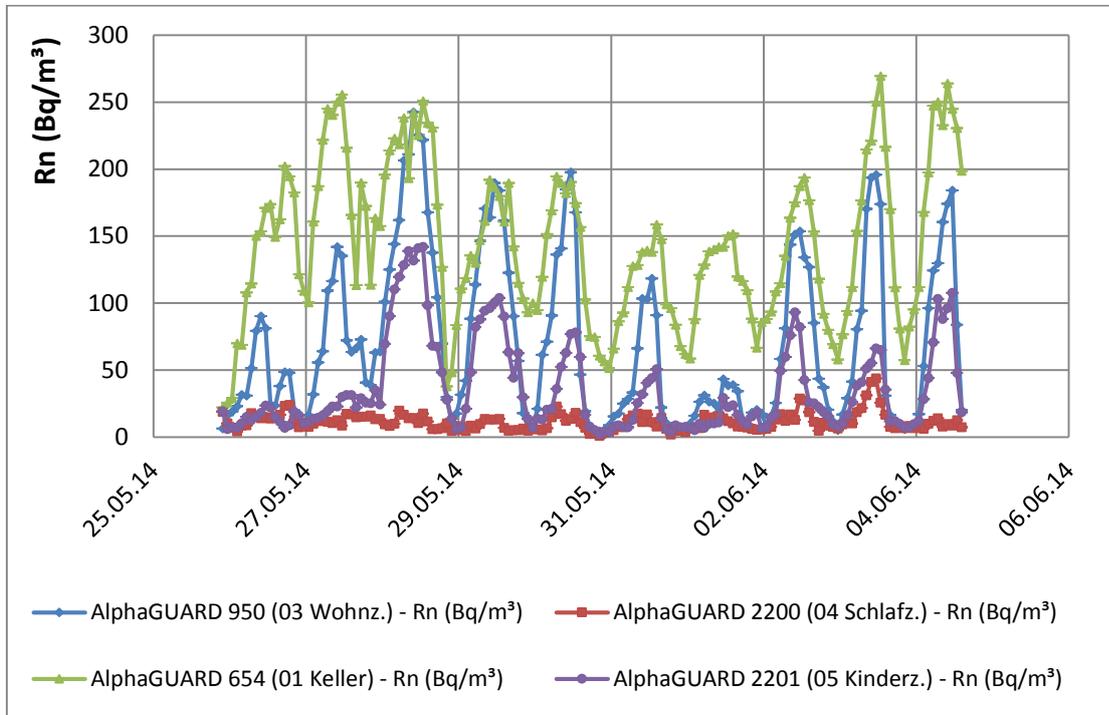


Abbildung 30: Verlauf der Radonkonzentrationen nach den Renovierungsmaßnahmen in Messobjekt 1

Abbildung 31 zeigt den Verlauf der Radonkonzentration vor und nach der Sanierung. Die Bewohner aus Messobjekt 1 haben sehr konsequent gelüftet. In den Sommermonaten stand die Terrassentür des Wohnzimmers teilweise dauerhaft offen. In der Messung nach den Renovierungsarbeiten wurde das Kellerfenster dauerhaft verschlossen. Vor der Sanierung wurde das Fenster meistens gekippt.

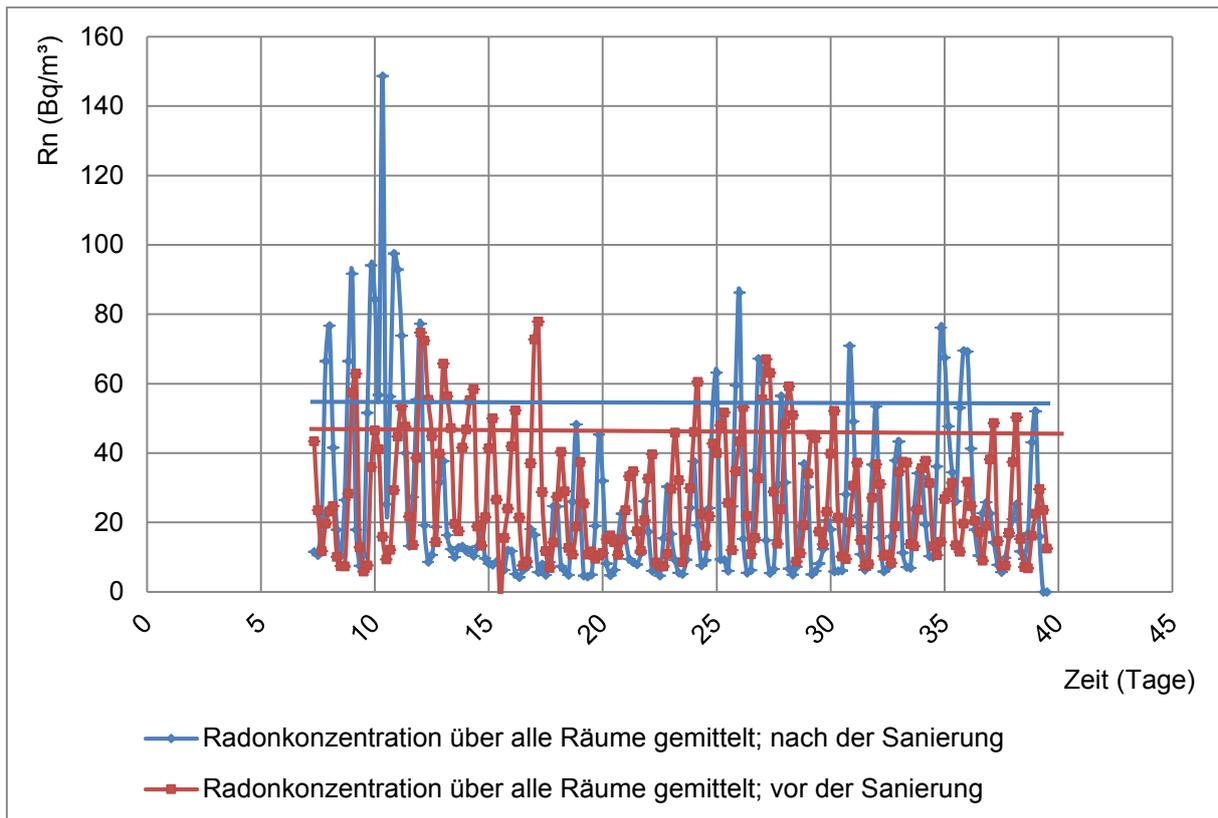


Abbildung 31: Vergleich der Radonverläufe vor und nach der Sanierung in Messobjekt 1 im gesamten Gebäude

In Tabelle 5 und Tabelle 6 ist zu sehen, dass die Radonkonzentration im Durchschnitt von 45 Bq/m^3 auf 58 Bq/m^3 gestiegen ist, also um 29%. Für die Berechnung wurden die Raumvolumina herangezogen und mit diesen der prozentuale Anteil jedes Zimmers am gesamten Haus berechnet. Auf diese Weise konnte die Radonkonzentration mit dem jeweiligen Zimmeranteil gewichtet werden. Im Folgenden wird sich bei der durchschnittlichen Radonkonzentration immer auf den gewichteten Mittelwert bezogen.

Die Steigerung von 29% bezieht sich besonders auf den Keller. Für diesen Wert wurde in der Messung vor der Sanierung ein Mittelwert von 55 Bq/m^3 veranschlagt, der sich aus zwei zusätzlichen Messungen zu anderen Zeitpunkten vor der Sanierung ergeben hat (Messreihe 033 und 064). Vor der Sanierung wurde der Keller in regelmäßigen Abständen gelüftet, nach der Sanierung nicht mehr. Diese veränderten Messbedingungen machen einen Vergleich nicht möglich, da die veränderte Lüftung zu einer höheren Radonkonzentration geführt haben kann.

Messobjekt 1	Gesamtes Haus	Schlafzimmer 654	Gästezimmer 950	Wohnzimmer 301	Flur atmos	Keller
	Vorher 030					
Mittelwert Radon [Bq/m ³]	45±5	14±1	45±3	66±5	30±6	40±3 (aus MR 33) / 77±5 (aus MR 064)
Varianz Radon [(Bq/m ³) ²]	1502	119	891	2832	1617	
Median Radon [Bq/m ³]	32	11	23	54	27	-
Min Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	-12	6	-6	9	-164(absolut)	-
Max Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	192	53	354	213	250(absolut)	-
Amplitude saisonaler Anteil [Bq/m ³] ^v	63	15	35	114	60	-
Mittelwert Außentemperatur [°C]	16,1					
min Außentemperatur [°C]	5,4					
max Außentemperatur [°C]	30,2					
Varianz Außentemperatur [°C ²]	16,7					
Innentemperatur [°C] und Varianz [°C ²]		21/4	20/2	21/1	-	-
mittlere Luftfeuchte innen [%] und Varianz		57/38	56/44	51/30	-	-

Tabelle 5: Übersicht relevanter Messwerte in Messobjekt 1 vor der Sanierung

^v Siehe Abschnitt Einflussfaktoren; Temperaturabhängigkeit

Messobjekt 1	Gesamtes Haus	Schlafzimmer 2200	Gästezimmer 2201	Wohnzimmer 950	Flur 301	Keller 654
	Nachher					
Mittelwert Radon [Bq/m ³]	58±4	12±1	25±2	45±3	29±2	158±11
Varianz Radon [(Bq/m ³) ²]	2826	158	792	2758	1563	7497
Median Radon [Bq/m ³]	45	9	14	23	16	142
Min Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	18	4	6	5	5	61
Max Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	206	52	150	223	156	399
Amplitude saisonaler Anteil [Bq/m ³]	76	17	40	93	62	142
Mittelwert Außentemperatur [°C]	15,7					
min Außentemperatur [°C]	5,3					
max Außentemperatur [°C]	32,6					
Varianz Außentemperatur [°C ²]	23,8					
Innentemperatur [°C] und Varianz [°C ²]	21/3	21/5	20/5	20/3	21/3	21/1
mittlere Luftfeuchte innen [%] und Varianz	56/26	57/30	59/30	55/26	52/23	59/2

Tabelle 6: Übersicht relevanter Messwerte in Messobjekt 1 nach der Sanierung

In den anderen Räumen hat sich die Radonkonzentration von Tabelle 5 vor der Sanierung zu Tabelle 6 nach der Sanierung nicht geändert bzw. ist die Radonkonzentration gesunken. Der Abfall der Radonkonzentration bezieht sich auf eine Reduktion von 21 Bq/m³ im Wohnzimmer und 20 Bq/m³ im Gästezimmer.

Eine Erklärung hierfür könnte das häufigere Lüften über die Terrassentür liefern. Die Maximaltemperatur war in der Messreihe nach der Sanierung höher. Die Bewohner sagten aus, die Terrassentür stünde bei gutem Wetter über einen langen Zeitraum offen. Die Terrassentür führt aus dem Wohnzimmer zum Garten. Die Radonkonzentration war in beiden Messreihen im Wohnzimmer am höchsten, wenn man die hohe Radonkonzentration im Keller nach der Sanierung außer Acht lässt, die aufgrund der vollständig unterlassenen Lüftung entstand. Das Wohnzimmer ist nicht unterkellert und kann durch die direkte Verbindung zum Erdreich als Radonquelle in Frage kom-

men. Dadurch wirkt sich ein erhöhter Luftwechsel dort entsprechend stark auf die Radonkonzentration aus.

Weitere betrachtete Parameter sind die Amplitude des saisonalen Anteils der Radonkonzentrationen sowie deren Maximal- und Minimalwerte, wie im Kapitel „Vorgehen bei der Auswertung“ beschrieben ist. Die Amplitude des saisonalen Anteils zeigt den Schwankungsbereich der Tagesgänge des Radons. Die Maximal- und Minimalwerte sollen Aufschluss über die mögliche Ausprägung der Radonkonzentration liefern. Dabei wurde nicht der absolut höchste bzw. niedrigste Wert herangezogen, sondern der höchste/niedrigste Wert aus einem 90%-Intervall aller Messwerte. Dadurch werden extreme Werte (statistische Ausreißer) abgeschnitten und nicht berücksichtigt.

Die Amplitude ist in den jeweiligen Räumen relativ gleichbleibend. Die mittlere Erhöhung des saisonalen Anteils von 63 Bq/m^3 auf 76 Bq/m^3 resultiert aus der großen Amplitude im Keller, die bei der Messung vor der Sanierung nicht auszuwerten war.

Auch der Maximalwert hat sich im Vergleich zwischen vorher und nachher wenig verändert. Lediglich im Gästezimmer ist die maximale Radonkonzentration vor der Sanierung deutlich höher als nach der Sanierung und auch höher als in allen anderen Räumen. Eine Erklärung dafür könnte ein dort verlaufender Kaminschacht sein. Bei der Unterdruck-Messung ist aufgefallen, dass die Radonkonzentration im Gästezimmer des Obergeschosses schneller ansteigt und auch ein höheres Plateau erreicht als Keller und Wohnzimmer, die eine direkte Verbindung zum Erdreich haben. Daraus kann geschlossen werden, dass ein Radoneintrittspfad vom Untergeschoss in das Gästezimmer des Obergeschosses führt. Der Beginn des Kaminschachts ließ sich leider nicht näher untersuchen, erklärt aber die hohe Radonkonzentration im Gästezimmer.

Es lässt sich sagen, dass sich trotz der Sanierungsmaßnahmen und der damit verbundenen dichteren Gebäudehülle (die Luftwechselzahl fiel von $n_{50}=3,5/h$ auf $n_{50}=2,7/h$) die Radonkonzentration nicht signifikant erhöht hat.

Messobjekt 2

In Messobjekt 2 sind umfassende Renovierungsarbeiten durchgeführt worden. Es wurden die Fenster in den bewohnten Etagen erneuert, eine Fassadendämmung wurde angebracht und auf das bestehende Dach wurde ein weiteres gesetzt, sodass das untere Dach nach Abschluss aller Arbeiten entfernt wird. Dadurch wurde die Gebäudehülle merklich dichter, was auch die Blower-Door®-Messung zeigte. Bei dieser fiel der n_{50} -Wert von $5,6/h$ auf $1/h$ ab. Die mittlere Radonkonzentration hat sich im Rahmen der Messunsicherheit nicht geändert. Die Außentemperatur war vor der Sa-

nierung um 7°C niedriger als nach der Sanierung, was eine wetterbedingt leicht höhere Radonkonzentration vor der Sanierung bewirken kann.

Abbildung 32 zeigt eine Übersicht des gesamten Messzeitraums in jeweils einem Raum des Erd- und Obergeschosses vor der Sanierung. Zu erkennen ist der Aufbaueffekt ab dem 7.11.12. Die Räume wurden allerdings betreten, bevor das Plateau erreicht war.

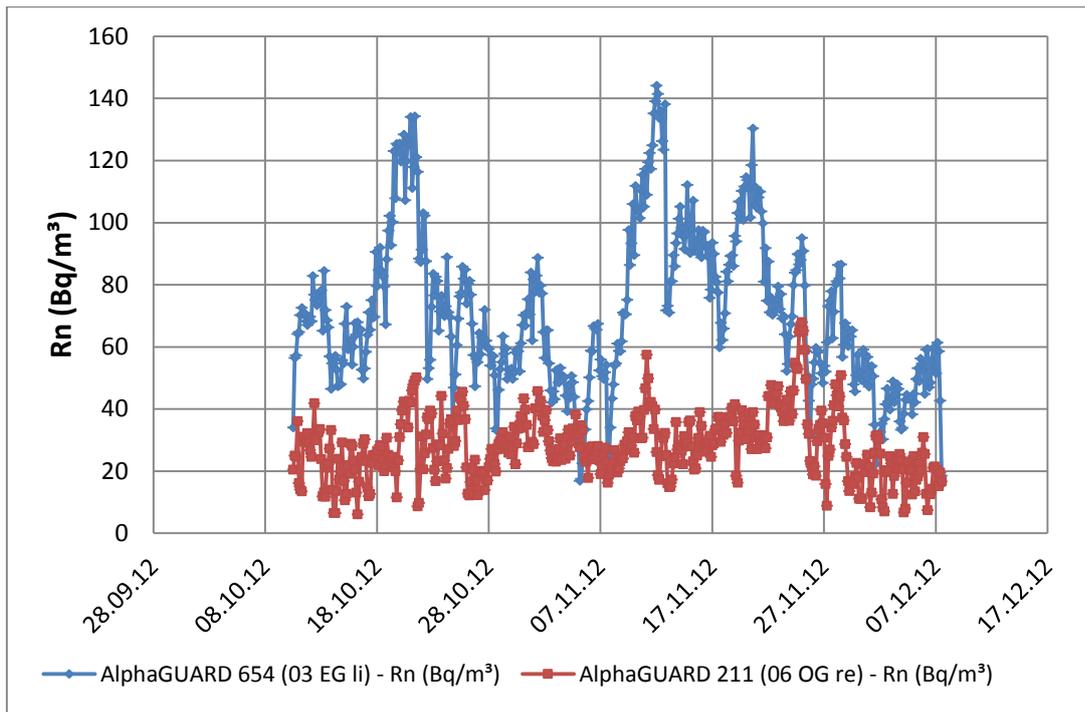


Abbildung 32: Radonkonzentration im Erdgeschoss und im Obergeschoss vor den Renovierungen in Messobjekt 2

Abbildung 33 zeigt den Verlauf der Radonkonzentration im Untergeschoss sowie der Außentemperatur. Im rechten Kellerraum wurde ab dem 7.11.2012 vier Wochen der Messzeit mit dem ATMOS 082 in einem im Raum befindlichen Deckel mittels eines Schlauches „geschnüffelt“ und die Radonkonzentration aufgenommen. Der Deckel deckt eine Öffnung in der Bodenplatte ab, die als mögliche Radonquelle angesehen wurde. Das ATMOS 082 wurde dafür in dem linken Kellerraum durch das ATMOS 066 ersetzt. Die Vermutung einer großen Radonquelle durch diesen Schacht hat sich nicht bestätigt, da die Radonkonzentration im linken Kellerraum im Schnitt größer war als die Radonkonzentration im Schacht.

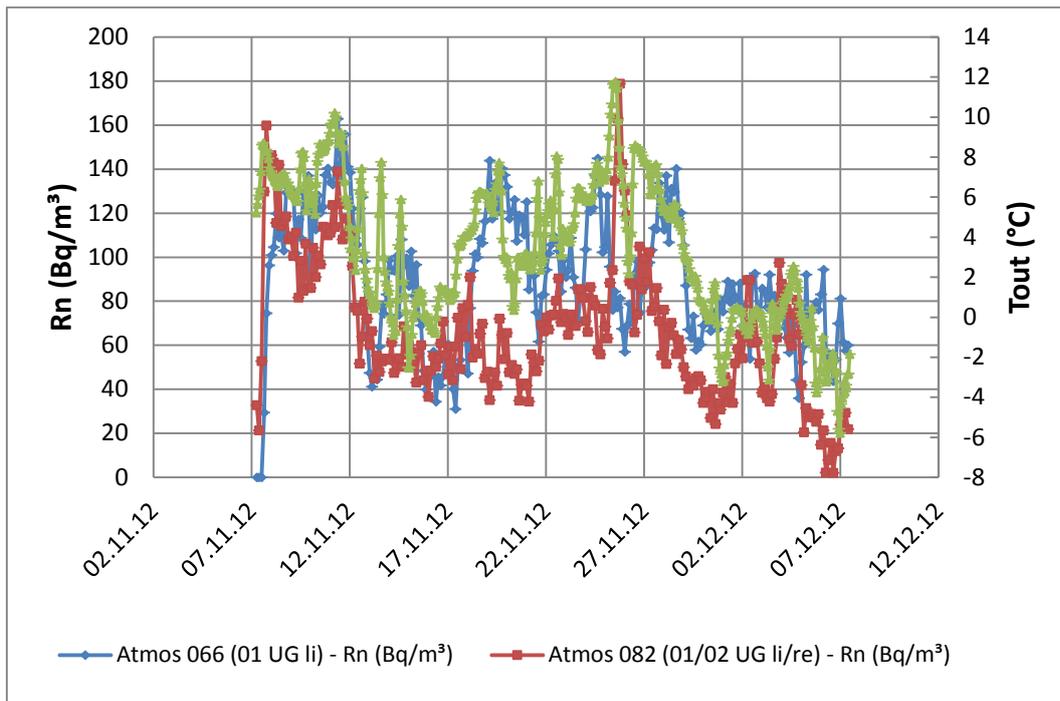


Abbildung 33: Außentemperatur und Radonkonzentration im Untergeschoss von Messobjekt 2 vor der Sanierung

Abbildung 34 zeigt den Verlauf der Radonkonzentration sowie der CO₂-Konzentration während des Messzeitraums nach der Renovierung. Es ist besonders schön zu erkennen, wie stark die Radonkonzentration ansteigt, wenn der Raum nicht bewohnt und dadurch auch nicht gelüftet wird.

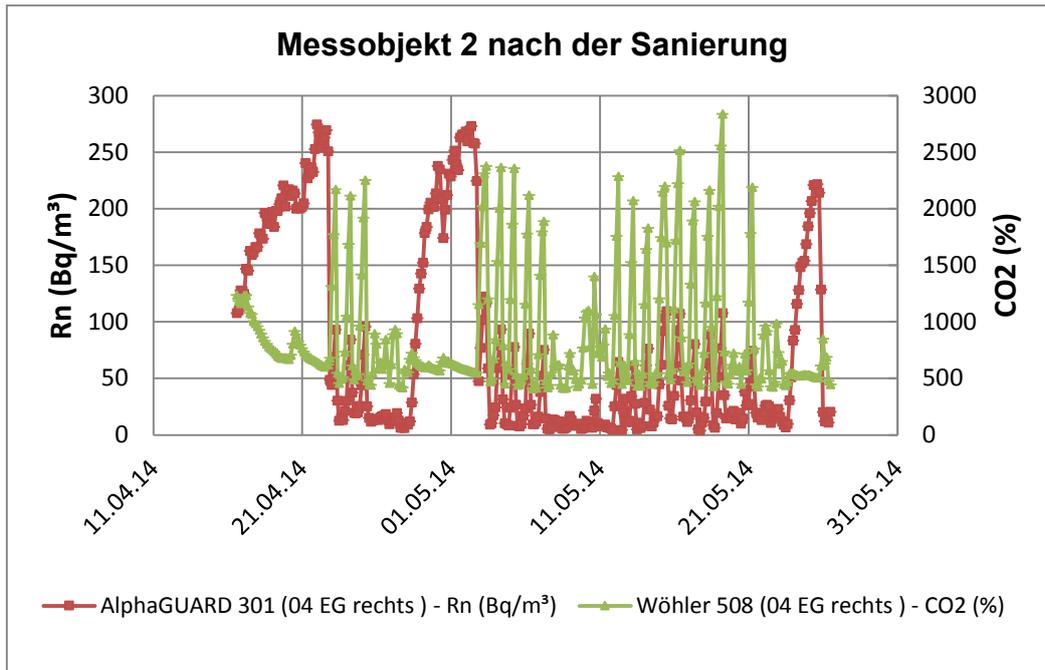


Abbildung 34: Verlauf der Radonkonzentration (linke Achse) und der CO₂-Konzentration (rechte Achse) im Erdgeschoss von Messobjekt 2 nach der Sanierung

Abbildung 35 zeigt den Verlauf der Radonkonzentrationen vor und nach der Sanierung. Zum besseren Vergleich wurden die Werte des Obergeschosses in der Abbildung außer Acht gelassen, da dieses in der zweiten Messung noch saniert wurde und daher keine Messgeräte aufgebaut wurden. Da in diesem Stockwerk besonders geringe Radonkonzentrationen gemessen wurden, wird es auch für die Mittelwertbildung nicht herangezogen, um beide Messintervalle angemessen vergleichen zu können.

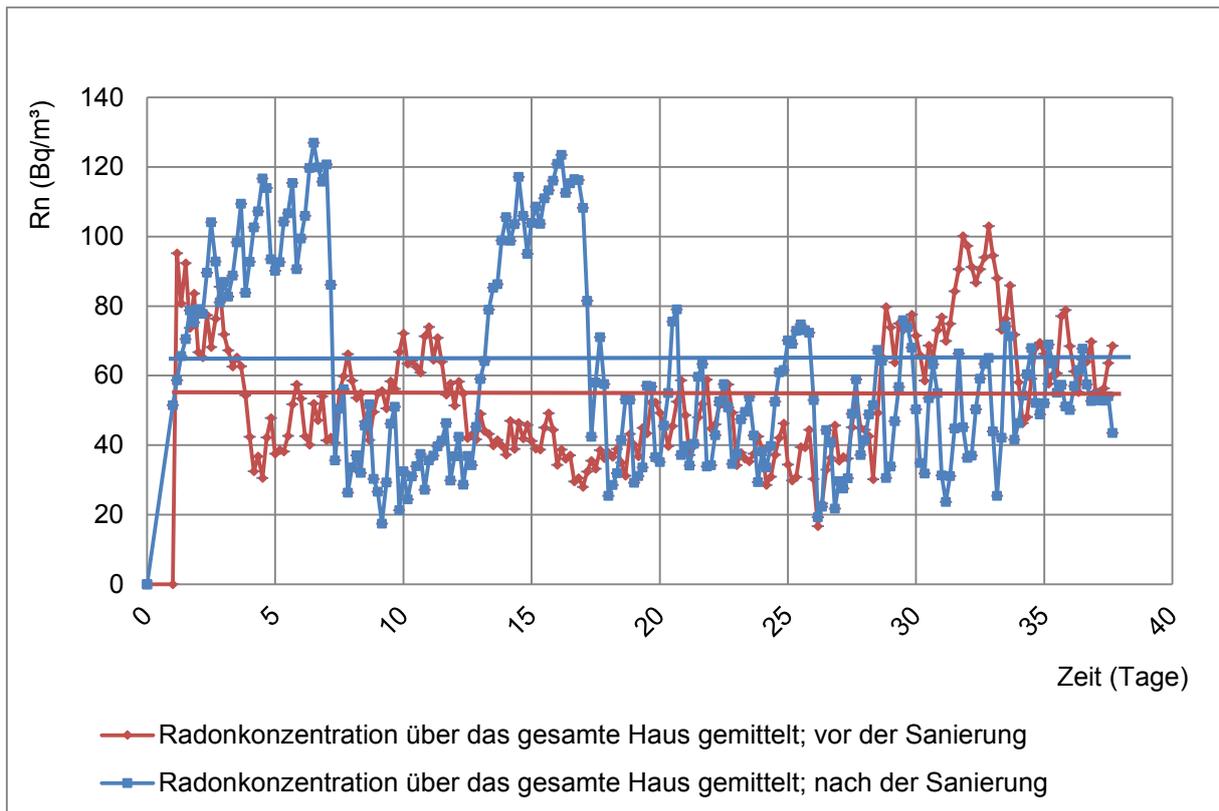


Abbildung 35: Vergleich der Radonverläufe vor und nach der Sanierung in Messobjekt 2

Tabelle 7 und Tabelle 8 zeigen die Ergebnisse aus den Messintervallen vor und nach den Sanierungen zusammengefasst.

Messobjekt Nr.2	Gesamtes Haus	EG re 950	EG li. 654	OG re 211	OG li 301	Keller 066
	Vorher Messreihe:					
Mittelwert Radon [Bq/m ³]	57±6	22±2	77±5	33±2	23±2	91±18
Varianz Radon [(Bq/m ³) ²]	1127	1149,3	1148,9	274	122	2142
Median Radon [Bq/m ³]	54	19	71	31	21	89
Min Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	-4	-19	40	14	13	-54
Max Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	170	112	177	79	55	307
Amplitude saisonaler Anteil [Bq/m ³]	27	53	21	11	8	37
Mittelwert Außentemperatur [°C]	5					
min Außentemperatur [°C]	-6					
max Außentemperatur [°C]	22					
Varianz Außentemperatur [°C ²]	21					
Innentemperatur [°C] und Varianz [°C ²]		14/2	16/4	19/2	15/6	-
mittlere Luftfeuchte innen [%] und Varianz		54/27	64/8	57/18	51/23	-

Tabelle 7: Übersicht relevanter Messwerte in Messobjekt 2 vor der Sanierung

Messobjekt Nr.2	Gesamtes Haus	EG re 301	EG li 950	OG	Keller li 654	Keller re. 2201
	Nachher Messreihe:					
Mittelwert Radon [Bq/m ³]	67±6	82±6	56±4	-	55±4	129±9
Varianz Radon [(Bq/m ³) ²]	2658	8109	1395	-	684	3937
Median Radon [Bq/m ³]	53	33	48	-	52	127
Min Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	21	7	18	-	25	48
Max Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	192	316	175	-	126	280
Amplitude saisonaler Anteil [Bq/m ³]	43	53	63	-	18	59
Mittelwert Außentemperatur [°C]	12					
min Außentemperatur [°C]	1					
max Außentemperatur [°C]	27					
Varianz Außentemperatur [°C ²]	22					
Innentemperatur [°C] und Varianz [°C ²]		19/2	18/1	-	13/0,3	13/0,2

Tabelle 8: Übersicht relevanter Messwerte in Messobjekt 2 nach der Sanierung

Im Keller ist die mittlere Radonkonzentration im Rahmen der Messunsicherheiten gleich geblieben. Dieser ist nicht saniert worden und hatte sehr undichte Fenster, was einen hohen natürlichen Luftwechsel bewirkt. Die genaue Luftwechselrate im Keller wurde nicht getrennt vom gesamten Haus gemessen. Während der Luftdichtheitsmessung wurden die Kellerfenster jedoch als extreme Zugluftquelle identifiziert und verdichtet. Der anschließende Luftwechsel n_{50} ergab einen Wert von 5,6/h im gesamten Haus. Daraus lässt sich schließen, dass der n_{50} -Wert im Keller über 5,6/h liegt.

Um die Messreihe genauer zu analysieren, wurden die Maximal- und Minimalwerte jeder Messreihe getrennt betrachtet. Es ist ersichtlich, dass insbesondere die Maximalwerte im Mittel angestiegen sind. Gerade vor dem Hintergrund des geringeren Radonvorkommens im Keller deutet dies auf eine vermehrte Ansammlung in den Wohnbereichen aufgrund der dichter gewordenen Gebäudehülle hin. Durch die Messungen vor der Sanierung und die Unterdruck-Messungen zeigte sich bereits, dass Messobjekt 2 ein geringes Radonaufkommen aufweist. Das wenige Radon, das vor-

handen ist, kann sich aber in den Wohnräumen konzentrieren, wenn die Räume nicht genutzt werden und Türen und Fenster verschlossen bleiben.

Der natürliche Luftwechsel ist durch die Gebäudedämmung und die dichten Fenster deutlich herabgesetzt. Die Luftdichtheitsmessungen ergaben einen Luftwechsel bei 50 Pa Unterdruck von $n_{50}=5,6/h$ vor der Sanierung und $n_{50}=1/h$ nach der Sanierung. Die natürliche Verdünnung des Radons ist dadurch deutlich vermindert.

Lediglich das Zimmer im Erdgeschoss rechts zeigt einen deutlichen Anstieg der Radonkonzentration. Dieses hat eine um 200ppm höhere CO_2 -Konzentration als das Zimmer im Erdgeschoss links, obwohl beide Zimmer als Schlafzimmer für eine Person genutzt wurden. Das regelmäßige Lüften der anderen Zimmer bewirkt, dass die mittlere Radonkonzentration gering bleibt, auch wenn der Anstieg schneller erfolgt und damit höhere Maximalwerte erreicht werden können. Ebenfalls ist an dem Zimmer im Erdgeschoss links aufgefallen, dass die Temperatureinflüsse einen stärkeren Einfluss auf die Radonkonzentration haben als in den anderen Zimmern. Als Ursache dafür käme in Betracht, dass es seltener gelüftet wird. Die Lüftungseffekte verringern die Korrelation, da sie die Radonkonzentration sprunghaft verringern, ohne dass der untersuchte Einflussfaktor ebenfalls verringert wird.

Bei diesem Haus reicht sehr regelmäßiges Lüften demnach aus, um die Radonkonzentration auf einem sehr geringen Niveau zu halten. Dadurch ist auch zu erklären, dass die mittlere Radonkonzentration nicht angestiegen ist.

Abschließend lässt sich sagen, dass in dem Gebäude trotz der deutlich dichter gewordenen Gebäudehülle keine höhere Radonkonzentration auftritt, da das Radonpotenzial, also die Radonkonzentration der Bodenluft, im Untergrund gering ist und regelmäßig gelüftet wird. Zudem bewirken die unsanierten Kellerfenster, dass die Radonkonzentration bereits im Keller mit Außenluft vermischt wird und sich dadurch nur geringe Radonkonzentrationen in die Wohnräume verbreiten können. Bei unterlassener Lüftung der Zimmer kann sich das Radon ansammeln und die Maximalwerte stärker ansteigen. Hier besteht auch die Möglichkeit, dass die verwendeten Baustoffe die höhere Radonkonzentration der einzelnen Räume verursachen.

Messobjekt 3

In Messobjekt 3 wurden umfassende Renovierungsarbeiten durchgeführt. Diese beinhalten eine neue Fassadendämmung, Dämmung der Speicherdecke, Dämmung der Kellerdecke im nichtbewohnten Bereich, Umstellung der Heizung von Öl auf Gas sowie neue Fenster. Der Erfolg konnte allerdings nicht durch die Unterdruckmessung in Form einer deutlich verringerten Luftwechselrate bestätigt werden. Die Luftwechselrate lag vor der Sanierung bei 50 Pa Unterdruck bei $n_{50}=4,3/h$ und nach

den Sanierungsmaßnahmen noch bei $n_{50}=3,8/h$. Dies liegt über dem Richtwert für sanierte Altbauten (dieser liegt bei $n_{50}=3/h$) und sollte bei einer Sanierung unterschritten werden. Die Undichtigkeiten bezogen sich auf das Dachgeschoss, in dem eine neue Dämmung angebracht und die Fenster getauscht wurden. Dabei sind am Dach Undichtigkeiten entstanden, deren genaue Position durch die Verkleidung des Daches nicht lokalisiert werden konnten. Die bewohnten Stockwerke, also Erdgeschoss und Untergeschoss, sind nicht undicht. Dafür stehen keine gesonderten Luftwechselfzahlen zur Verfügung, da dies lokal mit Messgeräten zur Bestimmung der Luftströmung geprüft wurde.

Trotz der schlechten Luftwechselfzahl ist der bewohnte Gebäudeteil somit dichter als vor der Sanierung. Dadurch hat sich die räumliche Verteilung der Drücke verändert, was zu einer anderen Radondynamik führen kann. Die Temperaturniveaus waren bei beiden Messungen sehr ähnlich, wobei die Temperaturen vor der Sanierung im Mittel um ca. 2°C höher waren.

In Abbildung 36 ist der Verlauf der Radonkonzentration vor der Sanierungsphase in Messobjekt 3 dargestellt. Die Radonkonzentrationen schwanken um einen Mittelwert von ca. 60 Bq/m^3 . Zum Ende der Messphase zeigt sich ein deutlicher Anstieg, der in Abbildung 37 genauer betrachtet wird.

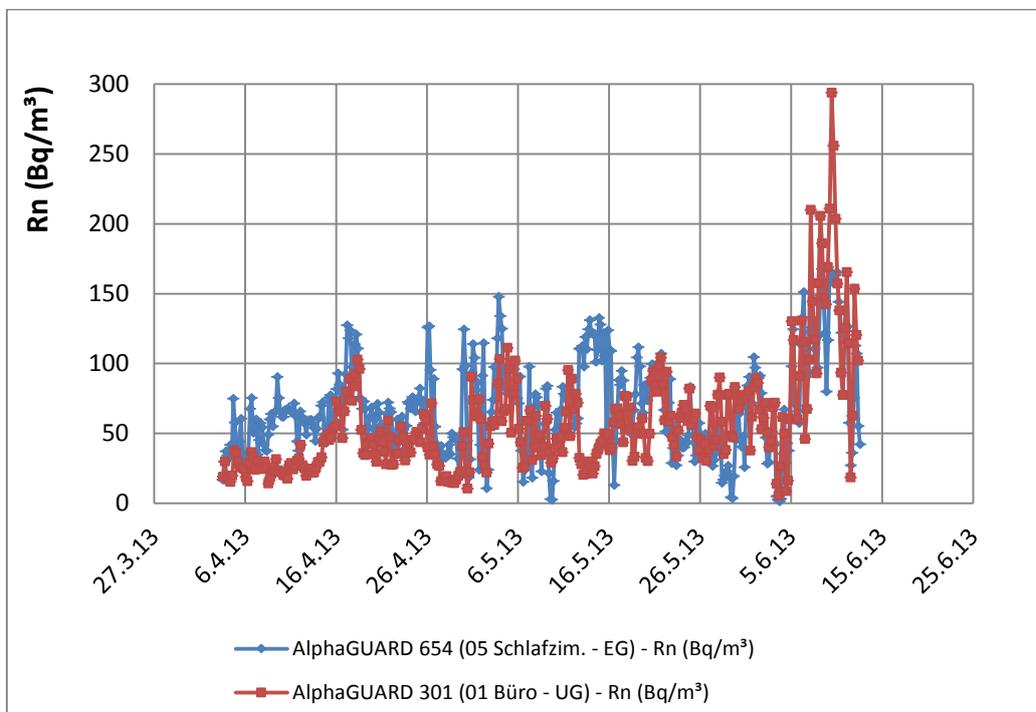


Abbildung 36: Verlauf der Radonkonzentration vor der Sanierung in Erd- und Untergeschoss von Messobjekt 3 vor der Sanierung

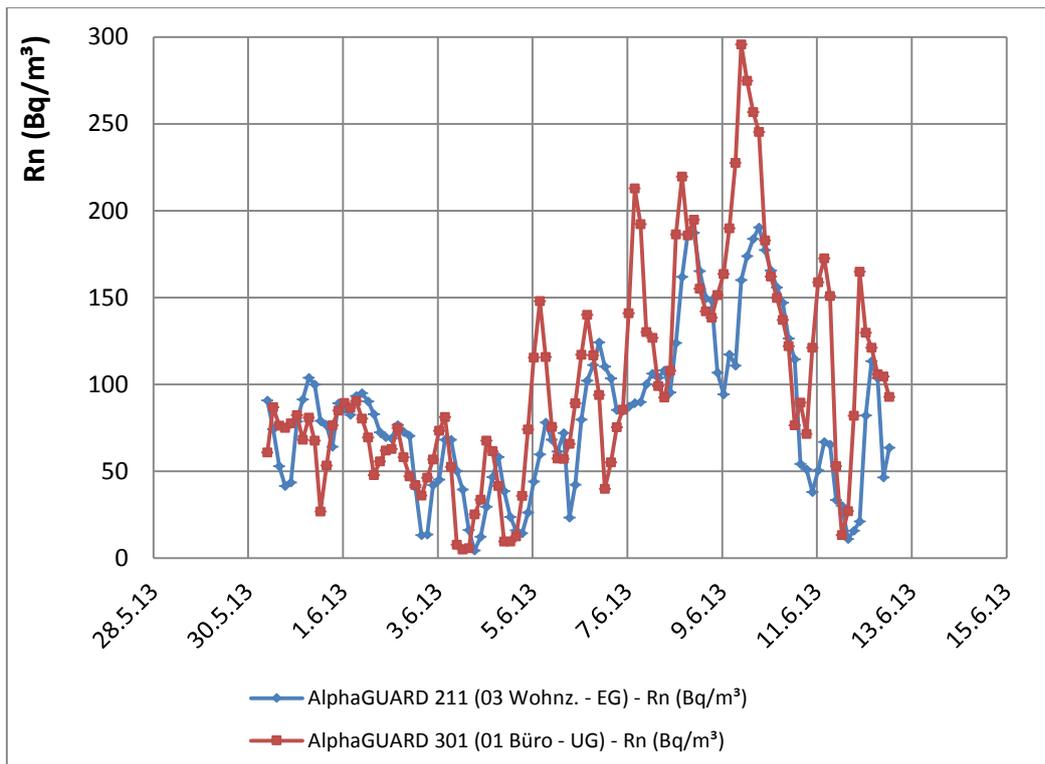


Abbildung 37: Radonkonzentration in Schlafzimmer und Büro während der Abwesenheit einer Bewohnerin in Messobjekt 3 vor der Sanierung

Abbildung 38 zeigt den Verlauf der Radonkonzentration in der Waschküche des Untergeschosses sowie im Schlafzimmer des Erdgeschosses während der Messperiode nach den Sanierungsarbeiten.

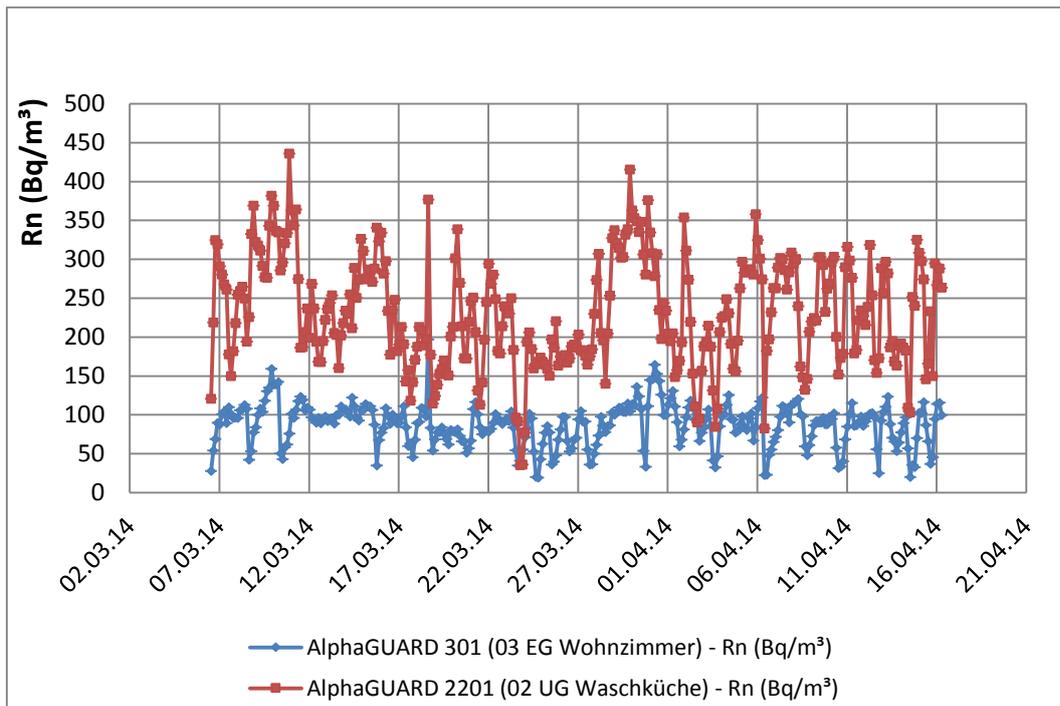


Abbildung 38: Verlauf der Radonkonzentration im Untergeschoss und Erdgeschoss nach den Sanierungsmaßnahmen in Messobjekt 3

In den Zeiträumen vom 9.3.14 bis 13.3.14 sowie vom 28.3.14 bis 29.3.14 waren die Hausbewohner abwesend. Hier sieht man insbesondere in der Waschküche, die nur über die geöffnete Tür belüftet wird, dass die Radonkonzentration in diesen Zeiträumen angestiegen ist.

Abbildung 39 zeigt die Aufnahme des Aufbaueffekts in Messobjekt 3 nach den Renovierungsarbeiten. Dafür wurde das gesamte Haus gut durchlüftet und im Anschluss für 2 Tage nicht betreten. Beim Aufbaueffekt steigt die Radonkonzentration im Erdgeschoss auf bis zu 150 Bq/m³ und im Untergeschoss auf ca. 300 Bq/m³ an.

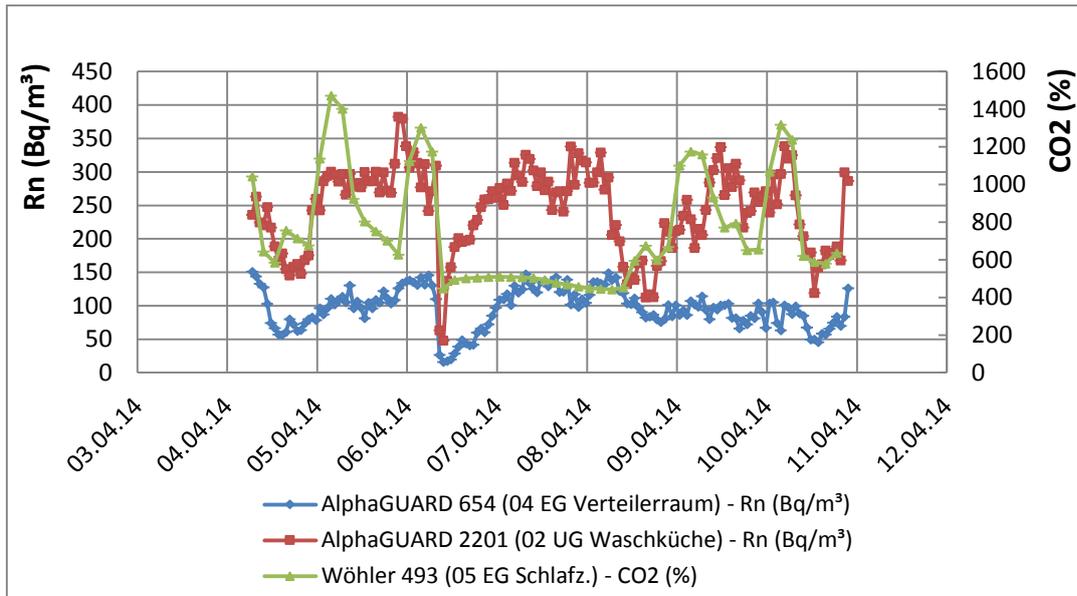


Abbildung 39: Aufbaueffekt im Untergeschoss sowie im Erdgeschoss von Messobjekt 3 nach der Sanierung

Abbildung 40 zeigt die Radonkonzentration in Messobjekt 3 sowohl vor als auch nach der Sanierung.

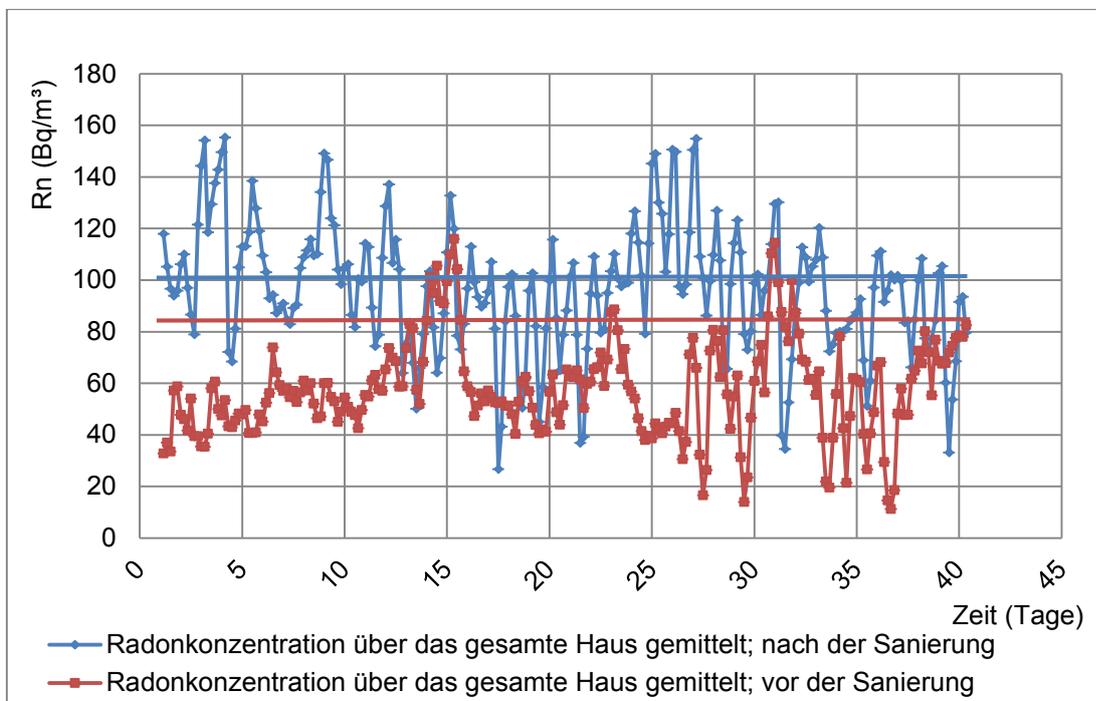


Abbildung 40: Vergleich der Radonverläufe vor und nach der Sanierung in Messobjekt 3

Wie Tabelle 9 und Tabelle 10 zeigen, steigt die Radonkonzentration in allen Räumen bis auf den Keller signifikant an. Letzterer wurde nicht saniert und liegt deutlich tiefer als das Büro, das sich auf gleicher Etage an der hangabgelegenen Seite im Souterrain befindet. Dadurch weist der Kellerraum, in dem ein Messgerät stand, deutlich stärkeren Kellercharakter auf als das Büro.

Neben dem Kellerraum befindet sich der Heizungsraum. In diesem ist ein Kanaldeckel im Boden, durch den das Wasser ablaufen soll. Er wurde als mögliche Radonquelle in Betracht gezogen, da in diesem Bereich des Kellers die Radonkonzentration deutlich höher war als im vorderen Bereich. Die Unterdruck-Messung, während der auch im Heizungskeller ein Messgerät aufgestellt werden konnte, zeigte jedoch keine höheren Werte als in den anderen hinteren Kellerbereichen. Somit ist es naheliegend, dass der hintere Bereich des Kellers, bei dem die höchsten Radonwerte gemessen wurden, aufgrund seiner Lage und alten Bauweise als Radonquelle für die weiteren Räume dient.

Die durchschnittliche Radonkonzentration aller Zimmer ist von 83 Bq/m³ auf 101 Bq/m³ nicht-signifikant angestiegen. Im Rahmen der Messunsicherheit ist die mittlere Radonkonzentration demnach nicht gestiegen. Die hohe Messunsicherheit resultiert aus der Verwendung der Atmos-Geräte, deren Unsicherheit bei niedrigen Radonkonzentrationen bei 20% liegt.

Lässt man den Keller, der nicht saniert wurde, außer Acht, steigt die Radonkonzentration signifikant an.

Tabelle 9 und Tabelle 10 zeigen die mittlere Radonkonzentration der einzelnen Räume im Überblick.

Messobjekt Nr.3	Gesamtes Haus	Schlafzimmer 654	Verteilterraum 082	Wohnzimmer 211	Büro UG 301	Keller UG 066
	Vorher Messreihe:					
Mittelwert Radon [Bq/m ³]	83±18	75±5	79±16	71±5	57±5	288±58
Varianz Radon [(Bq/m ³) ²]	2737	1684	3064	1463	1927	14310
Median Radon [Bq/m ³]	78	68	76	66	46	283
Min Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	25	29	-	27	18	-
Max Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	197	189	-	185	231	-
Amplitude saisonaler Anteil [Bq/m ³]	31	27	-	35	23	-
Mittelwert Außentemperatur [°C]	10,4					
min Außentemperatur [°C]	-5,8					
max Außentemperatur [°C]	24,1					
Varianz Außentemperatur [°C ²]	24,2					
Innentemperatur [°C] und Varianz [°C ²]		19/5	-	20/3	20/2	-

Tabelle 9: Übersicht relevanter Messwerte in Messobjekt 3 vor der Sanierung

Messobjekt Nr.3	Gesamtes Haus	Schlafzimmer 2200	Verteil. 654	Wohnzimmer 301	Büro UG 950	Keller UG 2201
	Nachher Messreihe:					
Mittelwert Radon [Bq/m ³]	101±9	95±7	106±7	84±6	95±7	232±16
Varianz Radon [(Bq/m ³) ²]	1888	1932	1851	1325	1462	7265
Median Radon [Bq/m ³]	98	93	103	82	90	225
Min Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	46	42	52,2	40	51	2 (absolut)
Max Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	198	208	216	179	204	596 (absolut)
Amplitude saisonaler Anteil [Bq/m ³]	63	81	72	63	52	
Mittelwert Außentemperatur [°C]	8,6					
min Außentemperatur [°C]	-3,8					
max Außentemperatur [°C]	21,1					
Varianz Außentemperatur [°C ²]	26,1					
Innentemperatur [°C] und Varianz [°C ²]		18/3	19/1	19/1	20/0	

Tabelle 10: Übersicht relevanter Messwerte in Messobjekt 3 nach der Sanierung

Hier ist erkennbar, dass die Amplitude des saisonalen Anteils deutlich angestiegen ist. Dies könnte auf eine Verringerung des natürlichen Luftaustauschs in dem bewohnten Gebäudekomplex hinweisen, aufgrund dessen das Radon nicht mehr kontinuierlich mit Luft von außen verdünnt wird.

Der deutlichste Anstieg ist im Büro erkennbar, in dem die Radonkonzentration von 57 Bq/m³ auf 95 Bq/m³ gestiegen ist, also um 67%. Erklärbar ist dieser starke Anstieg damit, dass das Radonpotenzial in den unten liegenden Gebäudeteilen deutlich größer ist und ein verminderter natürlicher Luftwechsel damit auch einen größeren Anstieg bewirken kann. Dies bestätigt die Betrachtung der Radonquellstärke im Büro. Diese ist mit Methode 1 von 22 Bq/h auf 44 Bq/h und mit Methode 2 von 96 Bq/h auf 181 Bq/h angestiegen. Die Methoden werden im Kapitel „Quellstärke“ genauer vorgestellt. Da im hinteren Bereich des Kellers keine Fenster ausgetauscht wurden, ist dort im Gegensatz zum Büro auch kein Anstieg der Radonkonzentration erfolgt.

Es zeigt sich, dass in den sanierten Gebäudeabschnitten die Radonkonzentration signifikant angestiegen ist.

Messobjekt 4

In Messobjekt 4 wurden leider nur wenige Renovierungsarbeiten durchgeführt. Das Haus besteht aus einem Untergeschoss mit Souterrain und einem Obergeschoss. Im Souterrain wurden die Fenster erneuert und die Tür zum Außenbereich ausgetauscht. Im Obergeschoss wurde zum Zeitpunkt der Messung noch keine Renovierung durchgeführt. Die Unterdruck-Messung zeigte keine Verringerung der Luftwechselrate n_{50} .

Die Außentemperatur war vor der Sanierung etwas höher als nach der Sanierung, was zu einer leichten Erhöhung der Radonkonzentration nach der Sanierung führen könnte.

Abbildung 41 zeigt den Verlauf der Radonkonzentration vor und nach der Sanierung. Es zeigt sich, dass vor der Sanierung einige Extremwerte sowohl in positive als auch negative Richtung auftraten. Einer dieser Extremwerte stammt aus der Unterdruck-Messung, bei der viel Radon aus dem Boden mobilisiert wurde. Für einen weiteren Extremwert kann unterlassenes Lüften verantwortlich sein, da zu diesem Zeitpunkt auch die CO_2 -Konzentration deutlich erhöht war.

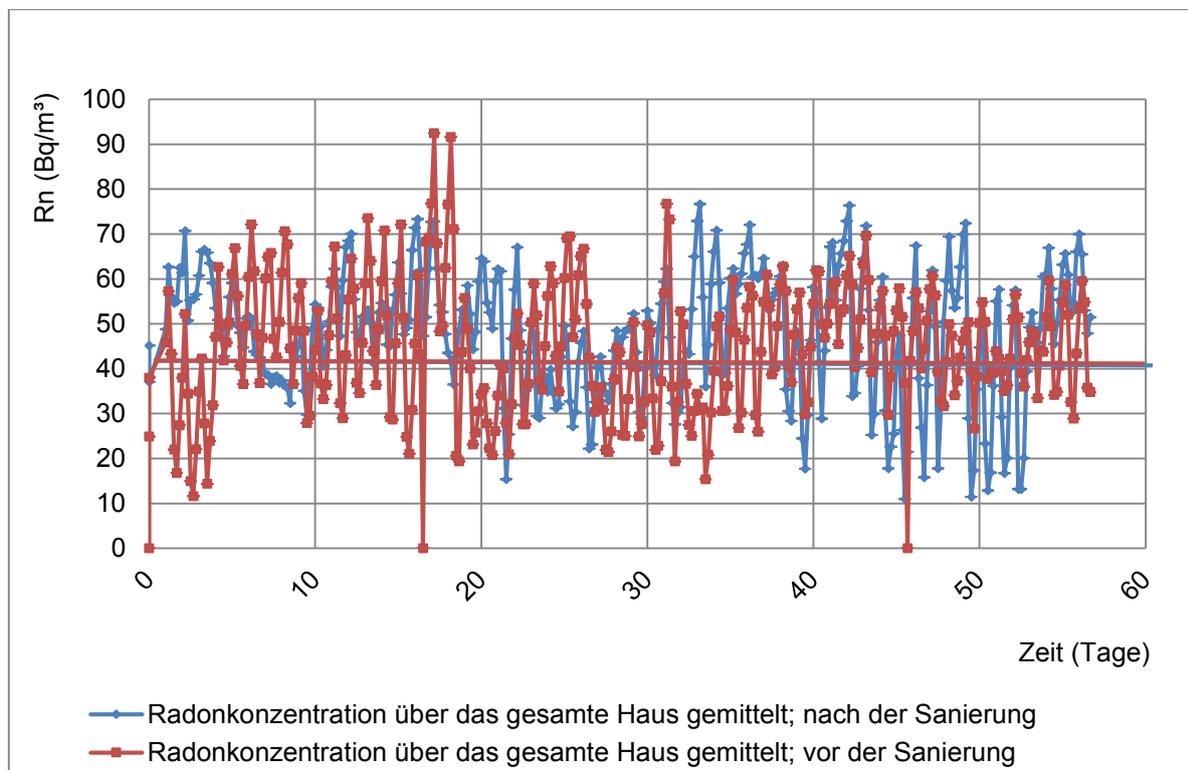


Abbildung 41: Vergleich der Radonverläufe vor und nach der Sanierung in Messobjekt 4

Tabelle 11 und Tabelle 12 zeigen, dass die Verläufe sich ansonsten sehr gleichen. Sowohl die mittlere Radonkonzentration in jedem Zimmer als auch Maximal- und Minimalwerte zeigen keine Veränderung. Lediglich die Amplituden des saisonalen Anteils, also die Tagesschwankungen, sind im Vergleich zu vorher leicht gesunken.

Messobjekt Nr.4	Gesamtes Haus	Gästeschlafzimmer UG 2201	Kinderzimmer EG 654	Wohnzimmer EG 950	Werkstatt UG 301
	Vorher Messreihe:				
Mittelwert Radon [Bq/m ³]	47±4	52±4	33±2	26±2	90±6
Varianz Radon [(Bq/m ³) ²]	660	760	329	236	1558
Median Radon [Bq/m ³]	44	48	30	24	84
Min Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	21	23	13	10	46
Max Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	116	136	86	71	201
Amplitude saisonaler Anteil [Bq/m ³]	34	45	27	20	56
Mittelwert Außentemperatur [°C]	6,7				
min Außentemperatur [°C]	-5				
max Außentemperatur [°C]	22				
Varianz Außentemperatur [°C ²]	25				
Innentemperatur [°C] und Varianz [°C ²]		20,1/0,7	21,5/0,6	21,1/1,3	17,9/1
mittlere Luftfeuchte innen [%] und Varianz		44/79	40/34	43/54	48/24

Tabelle 11: Übersicht relevanter Messwerte in Messobjekt 4 vor der Sanierung

Messobjekt Nr.4	Gesamtes Haus	Gästezimmer UG 211	Kinderzimmer EG 2200	Wohnzimmer EG 2201	Werkstatt UG 654
	Nachher Messreihe:				
Mittelwert Radon [Bq/m ³]	47	52±4	28±2	23±2	100±7
Varianz Radon [(Bq/m ³) ²]	640	742	291	179	1615
Median Radon [Bq/m ³]	44	49	24	20	98
Min Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	21	21	11	9	50
Max Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	110	127	82	63	199
Amplitude saisonaler Anteil [Bq/m ³]	28	34	31	13	50
Mittelwert Außentemperatur [°C]	2,8				
min Außentemperatur [°C]	-9				
max Außentemperatur [°C]	15				
Varianz Außentemperatur [°C ²]	15				
Innentemperatur [°C] und Varianz [°C ²]		15,3/6,8	22,5/1,3	19,8/0,7	15,4/0,1
mittlere Luftfeuchte innen [%] und Varianz		52/62	33/13	37/9	50/8

Tabelle 12: Übersicht relevanter Messwerte in Messobjekt 4 nach der Sanierung

In der Werkstatt im Untergeschoss herrscht sowohl vorher als auch nach der Sanierung die höchste Radonkonzentration. Dies kann daran liegen, dass der Raum deutlichen Kellercharakter hat. Es gibt offene Kabeldurchbrüche und die Wände sind nicht verkleidet. Der andere Raum des Untergeschosses wird als Gästezimmer genutzt und zeigt keine offenen Verbindungen zum Erdreich.

Obwohl auch in der Werkstatt die zuvor sehr alten Fenster getauscht wurden, ist keine Erhöhung der Radonkonzentration zu verzeichnen.

Eine Erklärung dafür kann die Unterdruck-Messung liefern. Diese zeigt, dass die Luftwechselrate n_{50} vor und nach der Sanierung gleich geblieben ist. Ist die Luftwechselrate unverändert, so wird auch kein Radonanstieg aufgrund energetischer Sanierung erwartet.

Messobjekt 5

In Messobjekt 5 wurden die Glasbausteine im Treppenhaus durch ein Fenster ersetzt, eine neue Haustür eingebaut sowie der Dachboden und die Kellerdecke gedämmt. Obwohl wenige Maßnahmen dabei waren, von denen vermutet wurde, die Dichtheit des Gebäudes maßgeblich zu beeinflussen, verringerte sich die Luftwechselrate von $n_{50}=3,7/h$ auf $n_{50}=2,4/h$ erheblich. Daher ist zu vermuten, dass sich die Radondynamik aufgrund veränderter Luftbewegungen, verursacht durch die Dämmmaßnahmen, verändert hat.

Aus organisatorischen Gründen war es nicht möglich, beide Messintervalle bei gleichen Temperaturniveaus durchzuführen. Dadurch wurde das Haus in der Messung vor der Sanierung beheizt, während nach der Sanierung milde Temperaturen herrschten.

Abbildung 42 zeigt den Verlauf der Außentemperatur sowohl vor als auch nach der Sanierung des Gebäudes. Aufgrund des Kamineffekts ist der Radontransport während der Wintermonate deutlich höher als in der warmen Jahreszeit. Zudem wird bei hohen Temperaturen häufiger das Fenster geöffnet, was zusätzlich zu einer geringeren Radonkonzentration führt.

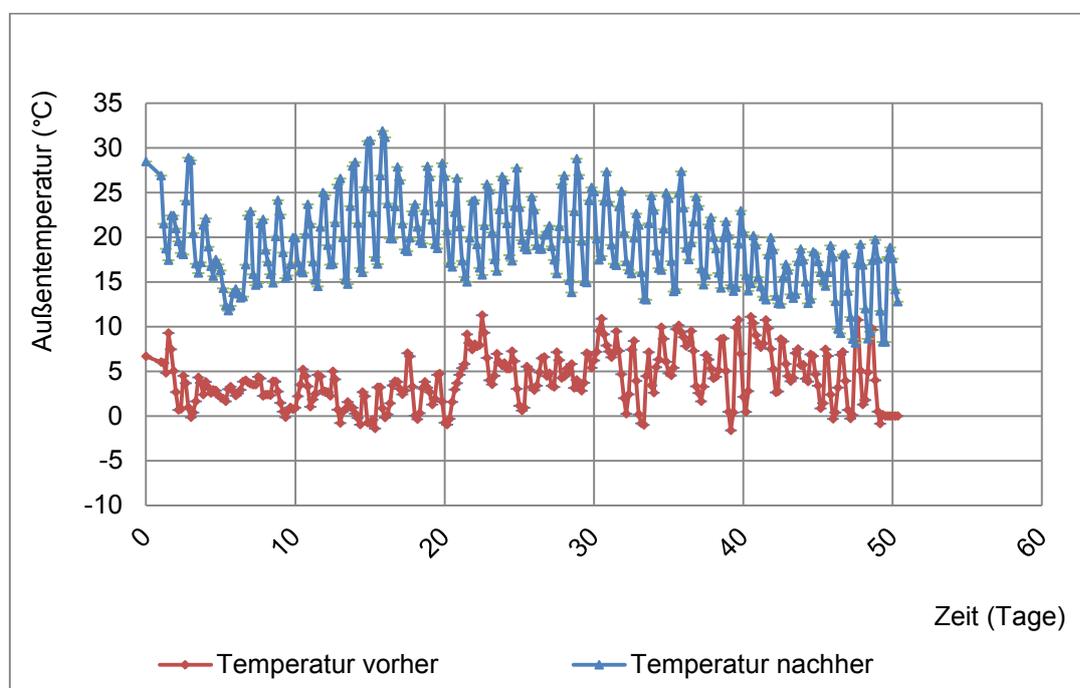


Abbildung 42: Vergleich der Außentemperatur in Messobjekt 5 vor und nach der Sanierung

Abbildung 43 zeigt den Verlauf der Radonkonzentration im Untergeschoss und im Erdgeschoss während der ersten Messphase.

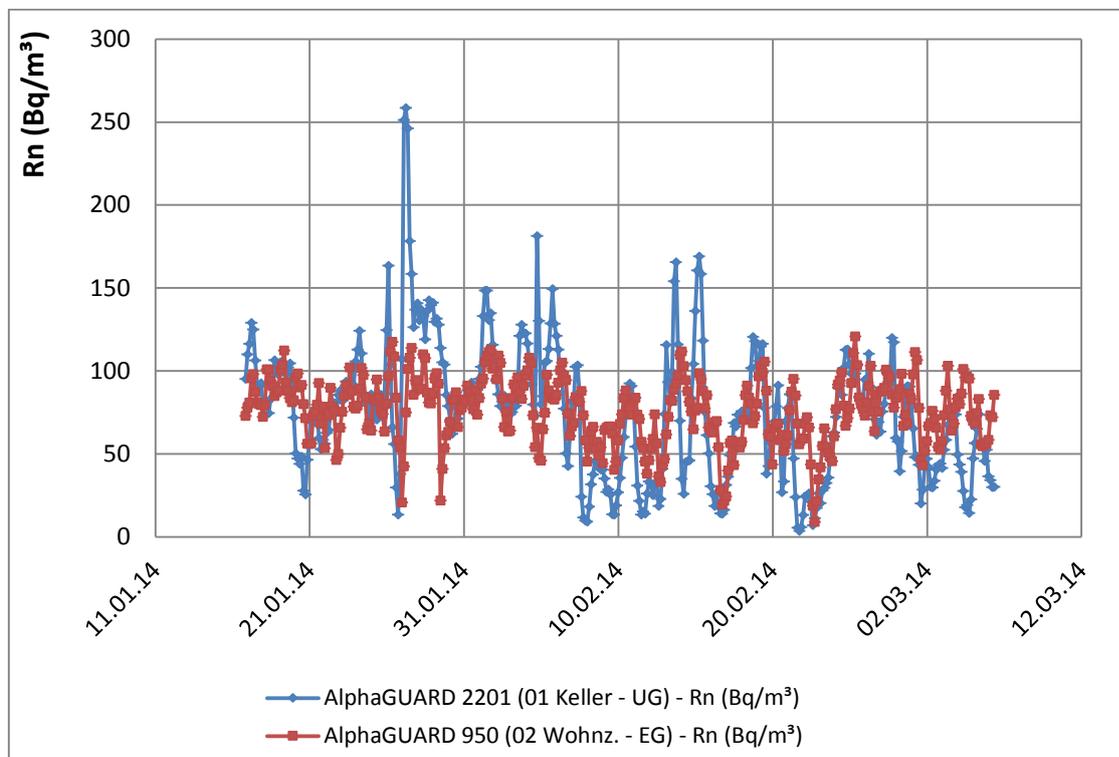


Abbildung 43: Radonverlauf im Untergeschoss und Erdgeschoss während der Messphase vor den Renovierungsarbeiten in Messobjekt 5

Die Aufbaukurve aus Abbildung 44 wurde im Keller vom 26.1.14 – 29.1.14 aufgenommen. Dafür wurden das Untergeschoss und das Erdgeschoss sehr gut durchlüftet. Im Obergeschoss konnten die Fenster zu dem Zeitpunkt leider nicht geöffnet werden. Das Kellergeschoss wurde nach dem Lüften verschlossen und erst am 29.1.14 wieder betreten. Das Erdgeschoss wurde bewohnt sodass sich die Türen dort bereits am 30.1.14 wieder öffneten.

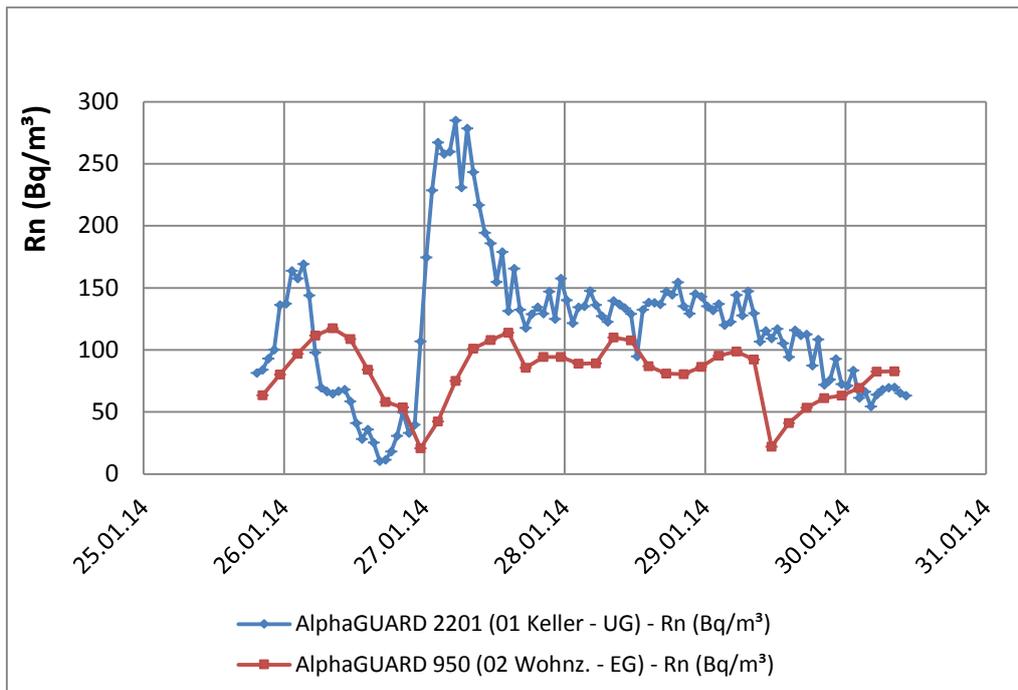


Abbildung 44: Aufbaueffekt im Keller und Wohnzimmer von Messobjekt 5 vor der Sanierung

Ein Überblick des Radonverlaufs in der Messphase nach der Sanierung des Hauses ist in Abbildung 45 zu sehen.

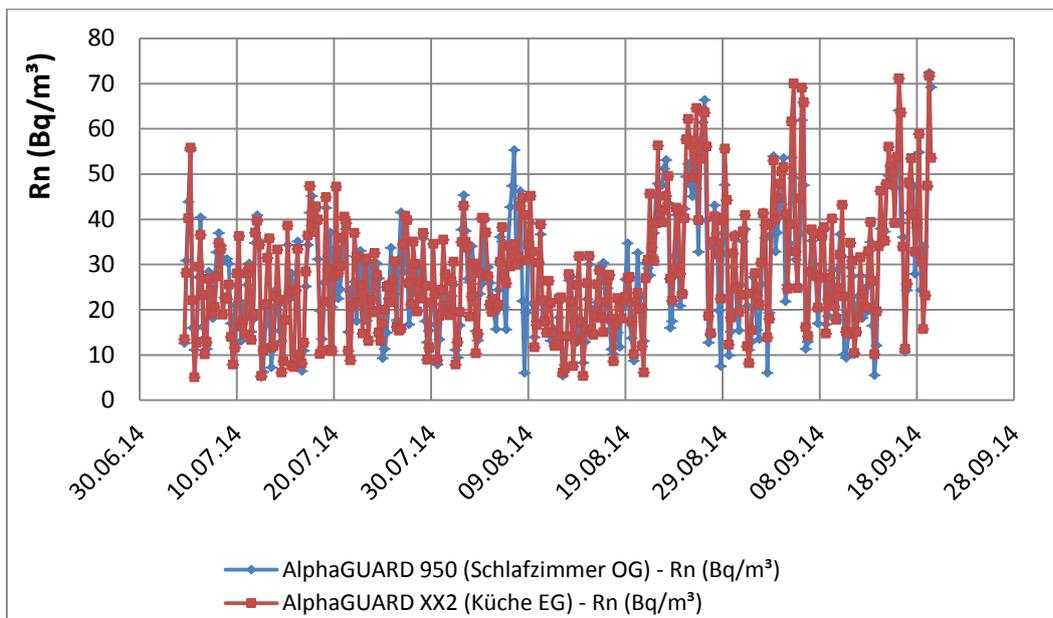


Abbildung 45: Verlauf der Radonkonzentration während der Messphase nach der Renovierung in Messobjekt 5

Vom 1.8.2014 bis 8.8.2014 waren drei von vier Personen abwesend, es wurde vermutlich nur selten gelüftet. Ein Kellerfenster war ständig gekippt. Abbildung 46 zeigt den Verlauf der dabei gestiegenen Radonkonzentration.

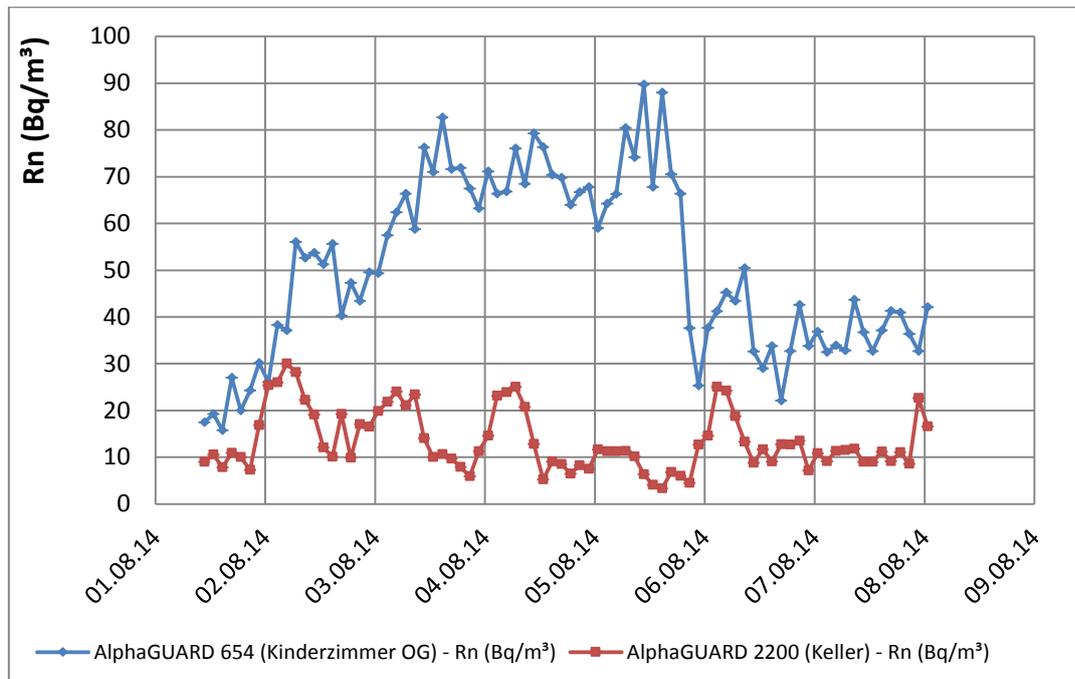


Abbildung 46: Verlauf der Radonkonzentration während verminderter Lüftung in Messobjekt 5 nach der Sanierung

Abbildung 47 zeigt den Verlauf der Radonkonzentration über alle Räume gemittelt jeweils vor und nach der Sanierung. Es zeigt sich, dass die mittlere Radonkonzentration nach der Sanierung deutlich geringer ist als vor der Sanierung. Ein Unterschied der Absolutwerte ist allerdings eher auf die veränderte Wetterlage als auf einen Unterschied in den Gebäudeeigenschaften zurückzuführen.

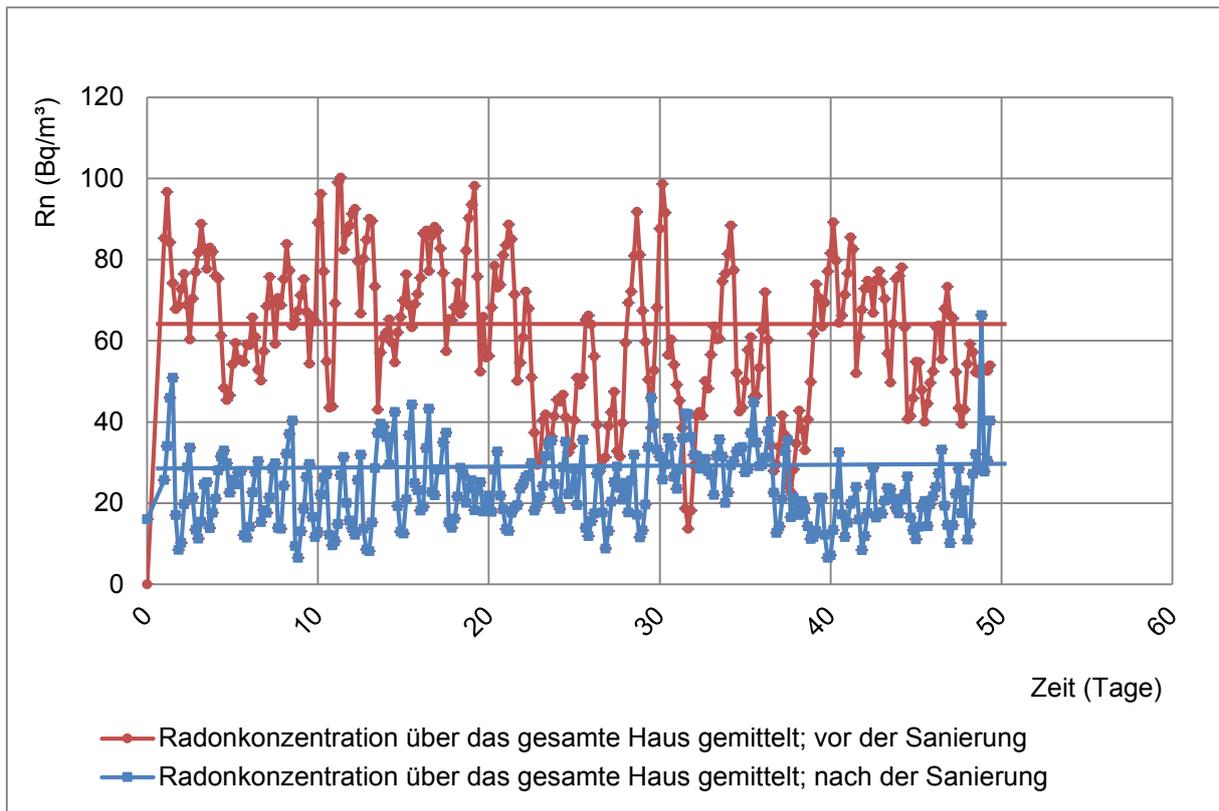


Abbildung 47: Verlauf der Radonkonzentration vor und nach der Sanierung in Messobjekt 5

Tabelle 13 und Tabelle 14 zeigen eine Übersicht der Messergebnisse von Radonkonzentration und Temperaturen zum Messzeitpunkt.

Messobjekt Nr.5	Gesamtes Haus	Schlafzimmer 654	Kinderzimmer 301	Wohnzimmer 950	Küche 2200	Keller 2201
	Vorher Messreihe:					
Mittelwert Radon [Bq/m ³]	65±5	58±4	55±4	76±5	51±4	75±5
Varianz Radon [(Bq/m ³) ²]	1075	716	667	895	526	2115
Median Radon [Bq/m ³]	62	54	53	74	49	69
Min Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	28	27	25	41	24	23
Max Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	155	131	127	154	114	217
Amplitude saisonaler Anteil [Bq/m ³]	33	47	49	37	23	24
Mittelwert Außentemperatur [°C]	4,2					
min Außentemperatur [°C]	-2,3					
max Außentemperatur [°C]	12,3					
Varianz Außentemperatur [°C ²]	9,4					
Innentemperatur [°C] und Varianz [°C ²]		20/0,7	20/1	18/2	20/2	15/0,1

Tabelle 13: Übersicht relevanter Messwerte in Messobjekt 5 nach vor Sanierung

Messobjekt Nr.5	Gesamtes Haus	Schlafzimmer 950	Kinderzimmer 654	Wohnzimmer 301	Küche 2201	Keller 2200
	Nachher Messreihe:					
Mittelwert Radon [Bq/m ³]	29±2	27±2	38±3	32±2	28±2	22±2
Varianz Radon [(Bq/m ³) ²]	429	312	454	366	329	620
Median Radon [Bq/m ³]	24	24	35	29	25	14
Min Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	11	8	16	14	11	7
Max Radon [Bq/m ³] (90%-Perzentil)	99	80	106	91	86	123
Amplitude saisonaler Anteil [Bq/m ³]	24	23	25	30	27	17
Mittelwert Außentemperatur [°C]	18,1					
min Außentemperatur [°C]	6,8					
max Außentemperatur [°C]	32,8					
Varianz Außentemperatur [°C ²]	22,7					
Innentemperatur [°C] und Varianz [°C ²]		24/6	25/7	25/6	25/6	22/2

Tabelle 14: Übersicht relevanter Messwerte in Messobjekt 5 nach der Sanierung

Aus den genannten Gründen ist die mittlere Radonkonzentration vor und nach der Sanierung nicht zu vergleichen.

Die Korrelationen der Einflussfaktoren haben dennoch ihre Gültigkeit und werden in den nächsten Kapiteln behandelt. Dabei wird untersucht, inwieweit vermutete Einflussfaktoren in ihrem Verlauf mit der Radonkonzentration korrelieren. Eine hohe Korrelation tritt auf, wenn sich häufig bei beiden Faktoren gleichzeitig eine Änderung in die gleiche bzw. entgegengesetzte Richtung ergibt. Dies kann ein Hinweis dafür sein, dass der untersuchte Faktor für die Änderung der Radonkonzentration verantwortlich ist.

Einflussfaktor Temperatur

Die Außentemperatur hat aufgrund ihrer Wirkung auf die Luftbewegung im Haus großen Einfluss auf die Radonkonzentration.

Eine höhere Temperatur der Innenraumluft in Bezug auf die Außenluft bewirkt im Inneren einen Unterdruck. Dieser lässt über Undichtigkeiten unterhalb der neutralen Ebene Außenluft oder radonhaltige Bodenluft einströmen und über Undichtigkeiten oberhalb dieser Ebene Innenraumluft ausströmen. Durch diesen Luftstrom wird vermehrt Radon in das Innere des Wohnhauses befördert.

Aufgrund der höheren Temperaturen herrscht im Sommer eher ein Überdruck im Haus, der bewirkt, dass die Radonkonzentration gering ist.

Im Winter dagegen, wenn das Haus innen gewärmt wird und außen niedrige Temperaturen herrschen, entsteht Unterdruck, wodurch die Radonkonzentration ansteigt.

Bezüglich der Radonkonzentration in der Raumluft werden diese jahreszeitlichen Aspekte des Radontransports überlagert vom ebenfalls je nach Jahreszeit unterschiedlichen Lüftungsverhalten der Bewohner. Meistens wird bei wärmeren Temperaturen mehr gelüftet als bei kälteren. In der Theorie müsste sich die Radonkonzentration demnach bei ansteigenden Temperaturen verringern, wie beispielhaft in Abbildung 48 dargestellt. Der Korrelationskoeffizient hat dies allerdings nicht in allen Räumen bestätigt.

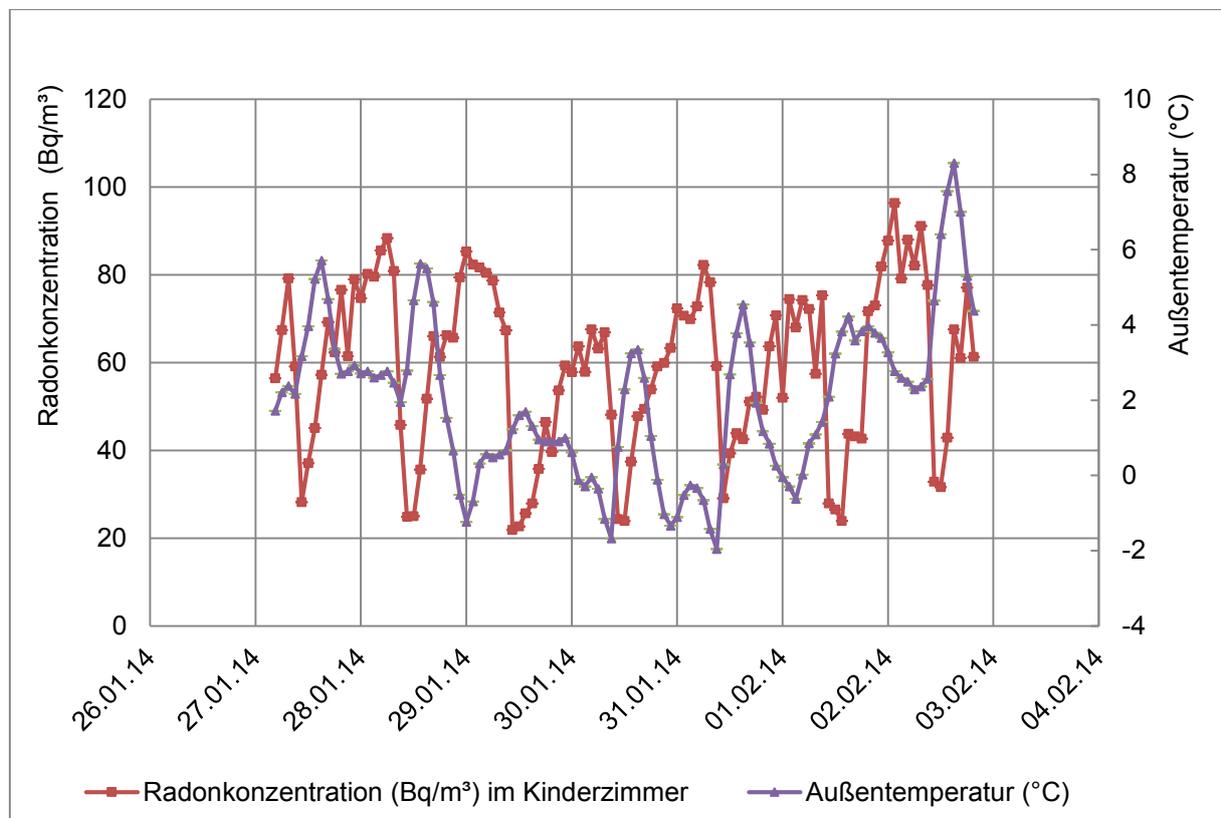


Abbildung 48: Verlauf von Radonkonzentration im Kinderzimmer und Außentemperatur in Messobjekt 5

Nach den Konventionen von Cohen spricht man unter einem Korrelationskoeffizienten von 0,3 von einem sehr geringen Effekt und ab einem Korrelationskoeffizienten von 0,3 von einem mittleren Effekt. Da die Radonkonzentration von sehr vielen Faktoren abhängig ist, wird ein sehr hoher Korrelationskoeffizient nicht erwartet. Denn alle Einflüsse haben eine unterschiedliche Wirkung und vermindern so die Korrelationen der anderen Einflussfaktoren. Aus diesem Grund wird für diese Auswertung ein Korrelationskoeffizient ab 0,3 als signifikanter Zusammenhang angenommen.

Es zeigt sich, dass der Korrelationskoeffizient bezogen auf Radon und Außentemperatur nicht immer über dem Wert von -0,3 liegt, der eine Korrelation bestätigen würde.

Wegen der eher geringen Korrelationen wurden die Zeitreihen differenzierter betrachtet. Dafür wurden Zeitreihenanalysen mit dem Statistik-Programm R durchgeführt. Es wurden Tagesgänge, Tagesmittelwerte sowie der Rest separat voneinander aufgetragen.

Abbildung 49 zeigt dieses Verfahren. Die oberste Zeitreihe „Data“ enthält die Rohdaten des Radonverlaufs. Die Zeile „seasonal“ zeigt die Tagesschwankungen der Radonkonzentration, die sich normalerweise auf den „trend“ überlagert. Der „trend“ in der dritten Zeile beschreibt die Tagesmittelwerte. Im „remainder“ ist der Rest, also die Differenz zwischen den Rohdaten und den Tagesschwankungen mit Tagesmittelwerten. Die x-Achse entspricht der Messzeit in Tagen.

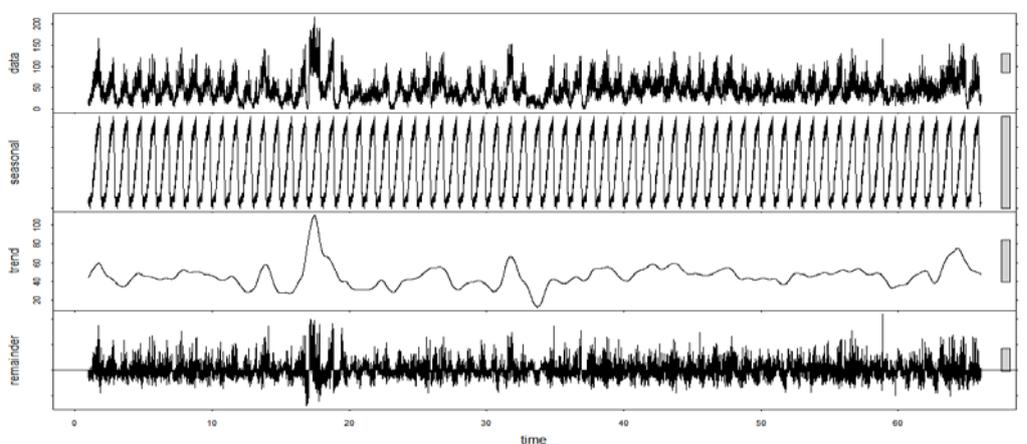


Abbildung 49: Auftrennung der Radonkonzentrationsverläufe in saisonalen Anteil, Trend und Rest

Die Überprüfung der Korrelationen der Tagesschwankungen von Temperatur und Radonkonzentration macht wenig Sinn, da beide den Charakter von Tagesgängen aufweisen und die periodischen Schwankungen damit zwangsläufig korrelieren. Dies macht allerdings keine Aussage darüber, ob die Temperatur tatsächlich einen Einfluss auf die Radonkonzentration hat, oder dieser Effekt durch die ebenfalls tageszeitlich variierende Gebäudenutzung entsteht. Auch der „Rest“ wird nicht zur Überprüfung herangezogen.

Abbildung 50 zeigt die Korrelation der Rohdaten bezüglich Außentemperatur und Radonkonzentration. In dem betrachteten Raum ergab sich ein Korrelationskoeffizient von -0,3. In anderen Räumen bzw. Häusern war der Korrelationskoeffizient zu klein, um überhaupt eine Korrelation nachzuweisen.

Aus diesem Grund wurde die Korrelation der Tagesmittelwerte der Radonkonzentration mit den Tagesmittelwerten der Außentemperatur verglichen. Der Korrelationskoeffizient wird in den folgenden Abbildungen mit ACF und die zeitliche Verschiebung mit LAG (in Tagen) angegeben. Trotz der Abkürzung ACF handelt es sich hier um die Korrelation von zwei Zeitreihen aufeinander, also um die crosscorrelation function (CCF). Die Ausgabe ACF ist lediglich im graphischen Format und hat in diesem Fall den gleichen Wert wie CCF.

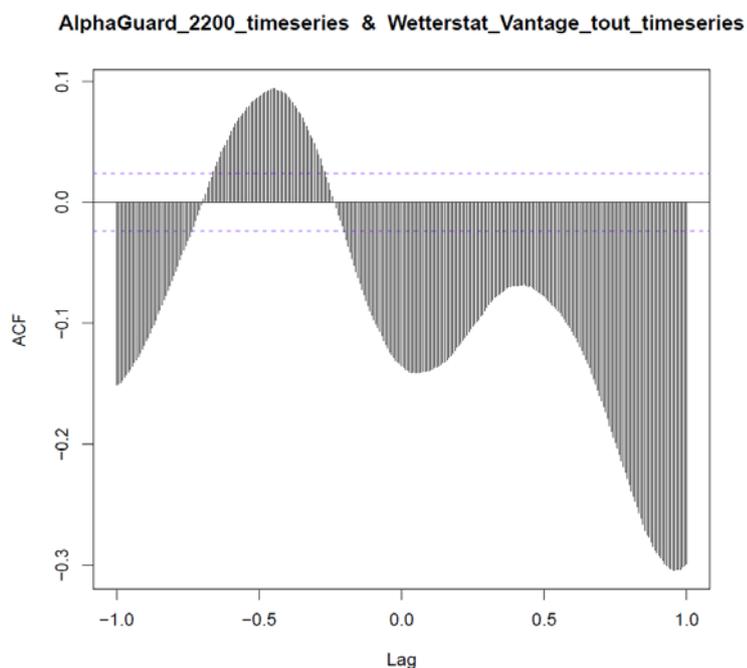


Abbildung 50: Korrelation von Radonkonzentration und Außentemperatur in der Küche in Messobjekt 5

Abbildung 51 zeigt die Korrelation der beiden Größen im gleichen Raum. Die Korrelation von -0,46 deutet auf einen großen Einfluss hin. Allerdings liegt der Versatz bei 1440 Minuten, also einem Tag. Der positive Versatz bedeutet in diesem Fall, dass sich erst die Temperatur und danach die Radonkonzentration ändert. Es ist aber auch ersichtlich, dass bereits ein Versatz von weniger als einem Tag zu einer Korrelation von mehr als -0,3 führt. Dies verdeutlicht die Abhängigkeit der Radonkonzentration von der Außentemperatur, zeigt aber auch, dass das System sehr träge ist und einige Zeit zum Reagieren benötigt.

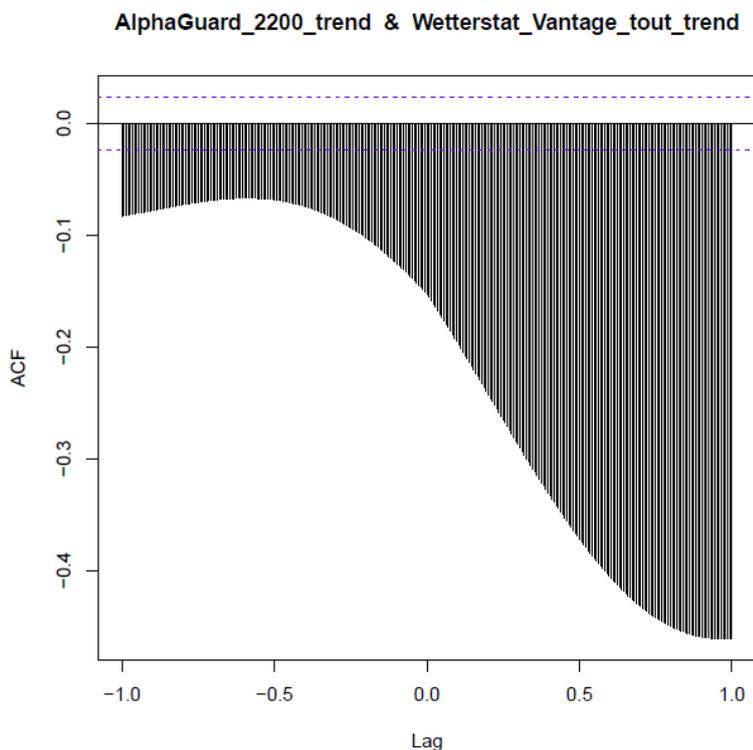


Abbildung 51: Korrelation der Tagesmittelwerte von Radonkonzentration in der Küche und Außentemperatur in Messobjekt 5

Tabelle 15 zeigt eine Übersicht über die Korrelation von Radon und der Temperatur. Dargestellt ist der Korrelationskoeffizient für jedes Gebäude vor und nach der Sanierung von Radon und Außentemperatur, Radon und Temperaturdifferenz, Radon und Außentemperatur mit Tagesmittelwerten (Trend) sowie Radon und Temperaturdifferenz mit Tagesmittelwerten.

Korrelation Radon-Temperatur	Messobjekt 1		Messobjekt 2		Messobjekt 3		Messobjekt 4		Messobjekt 5	
	vorher	nachher								
Außen-temperatur Korrelation	-0,4	-0,4	0,1	-0,1	0,2	0,4	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3
zeitl. Versatz/min	167	136	546	268	816	296	1249	391	1367	591
Temperaturdifferenz Korrelation	0,1	0,2	-0,2	0,0	-0,1	-0,1	-0,2	0,0	-0,2	-0,3
zeitl. Versatz/min	-78	-917	-250	351	1348	1386	1007	623	-1351	-1376
Außen-temperatur Trend Korrelation	-0,5	-0,4	0,2	0,2	0,2	0,5	-0,3	-0,3	-0,5	-0,3
zeitl. Versatz/min	668	541	373	799	58	70	1193	704	1402	1440
Temperaturdifferenz Trend Korrelation	0,3	0,4	-0,2	0,1	0,0	0,3	-0,3	0,0	-0,2	-0,4
zeitl. Versatz/min	73	-1440	438	-547	-573	-1354	927	1184	-1440	-1440

Tabelle 15: Übersicht der Korrelationskoeffizienten Radon-Temperatur in allen Messobjekten

Es ist ersichtlich, dass eine Betrachtung der Tagesmittelwerte eine stärkere Korrelation bewirkt als eine reine Betrachtung der Rohdaten. Dies ist auf die starken statistischen Schwankungen innerhalb einer Messreihe zurückzuführen. Zudem zeigt auch der zeitliche Versatz, dass das System sehr träge ist und kleine Schwankungen nicht berücksichtigt werden.

In den Messobjekten 1, 4 und 5 zeigt sich ein negativer Korrelationskoeffizient aufgrund der Konvektion und des Kamineffekts. Durch das Aufsteigen der warmen Luftmassen entsteht ein Unterdruck. Dieser bewirkt, dass mehr Radon in den Keller dringt. Von dort kann es sich über Konvektion im gesamten Haus verteilen.

Zusätzlich zeigt sich, dass in Messobjekt 2 keine Korrelationen auftreten. Bei näherer Betrachtung der einzelnen Werte für jedes Zimmer (siehe Anhang) wird deutlich, dass hier in einzelnen Zimmern eine positive Korrelation auftrat. Auch in Messobjekt 3 ist der sich ergebende Korrelationskoeffizient positiv, wie in Abbildung 52 zu sehen ist. Bei dieser wird der zeitliche Versatz auf der x-Achse in Tagen angegeben.

AlphaGuard_654_timeseries & Wetterstat_Vantage_tout_timeseries

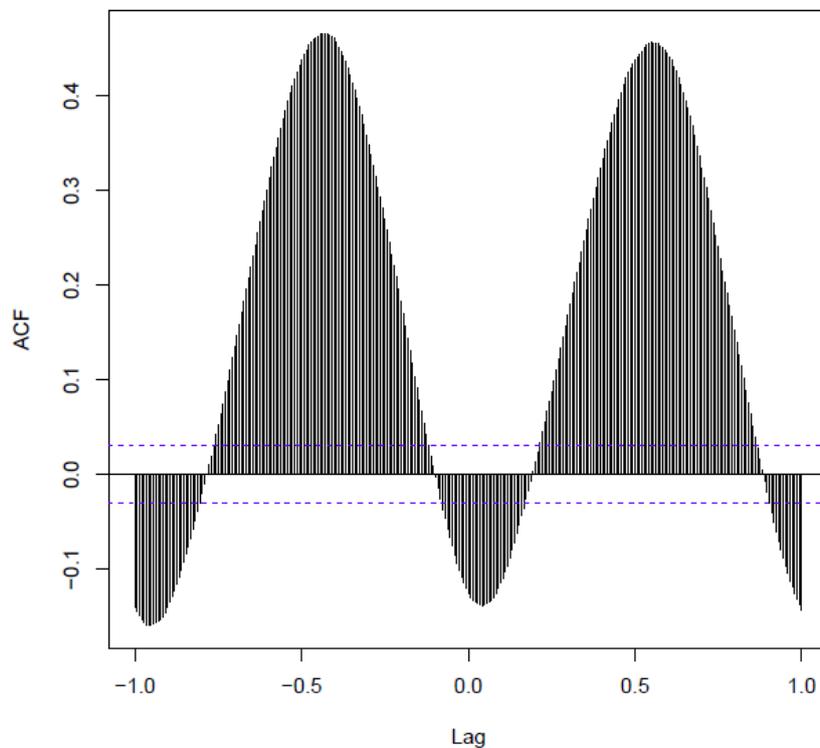


Abbildung 52: Korrelation und zeitlicher Versatz von Radon und der Außentemperatur in Messobjekt 3 nach der Sanierung

Eine Erklärung hierfür könnte die Jahreszeit sein. Beide Messobjekte hatten ihre Messzeit während der Übergangszeit. Draußen ist es nachts kalt und tagsüber wärmer. Die Luft im Gebäude kann sich nicht schnell genug erwärmen. Wenn die Außentemperatur nun ein relativ konstantes Niveau hat, wird es auch im Haus langsam wärmer. Der bestehende Überdruck verringert sich und es kann wieder mehr Radon in das Haus gelangen.

Tritt die positive Korrelation überwiegend in den Kellerräumen auf, so können sogenannte Kaltluftseen die Erklärung dafür sein. Wird es außen wärmer, bleibt die Kellerluft meist dennoch kühl und wird damit vom Luftkreislauf der warmen Luftmassen der oberen Etagen abgekoppelt. Die kalte Luft verbleibt im Keller, wodurch sich die Radonkonzentration erhöht.

Auffallend ist ebenfalls, dass nach der Sanierung etwas höhere Korrelationskoeffizienten auftreten. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die Gebäudehülle

dichter geworden ist. Nur bei einer dichten Gebäudehülle können Druckunterschiede entstehen, die den Radontransport begünstigen.

Einflussfaktor Luftdruck

Der Einfluss des Luftdrucks wird in Tabelle 16 dargestellt. Prinzipiell gilt die Annahme, die Druckdifferenz sei die treibende Kraft der Luftmassen. Entsteht im Keller ein Unterdruck, so wird das Radon aus dem Boden gesogen. Herrscht im Keller dagegen ein Überdruck, so wird weniger Radon in den Keller gelangen. Im Keller müsste der Korrelationskoeffizient der Druckdifferenz demnach negativ sein.

Korrelation Radon-Luftdruck	Messobjekt 1		Messobjekt 2		Messobjekt 3		Messobjekt 4		Messobjekt 5	
	vorher	nachher								
Außendruck Korrelation	-0,1	-0,3	0,2	0,0	-	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
zeitl. Versatz/min	201	1293	1320	1440		1364	675	929	1395	1412
Druckdifferenz Korrelation	-0,2	-0,3	0,0	0,1		0,0	-0,2	-0,1	0,0	0,0
zeitl. Versatz/min	-449	210	1337	1153		1401	1400	1246	992	234
Außendruck Trend Korrelation	-0,4	-0,6	0,3	0,2		0,2	0,3	0,1	0,3	0,4
zeitl. Versatz/min	-78	1419	1322	978		1399	982	929	1440	1440
Druckdifferenz Trend Korrelation	-0,2	-0,2	0,1	0,1		0,1	-0,2	-0,1	0,1	0,0
zeitl. Versatz/min	-159	526	857	471		1408	561	164	-106	451

Tabelle 16: Übersicht der Korrelationskoeffizienten Radon-Luftdruck in allen Messobjekten

Es zeigt sich, dass trotz der theoretischen Annahme, die Druckdifferenz sei die treibende Kraft der Luftbewegungen, wenig Korrelation zwischen Luftdruckdifferenz und Radonkonzentration besteht. Zudem haben sich sowohl negative als auch positive Korrelationskoeffizienten ergeben. Ein Grund dafür kann die Jahreszeit sein, in der gemessen wurde. Messobjekt 1 wurde während warmer Temperaturen in den Sommermonaten gemessen.

In Messobjekt 1 zeigen sich deutliche negative Korrelationen die im Ansatz in Abbildung 53 zu sehen sind.

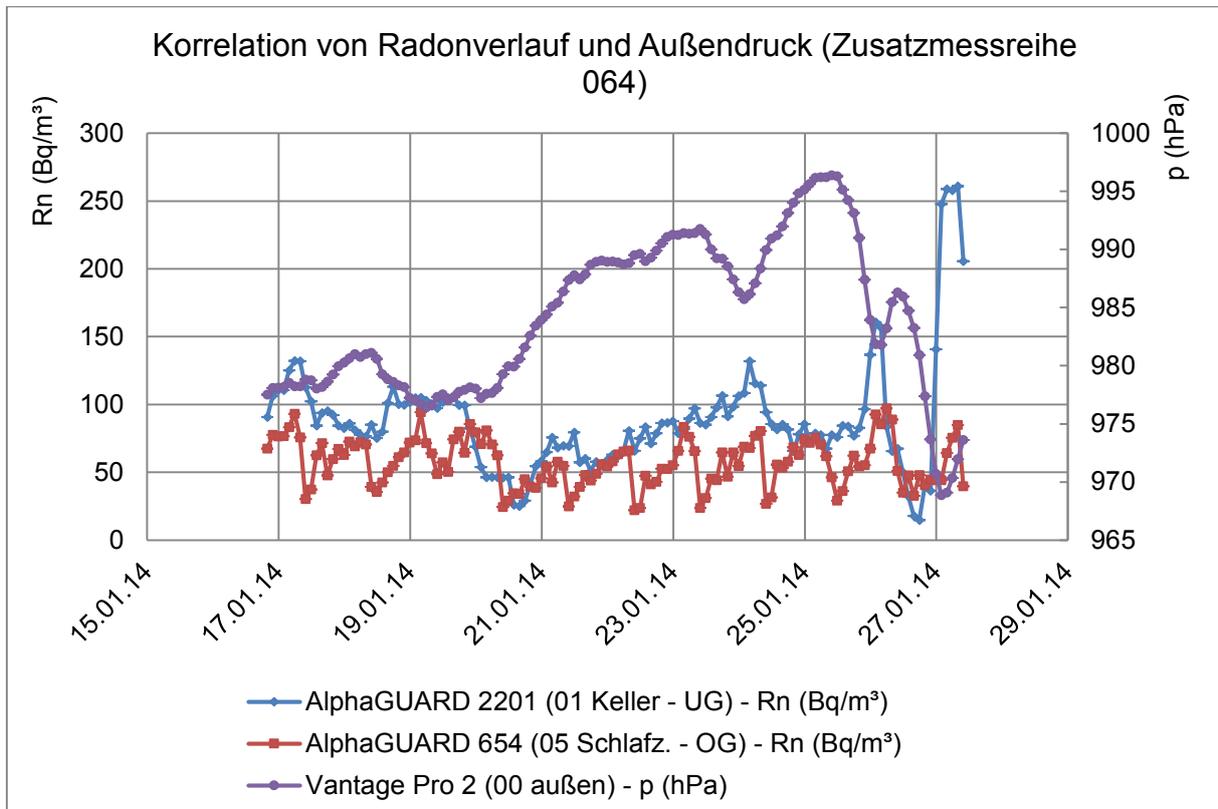


Abbildung 53: Verlauf von Radon und Außendruck in Messobjekt 1

Die Messungen wurden in der wärmeren Jahreszeit durchgeführt. In dieser Zeit herrschen im Keller niedrigere Temperaturen als in der Außenluft. Da sich die Kellerluft weniger erwärmt als die Außenluft und die der Räume in den oberen Stockwerken, können im Keller so genannte Kaltluftseen entstehen. Die kühlere Luft wird dadurch von den Luftströmungen des Hauses abgekoppelt. Im Keller entsteht aufgrund der kalten Luft ein Überdruck. Wird der Außendruck im Sommer größer, so verstärkt sich dieser Effekt und der Überdruck im Keller erhöht sich. Dies behindert den Transport des Radons an die Oberfläche, wodurch die Radonkonzentration sinkt.

Die anderen Messobjekte zeigen keine bzw. leicht positive Korrelationen.

Abbildung 54 zeigt den Verlauf der Radonkonzentration sowie des Außendrucks im Erdgeschoss von Messobjekt 2 vor der Sanierung. Die positive Korrelation der Tagesmittelwerte ist deutlich. Wird in kalten Jahreszeiten der Außendruck geringer, so verringert sich auch der bestehende Unterdruck im Keller. Es wird weniger Radon

aus dem Erdreich gesogen, was auch eine geringere Radonkonzentration in den darüber liegenden Räumen mit sich bringt.

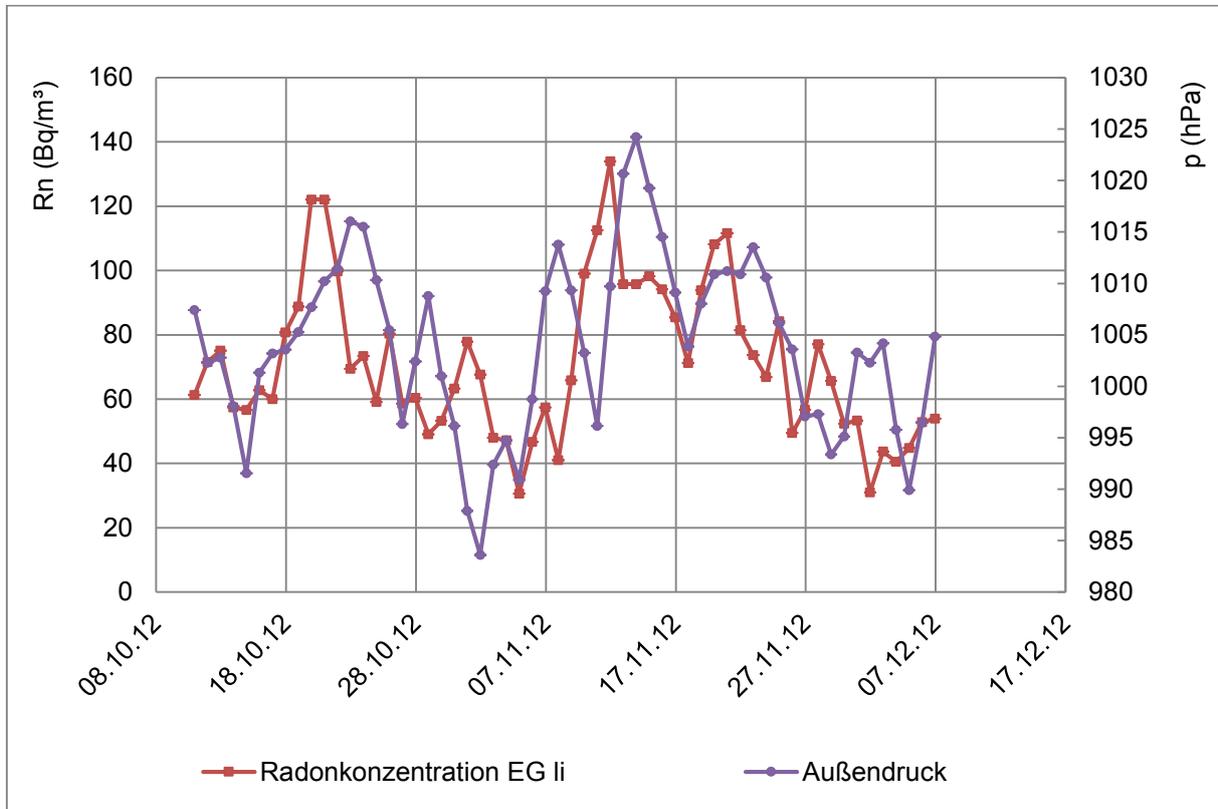


Abbildung 54: Verlauf der Tagesmittelwerte von Radon (Erdgeschoss links) und Außendruck in Messobjekt 2 vor der Sanierung

Bei näherer Betrachtung der einzelnen Räume (siehe Anhang) sind auch einzelne negative Korrelationen der Druckdifferenz zu erkennen. Auf einen Unterdruck wirkt eine Druckdifferenzerhöhung, in dem der Unterdruck geringer wird. Das heißt, die Sogwirkung wird geringer und so kommt weniger Radon in den Keller. Bei einem Überdruck bewirkt eine Druckdifferenzerhöhung einen stärkeren Überdruck, der wie ein Gegendruck zum aufströmenden Radon wirkt. Demnach wirkt sich eine steigende Druckdifferenz negativ auf die Radonkonzentration aus.

Für die zeitliche Ableitung des Außendruckes wurde ebenfalls die Kreuzkorrelation zur Radonkonzentration bestimmt. Die Werte waren allerdings zu niedrig um eine Korrelation zu bestätigen. Auch mit gemittelten Werten über 2 Stunden verbesserte sich das Ergebnis nur geringfügig.

Einflussfaktor Wind

Die Aufzeichnung des Windes erfolgte mit einer Wetterstation Vantage Pro 2. Diese registriert Wind nur dann, wenn er kontinuierlich weht. Es werden also keine kurzen Windstöße aufgezeichnet.

Abbildung 55 zeigt beispielhaft den möglichen Einfluss von Wind auf die Radonkonzentration in Innenräumen anhand von Messobjekt 2.

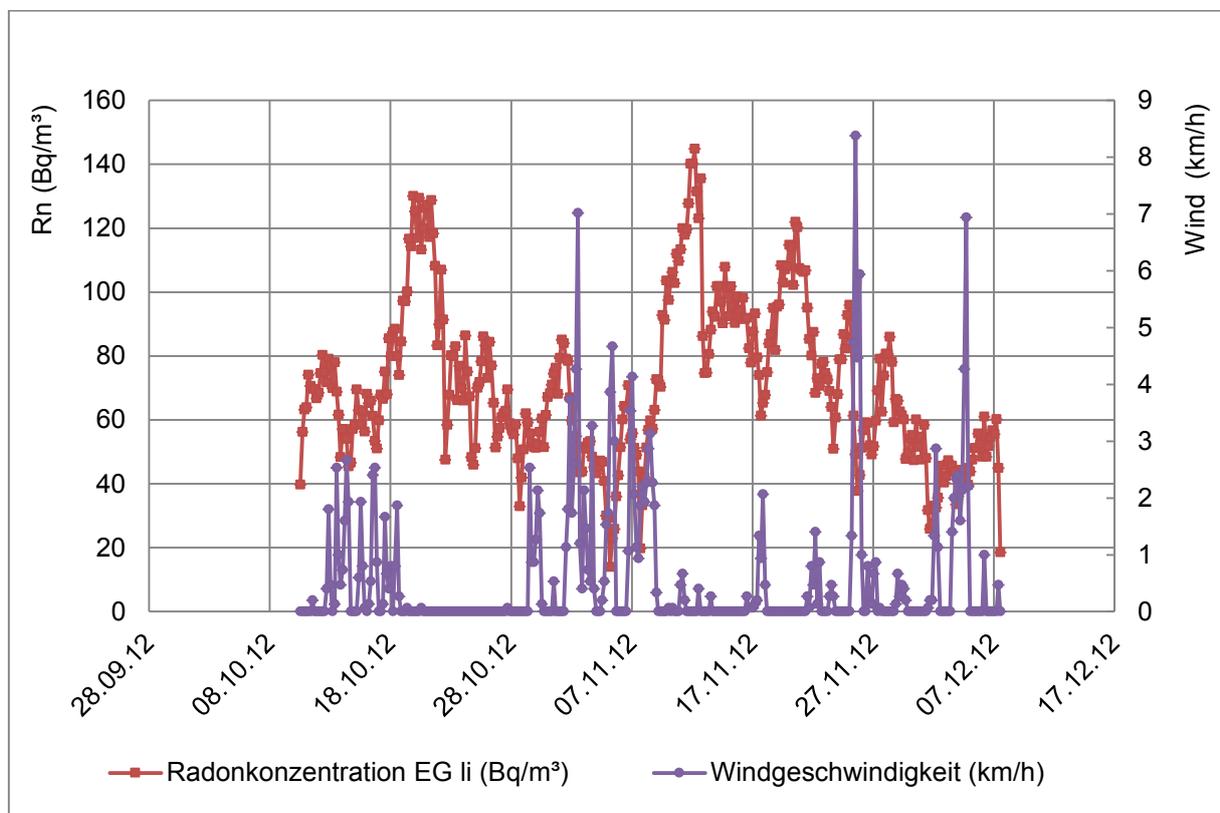


Abbildung 55: Verlauf der Radonkonzentration (Erdgeschoss links) und der Windgeschwindigkeit in Messobjekt 2 vor der Sanierung

Bei wenig dichten Gebäuden kann ein windiger bzw. stürmischer Tag den Luftwechsel im Gebäude erhöhen. Die Radonkonzentration verringert sich dadurch.

In Tabelle 17 sind die Korrelationskoeffizienten zwischen Radon und Wind aufgeführt. Es zeigt sich in den meisten Messobjekten, dass lediglich bei den Tagesmittel-

werten eine tatsächliche negative Korrelation besteht. Dies ist mit der Tatsache zu erklären, dass die Wetterstation sehr träge ist und keine leichten Windstöße registriert werden. Auch die Radonkonzentration reagiert auf konstant stärkere Luftwechsellraten aufgrund des Windes statt auf leichte Windstöße.

Korrelation Radon-Wind	Messobjekt 1		Messobjekt 2		Messobjekt 3		Messobjekt 4		Messobjekt 5	
	vorher	nachher								
Wind Korrelation	-0,1	0,0	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
zeitl. Versatz/min	274	-1236	110	-75	1342	-504	213	151	1025	281
WindTrend Korrelation	-0,3	0,4	-0,3	-0,1	-0,2	-0,3	-0,5	-0,4	-0,4	-0,2
zeitl. Versatz/min	322	501	273	451	1293	240	430	345	1406	255

Tabelle 17: Übersicht der Korrelationskoeffizienten Radon-Wind in allen Messobjekten

Abbildung 56 zeigt einen Vergleich, in dem beispielhaft für Messobjekt 5 links die Korrelation zwischen Radonkonzentration und Wind im ungeglätteten Zustand dargestellt ist und rechts mit den Tagesmittelwerten. In der ungeglätteten Abbildung ergibt sich eine Korrelation von -0,23 und in der Abbildung der Tagesmittelwerte eine Korrelation von -0,52. Der zeitliche Versatz wird auf der x-Achse in Tagen angegeben.

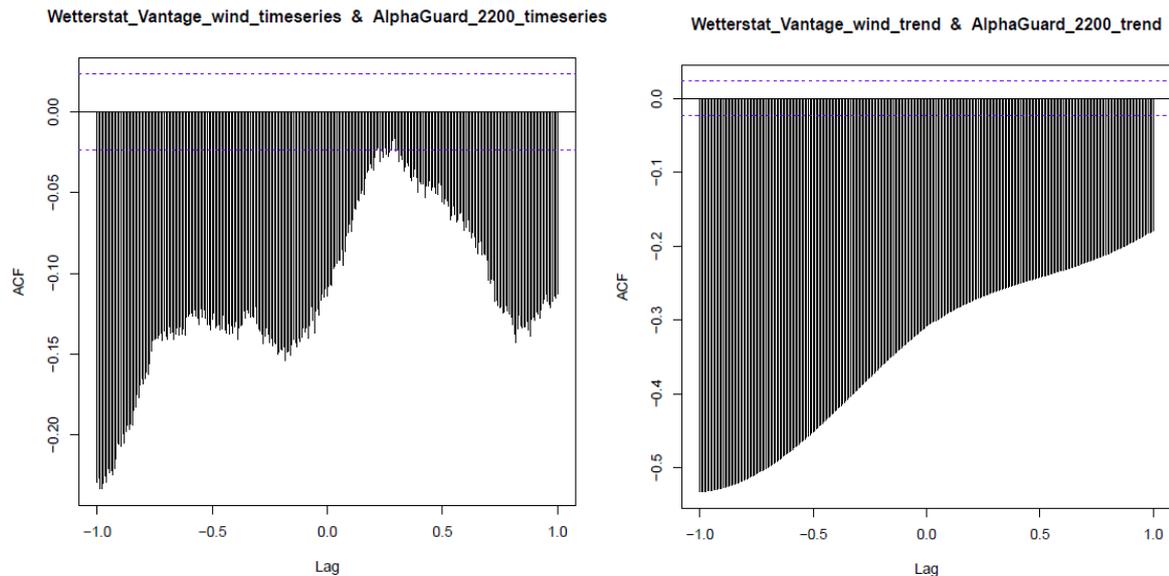


Abbildung 56: Vergleich der Korrelationen zwischen Wind und Radonkonzentration in der Küche ungeglättet und im Tagesmittelwert in Messobjekt 5 vor der Sanierung

Auffallend ist zusätzlich, dass die Korrelation im Mittel vor der Sanierung deutlich stärker ist als nach der Sanierung. Grund dafür ist die dichtere Gebäudehülle, durch die der Luftwechsel herabgesetzt wird und der Wind dadurch nicht mehr so stark wirken kann.

In Messobjekt 1 ist der Korrelationskoeffizient nach der Sanierung im positiven Bereich. Dies bezieht sich auf alle Räume des Hauses bis auf den Keller. Eine mögliche Ursache dafür könnte sein, dass der Wind nicht mehr durch die Undichtigkeiten der Fenster in den bewohnten Etagen dringen kann, weil diese saniert wurden. Er kann aber weiterhin durch die Fenster im Keller eindringen. Dort bewirkt er Luftströmungen, die zum einen eine Verdünnung der Radonkonzentration im Keller führt, zum anderen aber auch den Transport der radonhaltigen Kellerluft in die Wohnräume. Ein Transport über den Kaminschacht, der als Radonpfad angenommen wird, ist ebenfalls möglich.

Einflussfaktor relative Luftfeuchtigkeit

Erhöht sich die relative Luftfeuchtigkeit der Außenluft, ist dies häufig das Resultat von Niederschlägen oder einer Verringerung der Außentemperatur.

Eine Zunahme der Niederschläge verdichtet den Boden, wodurch das Radon nicht mehr über die Erdoberfläche entweichen kann. Es konzentriert sich daher im Boden und kann in das Untergeschoss der Häuser entweichen.

Erhöht sich die relative Luftfeuchtigkeit aufgrund einer Verringerung der Außentemperatur, so verhält sich die Radonkonzentration gemäß der Korrelationskoeffizienten der Außentemperatur.

Tabelle 18 zeigt eine Übersicht aller mittleren Korrelationen zwischen Luftfeuchtigkeit und Radonkonzentration.

Korrelation Radon-Luftfeuchte	Messobjekt 1		Messobjekt 2		Messobjekt 3		Messobjekt 4		Messobjekt 5	
	vorher	nachher								
Luftfeuchte Korrelation	0,3	0,4	0,1	0,1	0,2	-0,4	0,4	0,3	0,3	0,2
zeitl. Versatz/min	266	1157	350	511	204	772	66	51	397	201
LuftfeuchteTrend Korrelation	0,1	0,4	0,2	0,0	0,1	-0,6	0,5	0,4	0,4	0,1
zeitl. Versatz/min	595	1428	287	459	750	1317	185	-111	658	1440

Tabelle 18: Übersicht der Korrelationskoeffizienten Radon-Luftfeuchtigkeit in allen Messobjekten

In Messobjekt 1, 4 und 5 wurden positive Korrelationen gefunden. Diese können durch den Effekt des Regens hervorgerufen worden sein. Gleichzeitig können sie aber auch aus einer Änderung der Außentemperatur stammen.

Auch in Messobjekt 3 wurde eine klare Korrelation festgestellt, allerdings in negative Richtung. Der Verlauf der Tagesmittelwerte der Radonkonzentration sowie der äußeren Luftfeuchtigkeit ist in Abbildung 57 beispielhaft für dieses Messobjekt dargestellt.

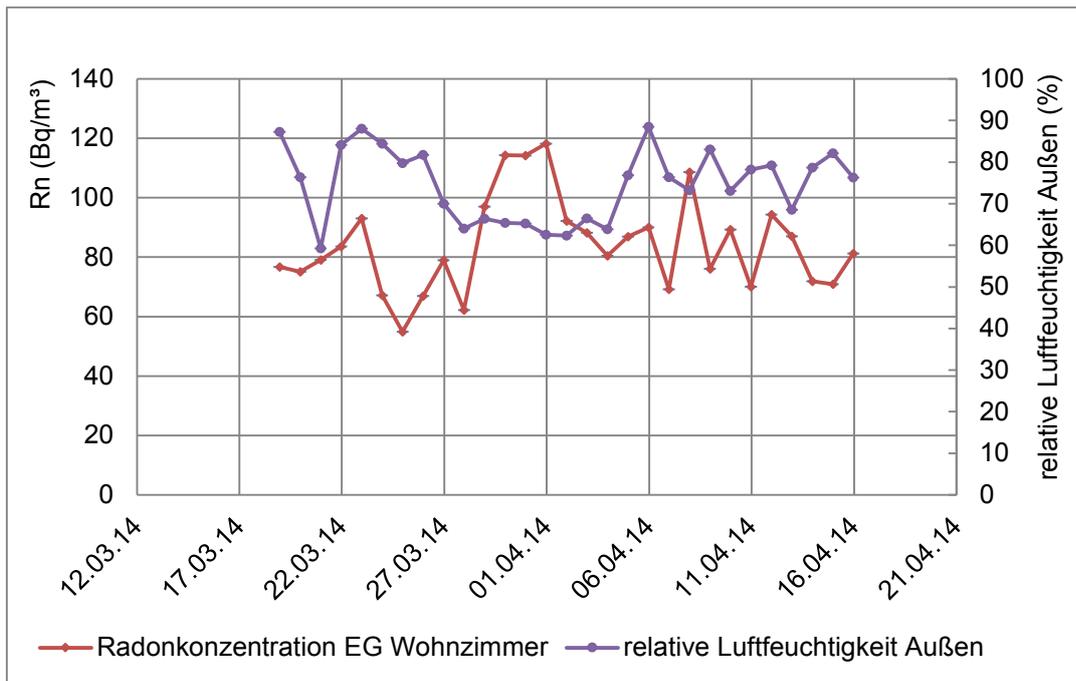


Abbildung 57: Verlauf der Radonkonzentration im Wohnzimmer sowie der relativen Luftfeuchtigkeit Außen in Messobjekt 3 nach der Sanierung

Da alle gefundenen Korrelationen genau entgegengesetzt zu den Korrelationen der Außentemperatur gerichtet sind, liegt es nahe, die Luftfeuchtigkeitsänderung als Resultat der Temperaturänderung als Hauptursache für die Korrelation anzunehmen.

Raumnutzung

Anhand der Messungen der CO₂-Konzentrationen sind Rückschlüsse auf die Nutzung des Raums sowie den Luftwechsel möglich. In fast allen Gebäuden bzw. Räumen, die genutzt oder bewohnt waren, sind deutliche Korrelationen der Radonkonzentration mit der CO₂-Konzentration zu erkennen. Die Ursache dafür liegt in dem Abfall der Konzentrationen, die in beiden Fällen durch das Lüften oder das Öffnen von Türen hervorgerufen werden.

Abbildung 58 zeigt die Korrelation der Radonkonzentration mit der CO₂-Konzentration links bei einem genutzten und rechts bei einem ungenutzten Raum in Messobjekt 5. In dem genutzten Raum ergibt sich eine Korrelation von 0,45 und in dem ungenutzten Raum eine Korrelation von 0,17.

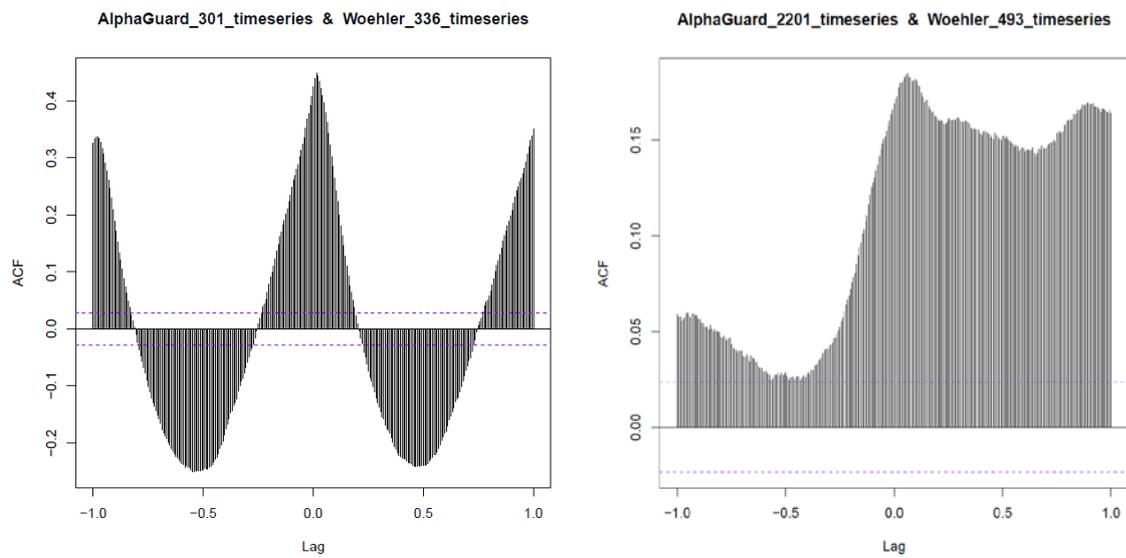


Abbildung 58: Vergleich der Korrelation zwischen Radon und CO₂ im bewohnten und unbewohnten Raum

In Tabelle 19 sind die Ergebnisse der Korrelationen zwischen Radon- und CO₂-Konzentration aufgeführt. Es wird deutlich, dass die signifikanten Korrelationen ausschließlich positiv sind. Die Korrelationen sind aufgrund ihrer unterschiedlichen Raumnutzung verschieden stark in ihrer Ausprägung.

Korrelation von Radon und CO ₂	Vorher	Korr. CO ₂	zeitl. Ver- satz/min	Nachher	Korr. CO ₂	zeitl. Ver- satz/min
Messobjekt 1	Zimmer 1	-	-	Zimmer 1	0,4	190
	Zimmer 2	-	-	Zimmer 2	0,4	-60
	Zimmer 3	-	-	Zimmer 3	0,6	-90
	Zimmer 4	-	-	Zimmer 4	0,4	1440
	Zimmer 5	-	-	Zimmer 5	0,5	-160
Messobjekt 2	Zimmer 1	0,2	-10	Zimmer 1	0,1	1370
	Zimmer 2	-0,2	1160	Zimmer 2	0,4	-10
	Zimmer 3	0,2	10	Zimmer 3	-	-
	Zimmer 4	0,1	-10	Zimmer 4	0,1	-350
	Zimmer 5	0,1	1420	Zimmer 5	-0,2	1440
Messobjekt 3	Zimmer 1	0,3	10	Zimmer 1	0,4	10
	Zimmer 2	-	-	Zimmer 2	0,3	-50
	Zimmer 3	0,1	180	Zimmer 3	0,2	10
	Zimmer 4	0,3	-1190	Zimmer 4	0,3	-690
	Zimmer 5	-	-	Zimmer 5	0,2	-150
Messobjekt 4	Zimmer 1	0,2	1440	Zimmer 1	-	-
	Zimmer 2	0,4	70	Zimmer 2	-	-
	Zimmer 3	0,3	140	Zimmer 3	0,2	-1080
	Zimmer 4	0,2	-890	Zimmer 4	0,2	-970
Messobjekt 5	Zimmer 1	0,4	-10	Zimmer 1	0,5	-70
	Zimmer 2	0,4	-20	Zimmer 2	0,3	-20
	Zimmer 3	0,2	880	Zimmer 3	0,4	-80
	Zimmer 4	0,1	790	Zimmer 4	0,4	-30
	Zimmer 5	0,2	-90	Zimmer 5	0,3	10

Tabelle 19: Überblick der Korrelationskoeffizienten zwischen Radon und CO₂

In Messobjekt 5 zeigt sich nach der Sanierung eine höhere Korrelation als vorher. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass höhere Temperaturen herrschten wegen derer häufiger gelüftet wurde. So trat die Herabsetzung beider Konzentrationen öfter zum gleichen Zeitpunkt auf. Die Bewohner gaben an, im Sommer regelmäßiger und länger zu lüften. Zudem ist die Gebäudehülle dichter, wodurch die Radonkonzentration in ihrem Verlauf weniger von der Außenluft beeinflusst wird.

Auch in Messobjekt 1 sind die Korrelationen sehr deutlich ausgeprägt. Dieses Objekt zeigt durch die zeitlichen Verläufe, dass eine sehr regelmäßige Lüftung stattgefunden hat. Auch im Protokoll der Hausbewohner wird dies bestätigt.

Luftwechsel

Eine starke Abnahme der Radonkonzentration sowie der CO₂-Konzentration deutet auf eine Stoßlüftung bzw. offene Fenster oder Türen hin. Bei einem zeitgleichen Anstieg von Radonkonzentration und CO₂-Konzentration wird der Raum genutzt.

Steigt die Radonkonzentration an, während die CO₂-Konzentration abfällt, ist dies ein Zeichen dafür, dass eine Person den Raum verlassen hat und dieser geschlossen ist. Dies ist in Abbildung 59 zu erkennen.

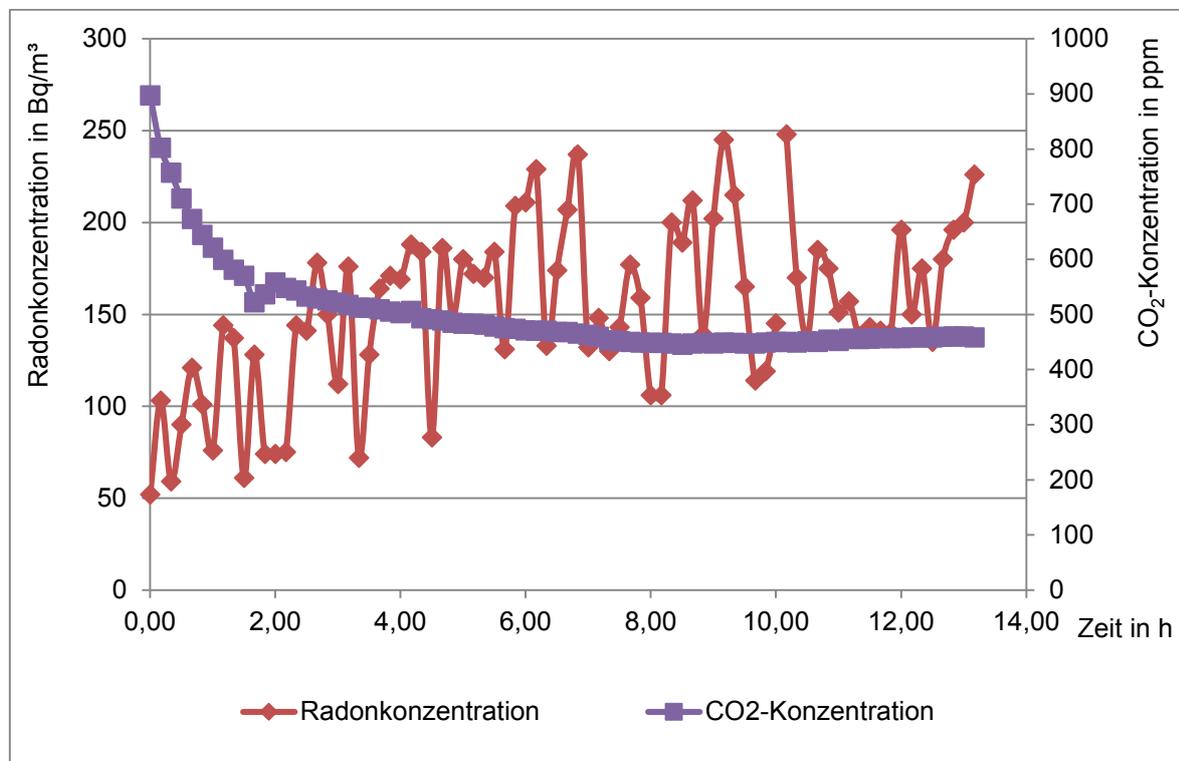


Abbildung 59: Verlauf von Radonkonzentration und CO₂ bei Abwesenheit einer Person

Aus dem Verlauf der CO₂-Konzentration lässt sich die natürliche Luftwechselrate für den ungelüfteten Raum berechnen. Dazu wird an den Kurvenverlauf eine e-Funktion angepasst. Der negative Exponent, d.h. die reziproke Zeitkonstante der e-Funktion entspricht der Luftwechselrate. So kann aus gegebenen Verläufen die Luftwechselrate berechnet werden.

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der Luftwechselrate ist die Unterdruckmessung. Diese liefert als Ergebnis eine mittlere Luftwechselrate k des Gebäudes unter Normalbedingungen, die aus der Luftwechselrate n_{50} , die durch die Unterdruckmessung gewonnen wurde, berechnet wird. Man erhält so allerdings keine Luftwechselrate die spezifisch zu einem zeitlichen Verlauf passt, sondern die mittlere Luftwechselrate während eines gesamten Jahres. Der aktuelle Wert, der zu der aktuellen Radonkonzentration gehören würde, hängt sehr von den Windverhältnissen ab, die bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden.

Die Umrechnung der Luftwechselrate n_{50} in die Luftwechselrate unter Normalbedingungen wird laut Formel 14 und DIN V 4108-6 Tabelle 4 vorgenommen.

$$k = e * n_{50}$$

Formel 15: Berechnung der Luftwechselrate k unter Normalbedingungen (Quelle: DIN EN 832)

Die Windschutzkoeffizienten e werden abhängig von der Lage und dem Windschutz des Hauses aus Tabelle 20 abgelesen.

Tabelle 4 — Windschutzkoeffizienten für unterschiedliche Lagen eines Gebäudes

Lage	Windschutzkoeffizient e_{wind}	
	mehr als eine dem Wind ausgesetzte Fassade	eine dem Wind ausgesetzte Fassade
freie Lage	0,10	0,03
halbfreie Lage	0,07	0,02
geschützte Lage	0,04	0,01

Tabelle 20: Koeffizienten e zur Umrechnung der Luftwechselrate n_{50} in die Luftwechselrate unter Normalbedingungen laut DIN V 4108-6 Tabelle 4

Die Ergebnisse der beiden Berechnungen sind in Tabelle 21 zusammengestellt. In Anbetracht der Tatsache, dass die Berechnungen aus der CO₂-Konzentration aktuelle Werte des Messraums und die aus der Unterdruck-Messung gewonnenen Luftwechselraten mittlere Werte des gesamten Hauses während eines Jahres darstellen,

waren Unterschiede zu erwarten. Dennoch zeigen die Ergebnisse gute Übereinstimmungen.

Berechnung der Luftwechselrate	Luftwechsel n50/h	Umrechnungsfaktore	Luftwechselrate k aus Unterdruck-Messung/h	Luftwechselrate k aus CO ₂ -Abfall/h
Messobjekt 1 vorher Wohnzimmer	3,5	0,07	0,2	-
Messobjekt 1 nachher Wohnzimmer	2,6	0,07	0,2	0,2
Messobjekt 5 vorher Küche	3,7	0,04	0,1	0,2
Messobjekt 5 nachher Küche	2,4	0,04	0,1	0,2
Messobjekt 3 vorher Büro	4,3	0,04	0,2	0,8
Messobjekt 3 nachher Büro	3,8	0,04	0,2	0,8
Messobjekt 2 vorher EG li	5,6	0,07	0,4	
Messobjekt 2 nachher EG re	1	0,07	0,1	1,2
Messobjekt 4 vorher Wohnzimmer	4,5	0,04	0,2	0,4
Messobjekt 4 nachher Wohnzimmer	4,5	0,04	0,2	0,4

Tabelle 21: Luftwechselrate aus CO₂-Abfall sowie aus der Unterdruck-Messung berechnet

Die Luftwechselraten in Messobjekt 2 nachher sowie Messobjekt 3 zeigen keine guten Übereinstimmungen. Grund dafür kann in erster Linie die unterschiedliche Methode sein. Da sich die Luftwechselrate aus der Unterdruck-Messung auf das gesamte Haus bezieht, ist es möglich, dass im Messraum eine ganz andere Luftwechselrate herrscht. Als Ursache kann ebenfalls vermehrter Wind angesehen werden. Auch die gekippte Öffnung eines Fensters oder eine geöffnete Zimmertür ist möglich.

Radonquellstärke

Die Radonquellstärke wird in dieser Auswertung mit drei unterschiedlichen Methoden bestimmt.

Methode 1 nutzt die Werte der Luftwechselrate, die durch die Unterdruck-Messung gewonnen wurden.

Methode 2 nutzt die Werte der Luftwechselrate, die aus dem CO₂-Abfall gewonnen wurden.

Bei beiden Methoden wird die Luftwechselrate in die umgestellte Differenzgleichung (Formel 10) eingefügt um daraus die Quellstärke zu berechnen.

Die willkürliche Auswahl des Messortes sowie des Zeitpunktes stellt eine erhebliche zusätzliche Unsicherheit bezüglich der Sättigungskonzentration dar. Die berechnete Quellstärke stellt durch diesen Fehlereinfluss und die Ungenauigkeit der beiden Methoden zur Berechnung der Luftwechselrate lediglich eine erste Näherung dar.

In Tabelle 22 und Tabelle 23 ist die berechnete Quellstärke auf Grundlage der verschiedenen Berechnungsarten aufgeführt. Unterschiede resultieren aus der berechneten Luftwechselrate, da bei beiden Methoden der gleiche Radonkonzentrationsverlauf gewählt wurde. Es zeigt sich, dass die auf CO₂-Grundlage berechneten Quellstärken deutlich höher sind als die der Unterdruck-Messungen. Grund dafür ist insbesondere die unterschiedliche Berechnung der Luftwechselraten, auf die im Kapitel „Luftwechselrate“ eingegangen wurde. Ein stärkerer Luftwechsel (berechnet) gibt bei konstanter Radonkonzentration eine höhere Quellstärke aus. Eine weitere mögliche Fehlerquelle kann ein falscher Windschutzkoeffizient sein, da dieser abhängig von der Umgebung des Hauses mit eigenem Ermessen ausgewählt wird.

Bestimmung der Quellstärke mit Unterdruck-Messung	Luftwechsel k (1/h)	Quellstärke Q (Bq/h)
Messobjekt 1 vorher Wohnzimmer	0,2	35
Messobjekt 1 nachher Wohnzimmer	0,2	19
Messobjekt 5 vorher Küche	0,1	15
Messobjekt 5 nachher Küche	0,1	15
Messobjekt 3 vorher Büro	0,2	22
Messobjekt 3 nachher Büro	0,2	44
Messobjekt 2 vorher EG li	0,4	76
Messobjekt 2 nachher EG re	0,1	45
Messobjekt 4 vorher	0,2	15
Messobjekt 4 nachher	0,2	177

Tabelle 22: Quellstärke mit Unterdruck-Messung bestimmt

Bestimmung der Quellstärke mit CO ₂ -Abklingmethode	Luftwechsel k (1/h)	Quellstärke Q (Bq/h)
Messobjekt 1 vorher Wohnzimmer	-	-
Messobjekt 1 nachher Wohnzimmer	0,2	20
Messobjekt 5 vorher Küche	0,2	18
Messobjekt 5 nachher Küche	0,2	21
Messobjekt 3 vorher Büro	0,8	96
Messobjekt 3 nachher Büro	0,8	181
Messobjekt 2 vorher EG li		
Messobjekt 2 nachher EG re	1,2	118
Messobjekt 4 vorher	0,4	24
Messobjekt 4 nachher	0,4	268

Tabelle 23: Quellstärke mit CO₂-Abklingmethode bestimmt

Methode 3 nutzt ebenfalls die Unterdruck-Messung zur Ermittlung der Quellstärke. Hier wird aber zum Zeitpunkt des angelegten Unterdrucks im Gebäude die Quellstärke bestimmt. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Radonkonzentration in vielen Messungen auf ein Plateau angestiegen ist. Unter Normalbedingungen war dies jedoch nicht der Fall. Zudem ist die Luftwechselrate durch den austretenden Volumenstrom aus der Unterdruck-Messung bekannt, wodurch alle Parameter für die Bestimmung der Quellstärke gegeben sind. Die Austrittsrate berechnet sich nun aus dem Volumenstrom, der aus dem Raum austritt, multipliziert mit der Radonkonzentration in diesem Raum. Ein Nachteil der Methode ist, dass nur die Quellstärke unter besonderen Bedingungen, also dem angelegten Unterdruck, bestimmt wird. Diese ist deutlich größer als unter Normalbedingungen. Aus dem Verlauf der Quellstärke bei angelegtem Unterdruck kann die Quellstärke unter Normalbedingungen (im Mittel ca. 2,5 Pa) abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse werden im Kapitel „Unterdruck-Messungen“ wiedergegeben.

Radonausbreitung

Durch die Korrelationskoeffizienten der Radonkonzentrationen zwischen den Räumen untereinander ist es in einigen Objekten möglich, den Ausbreitungsweg des Radons nachzuverfolgen. Zur Berechnung der Korrelationen wurden die Rohdaten herangezogen.

Messobjekt 1

Tabelle 24 zeigt beispielhaft die Korrelationen der Räume untereinander in Messobjekt 1 vor der Sanierung. Der zeitliche Versatz der beiden Wertereihen ist im Folgenden in Minuten angegeben und gelb markiert, der Korrelationskoeffizient ist blau markiert. Ist der zeitliche Versatz negativ, so tritt die Veränderung erst im Raum der oberen Zeile auf. Ist der zeitliche Versatz positiv, so tritt die Veränderung zuerst in dem Raum der linken Spalte auf.

Korrelation der Räume untereinander in Messobjekt 1 vor der Sanierung	Schlafzimmer 654	Gästezimmer 950	Wohnzimmer 301	Flur atmos
Schlafzimmer 654	1	0,2	0,3	0,2
Gästezimmer 950	-280	1	0,4	0,2
Wohnzimmer 301	-120	40	1	0,6
Flur atmos	-140	-50	-70	1

Tabelle 24: Korrelation der Radonkonzentration in den Räumen aus Messobjekt 1 vor der Sanierung

Die Korrelationen die sich unter den Räumen ergeben sind eher geringer Ausprägung. Die Korrelationskoeffizienten liegen im Bereich zwischen 0,2 und 0,6. Dabei ist das Wohnzimmer der einzige Raum, der bei allen Räumen einen Korrelationskoeffizienten von 0,3 und größer aufweist. Auffallend ist ebenfalls dass das Schlafzimmer große zeitliche Verzögerungen zu den anderen Räumen hat. Ein Grund dafür kann in der Nutzung des Raumes liegen.

Tabelle 25 zeigt in gleicher Darstellung die Korrelationen der Räume untereinander in Messobjekt 1 nach der Sanierung.

Korrelation der Räume untereinander in Messobjekt 1 nach der Sanierung	Schlafzimmer OG	Gästezimmer OG	Wohnzimmer EG	Flur EG	Keller UG
Schlafzimmer OG	1	0,5	0,4	0,4	0,4
Gästezimmer OG	20	1	0,7	0,6	0,5
Wohnzimmer EG	30	-20	1	0,7	0,5
Flur EG	10	10	30	1	0,4
Keller UG	-110	-50	-70	-70	1

Tabelle 25: Korrelation der Radonkonzentration der Räume aus Messobjekt 1 nach der Sanierung

In allen Räumen sind Korrelationen zu finden, die sich im Bereich zwischen 0,4 und 0,7 mit geringen Verzögerungen von 10 min bis 110 min befinden.

Es zeigt sich auch eine Korrelation von 0,5 zwischen Wohnzimmer und Keller, die beide direkt an das Erdreich anschließen. Allerdings beträgt die zeitliche Verzögerung hier 70 Minuten, wodurch nicht geschlossen werden kann, ob tatsächlich bei beiden Zimmern das Radon direkt aus dem Untergrund stammt oder der jeweils andere Raum als Quelle dient.

Die Korrelation von der Radonkonzentration im Gästezimmer zu der Radonkonzentration im Wohnzimmer ist ebenfalls mit 0,7 sehr groß, zumal die Räume nicht auf der gleichen Etage liegen. Auch die zeitliche Verzögerung ist mit 20 Minuten eher klein. Daraus lässt sich folgern, dass das Wohnzimmer eine Radonquelle für das Gästezimmer darstellt. Doch auch aus dem Keller kann ein zusätzlicher Beitrag stammen, da auch dort die Korrelation zum Gästezimmer mit 0,5 hoch ist. Als Radonpfad käme der bereits erwähnte Kamin in Betracht.

Messobjekt 2

In Messobjekt 2 wurden keine signifikanten Korrelationen der Räume untereinander gefunden. Eine mögliche Ursache dafür können die geringen Radonkonzentrationen sein, bei denen sich keine Korrelation feststellen lässt. Auch eine Exhalation aus dem Baumaterial kann bei solch geringen Radonkonzentrationen einen Einfluss haben.

Messobjekt 3

Tabelle 26 und Tabelle 27 zeigen die Korrelation der Räume von Messobjekt 3 vor und nach der Sanierung. Vor der Sanierung wurden leider zwei Messgeräte von der Stromquelle getrennt, sodass eine Überprüfung auf Korrelation nicht mehr möglich war.

Korrelation der Räume untereinander in Messobjekt 3 vor der Sanierung	Schlafzimmer OG	Wohnzimmer EG	Büro UG
Schlafzimmer OG	1	0,3	0,3
Wohnzimmer EG	-110	1	0,1
Büro UG	-10	10	1

Tabelle 26: Korrelation der Radonkonzentration der Räume aus Messobjekt 3 vor der Sanierung

Korrelation der Räume untereinander in Messobjekt 3 nach der Sanierung	Schlafzimmer 2200	Verteil. 654	Wohnzimmer 301	Büro 950	Keller 2201
Schlafzimmer 2200	1	0,6	0,5	0,3	0,4
Verteil. 654	-10	1	0,5	0,3	0,4
Wohnzimmer 301	-80	-90	1	0,3	0,4
Büro 950	0	20	80	1	0,1
Keller 2201	40	40	90	1420	1

Tabelle 27: Korrelation der Radonkonzentration der Räume aus Messobjekt 3 nach der Sanierung

Vor der Sanierung hat die Korrelation zwischen Schlafzimmer und Wohnzimmer einen Wert von 0,3. Der zeitliche Versatz geht allerdings in die Richtung, dass die Radonkonzentration erst im Schlafzimmer an- bzw. absteigt und dann im Wohnzimmer. Da das Schlafzimmer höher liegt als das Wohnzimmer, ist die Vermutung hier, dass die Korrelation nur durch Lüftungseffekte hervorgerufen wird und nicht durch eine Radonquelle.

Schlafzimmer und Büro korrelieren ebenfalls miteinander. Hier ist der zeitliche Versatz gering. Die beiden Räume sind voneinander getrennt. Das Schlafzimmer befindet sich über einer Einliegerwohnung an der Westseite des Hauses. Das Büro befindet sich

det sich unter der Küche an der Südseite des Hauses. Dennoch besteht eine Verbindung, die auch in der Nachher-Messung auftritt.

Nach der Sanierung bleibt die Korrelation zwischen Schlafzimmer und Büro bestehen. Hier wird allerdings deutlich, dass die Korrelationen zu den anderen Räumen ebenfalls signifikant sind. Der Verteilerraum liegt direkt vor dem Schlafzimmer, wodurch die Korrelation hier am deutlichsten ist. Der Verteilerraum hat zu dem nächstgelegenen Raum, also dem Wohnzimmer, eine ebenfalls sehr hohe Korrelation. Auch das Wohnzimmer ist mit den angrenzenden, untenliegenden Räumen signifikant korreliert. Nur die beiden Räume im Untergeschoss, Büro und Keller korrelieren nicht. Daraus kann geschlossen werden, dass die beiden Räume im Untergeschoss jeweils eine eigene Quelle haben und das Radon sich von diesen oder anderen Räumen des Untergeschosses nach oben ausbreitet.

Messobjekt 4

Tabelle 28 und Tabelle 29 zeigen die Korrelationskoeffizienten der verschiedenen Räume aus Messobjekt 4 vor und nach der Sanierung.

Es zeigt sich, dass vor der Sanierung alle Räume stark miteinander korrelieren.

Korrelation der Radonkonzentrationen in Messobjekt 4 vor der Sanierung	Gästeschlafzimmer UG	Kinderzimmer EG	Wohnzimmer EG	Werkstatt UG
Gästeschlafzimmer UG	1	0,4	0,4	0,4
Kinderzimmer EG	-30	1	0,4	0,3
Wohnzimmer EG	0	50	1	0,3
Werkstatt UG	-70	-120	-70	1

Tabelle 28: Korrelation der Radonkonzentration der Räume aus Messobjekt 4 vor der Sanierung

Korrelation der Radonkonzentrationen in Messobjekt 4 nach der Sanierung	Gästeschlafzimmer UG	Kinderzimmer EG	Wohnzimmer EG	Werkstatt UG
Gästeschlafzimmer UG	1	0,3	0,2	0,3
Kinderzimmer EG	0	1	0,5	0,3
Wohnzimmer EG	-10	20	1	0,2
Werkstatt UG	-30	10	-100	1

Tabelle 29: Korrelation der Radonkonzentration der Räume aus Messobjekt 4 nach der Sanierung

Dies zeigt Abbildung 60 beispielhaft an einem besonders gleichförmigen Verlauf im Erdgeschoss.

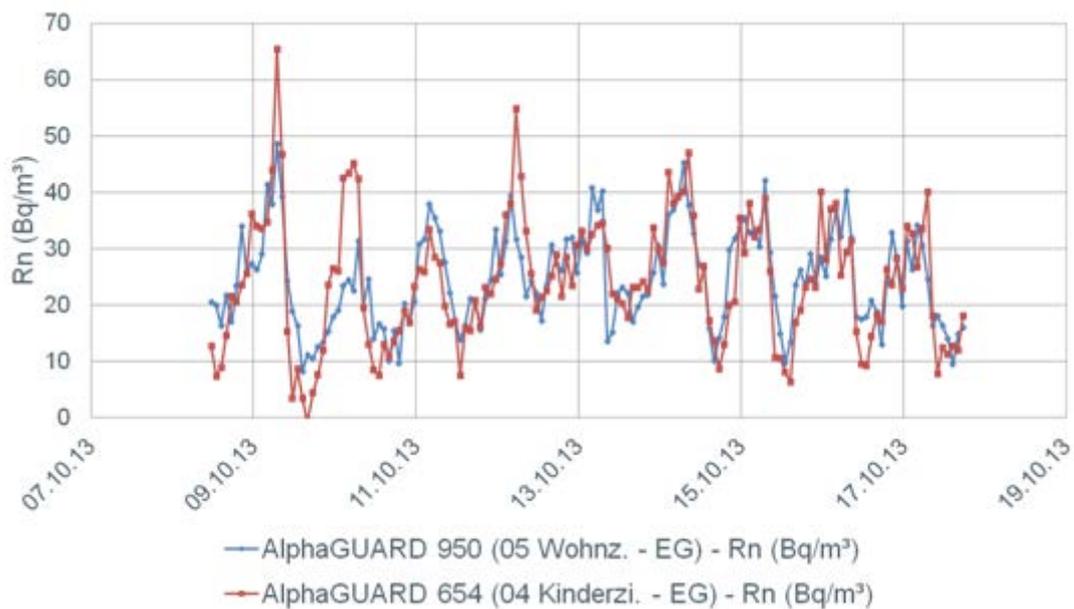


Abbildung 60: Verlauf der Radonkonzentration im Erdgeschoss in Messobjekt 4

Nach der Sanierung besteht vom Wohnzimmer nur eine Korrelation zum anderen Zimmer des Erdgeschosses, jedoch keine zum Keller. Auch in der Messreihe vor der Sanierung ist die zeitliche Verzögerung zwischen Wohnzimmer und Keller größer als bei den anderen Räumen. Das Wohnzimmer liegt im hinteren Teil des Gebäudes, aber direkt am Treppenaufgang. Das Wohnzimmer ist der einzige Raum, in dem ein Messgerät stand und der täglich für lange Zeit genutzt wird. Eine geringe Korrelation kommt möglicherweise durch die Nutzung zustande, die den Luftwechsel und damit die Radonkonzentration stark beeinflusst. Dies würden auch die Werte für die mittlere Radonkonzentration bestätigen, die in diesem Raum am geringsten sind.

Messobjekt 5

Tabelle 30 und Tabelle 31 zeigen die Korrelationen der Räume in Messobjekt 5 untereinander.

Korrelation der Radonkonzentrationen in Messobjekt 5 vor der Sanierung	Schlafzimmer 654	Kinderzimmer 301	Wohnzimmer 950	Küche 2200	Keller 2201
Schlafzimmer 654	1	0,5	0,3	0,4	0,3
Kinderzimmer 301	0	1	0,3	0,4	0,3
Wohnzimmer 950	-280	-290	1	0,3	0,4
Küche 2200	-30	0	170	1	0,4
Keller 2201	280	260	350	170	1

Tabelle 30: Korrelation der Radonkonzentration der Räume aus Messobjekt 5 vor der Sanierung

Korrelation der Radonkonzentrationen in Messobjekt 5 nach der Sanierung	Schlafzimmer 950	Kinderzimmer 654	Wohnzimmer 301	Küche 2200	Keller 2201
Schlafzimmer 950	1	0,4	0,5	0,4	0,5
Kinderzimmer 654	20	1	0,4	0,3	0,4
Wohnzimmer 301	-50	-50	1	0,4	0,6
Küche 2200	30	-20	20	1	0,5
Keller 2201	-60	-20	0	-30	1

Tabelle 31: Korrelation der Radonkonzentration der Räume aus Messobjekt 5 nach der Sanierung

Es zeigt sich, dass alle Räume miteinander korrelieren. Lediglich im Kellergeschoss ist die Korrelation vor der Sanierung mit 0,1 zu klein, um signifikant zu sein. Dabei ist allerdings auffällig, dass die Korrelationen nach der Sanierung stärker ausgeprägt sind und eine geringere zeitliche Verzögerung haben als vor der Sanierung. Der gleiche Effekt wurde in diesem Messobjekt bereits bei den Korrelationen der CO₂-Konzentration beobachtet. Auch hier gilt die Annahme, dass die Korrelationen aufgrund der dichteren Gebäudehülle und häufigeren aktiven Lüftung ansteigen. Mit einer dichteren Gebäudehülle werden Radonkonzentrationsveränderungen durch anliegende Radonkonzentrationsveränderung bewirkt und weniger durch die Verdünnung mit Außenluft.

Unterdruck-Messungen

Die Unterdruck-Messungen wurden in jedem Messobjekt nach DIN EN 13289, modifiziert mit stufenweisem Druckaufbau, durchgeführt. Das bedeutet, es wurden verschiedene Unterdruckstufen gewählt und die Radonkonzentration währenddessen in jedem Radonmessraum sowie im Raum des Unterdruck-Gerätes aufgezeichnet. Es wurde mit einem geringen Unterdruck begonnen. Das Ziel war die Mobilisierung des Radons aus dem Untergrund, ohne zu viel Außenluft durch die Undichtigkeiten im Gebäude anzusaugen.

Im Anschluss an die drei Unterdruckstufen wurde der Radonverlauf bei Überdruck gemessen. So konnte die Luftwechselrate, der sogenannte n_{50} -Wert, bestimmt werden. Dieser charakterisiert die Luftdichtheit eines Gebäudes. Der n_{50} -Wert wurde bei einem Über- und Unterdruck von 50 Pascal bestimmt.

Messobjekt 1

Abbildung 61 und Abbildung 62 zeigen die Ergebnisse der Unterdruck-Messungen vor und nach der Sanierung in Messobjekt 1.

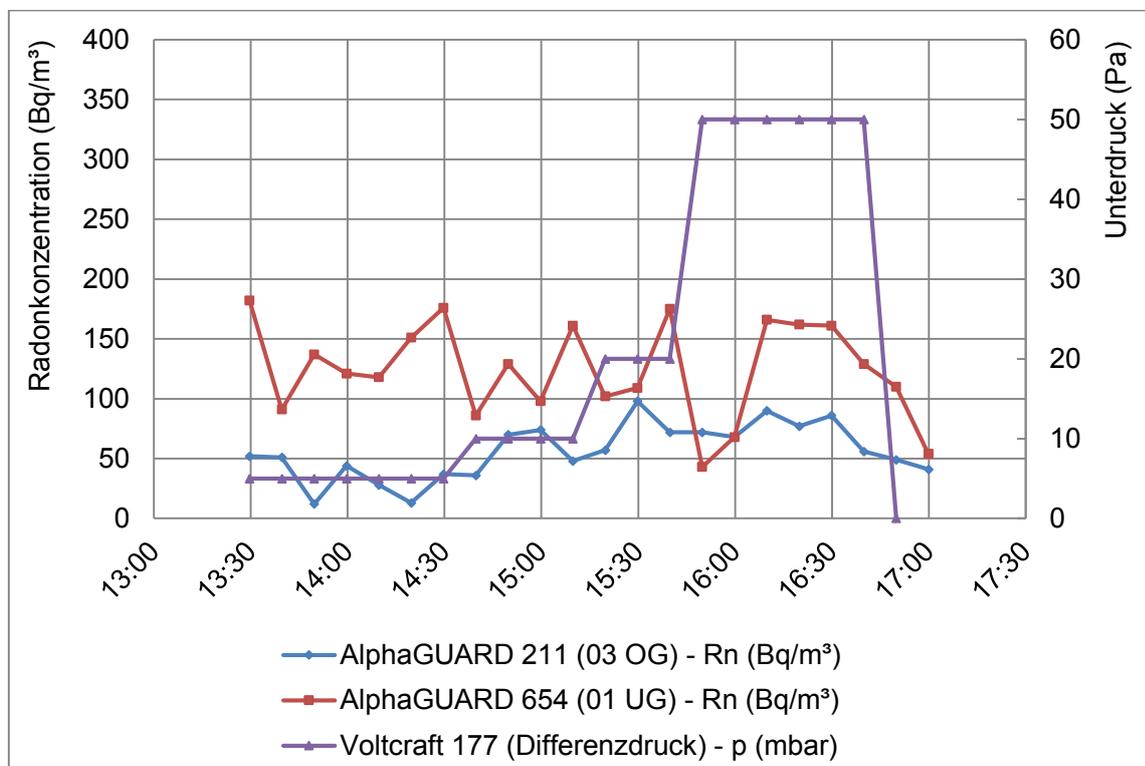


Abbildung 61: Unterdruck-Messung vor der Sanierung in Messobjekt 1

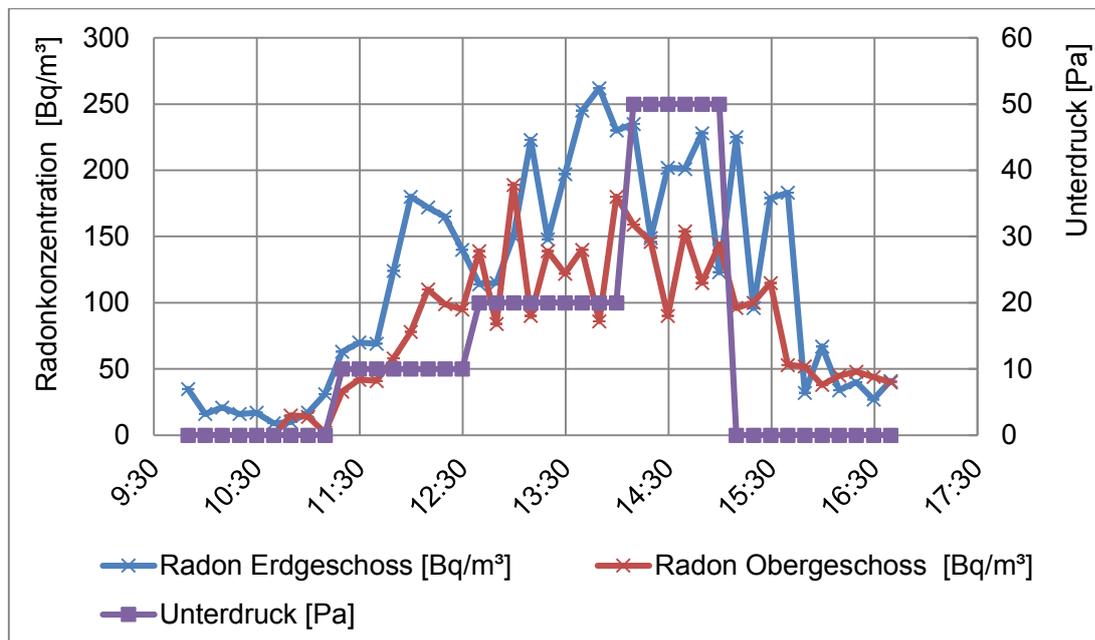


Abbildung 62: Unterdruck-Messung nach der Sanierung in Messobjekt 1

Die Verläufe vor der Sanierung des Gebäudes zeigen keinen Anstieg durch den angelegten Unterdruck. Dennoch lässt sich aus dem ausgebildeten Plateau die Radonquellstärke ableiten, da bei einer Plateaubildung der Radoneintritt gleich dem Radonaustritt sein muss. Die Plateaubildung kann sowohl nach einem Radonanstieg durch den angelegten Unterdruck erfolgen als auch nach einem Abfall. Grund für einen vorangegangenen Abfall wären große Undichtigkeiten der Gebäudehülle, durch die vermehrt Außenluft angesogen wird.

Der Radonaustritt lässt sich anhand des Volumenstroms und der dort herrschenden Radonkonzentration ermitteln. Das Plateau ergibt sich bei einem Unterdruck von 50 Pa und liegt bei ca. 75 Bq/m³. Daraus ergibt sich mit einem Volumenstrom von 1665 m³/h eine Quellstärke von ungefähr 125.000 Bq/h bei 50 Pa Unterdruck.

In den Verläufen nach den Sanierungsarbeiten kann man einen Anstieg erkennen. Das Plateau liegt im Keller bei ca. 230 Bq/m³. Die Quellstärke wurde allerdings für das Obergeschoss bestimmt, da in diesem das Differenzdruckgerät stand und dadurch in diesem Raum die Angabe des Volumenstroms zugänglich war.

Die Quellstärke ließ sich in der Messung nach der Sanierung bei zwei unterschiedlichen Druckstufen berechnen, da beide ein Plateau ausbildeten. Es zeigt sich, dass bei größeren Unterdrücken die Quellstärke zunimmt. Zudem zeigt sich, dass auch

nach der Sanierung die Quellstärke größer geworden ist. Als Ursache dafür kann die dichtere Gebäudehülle angenommen werden, durch die der Unterdruck im Gebäude mehr auf die Bodenluft wirken kann, statt Außenluft in das Gebäude zu saugen.

Die Luftwechselrate verringerte sich in dem Gebäude von $n_{50} = 3,7/h$ auf $n_{50} = 2,7/h$ als Folge davon, dass die Gebäudehülle dichter geworden ist. Das Radon wird aus dem Untergrund und Undichtigkeiten im Keller angesogen, da weniger Außenluft durch die Fenster eindringen kann.

Durch den bekannten Volumenstrom während der Unterdruckmessung und die zugehörige Radonkonzentration lässt sich die Radonaustrittsrate für den bestehenden Unterdruck berechnen. Im vorangegangenen Abschnitt wurde dieses Verfahren bereits bei Radonkonzentrationen, die ein Plateau bilden, angewandt. Im Folgenden wird bei jedem Messobjekt auch für alle weiteren Druckstufen die Radonaustrittsrate bestimmt. Durch Extrapolation in negative Richtung bis zu einem Unterdruck von ca. 2,5 Pa kann so die Radonquellstärke unter Normalbedingungen abgeschätzt werden. Durch die fehlende Plateaubildung sowie die große Messunsicherheit ist diese aber mit einer großen Unsicherheit behaftet. Die Radonaustrittsrate bzw. Quellstärke bei Unterdruck sowie die Radon-Quellstärke unter Normalbedingungen sind in Tabelle 32 dargestellt. Durch eine graphische Darstellung der Quellstärke bei Unterdruck in Abbildung 63 kann der Wert der Radonaustrittsrate unter Normalbedingungen, für die im Mittel 2,5 Pa veranschlagt werden, abgeschätzt werden.

Messobjekt 1 vorher	Druckstufe (Unterdruck) (Pa)	Volumenstrom (m^3/h)	Berücksichtigtes Gebäudevolumen (m^3)	Luftwechselrate (1/h)	Radonkonzentration (Bq/m^3)	Radonaustrittsrate bei Unterdruck (Bq/h)	Radonaustrittsrate geschätzt unter Normalbedingungen (Bq/h)
Messobjekt 1 vorher	5	438	420	1,04	20	8.760±6.000	9.000
	10	650	420	1,55	40	26.000±13.800	
	20	980	420	2,33	70	68.600±28.800	
	50	1665	420	3,96	75	124.875±50.700	
Messobjekt 1 nachher	10	470	420	1,12	70	32.900±13.800	30.000
	20	780	420	1,86	130	101.400±32.800	
	50	1150	420	2,74	140	161.000±61.200	

Tabelle 32: Protokollierte und berechnete Werte der Unterdruck-Messung in Messobjekt 1 vor und nach der Sanierung

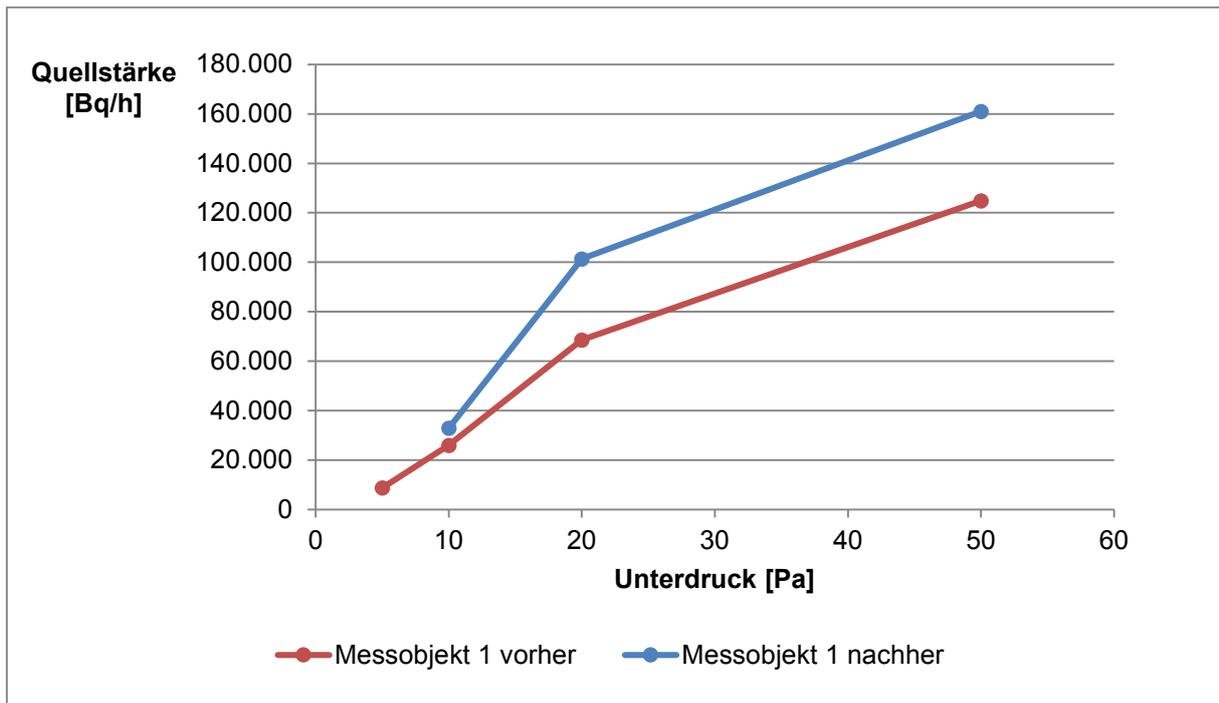


Abbildung 63: Quellstärke vor und nach der Sanierung während einer Unterdruck-Messung in Messobjekt 1

Es zeigt sich, dass die Quellstärke unter Normalbedingungen von 9.000 Bq/h vor der Sanierung auf 30.000 Bq/h nach der Sanierung angestiegen ist.

Messobjekt 2

In Abbildung 64 und Abbildung 65 sowie Tabelle 33 sind die Ergebnisse der Unterdruck-Messung in Messobjekt 2 abgebildet.

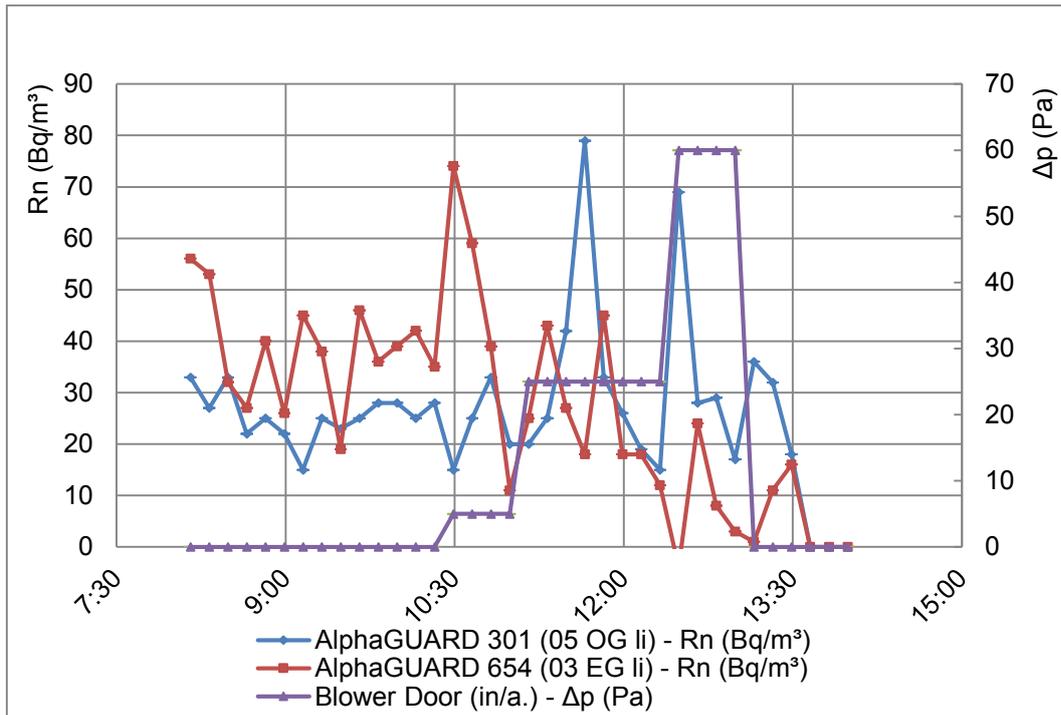


Abbildung 64: Unterdruck-Messung vor der Sanierung in Messobjekt 2

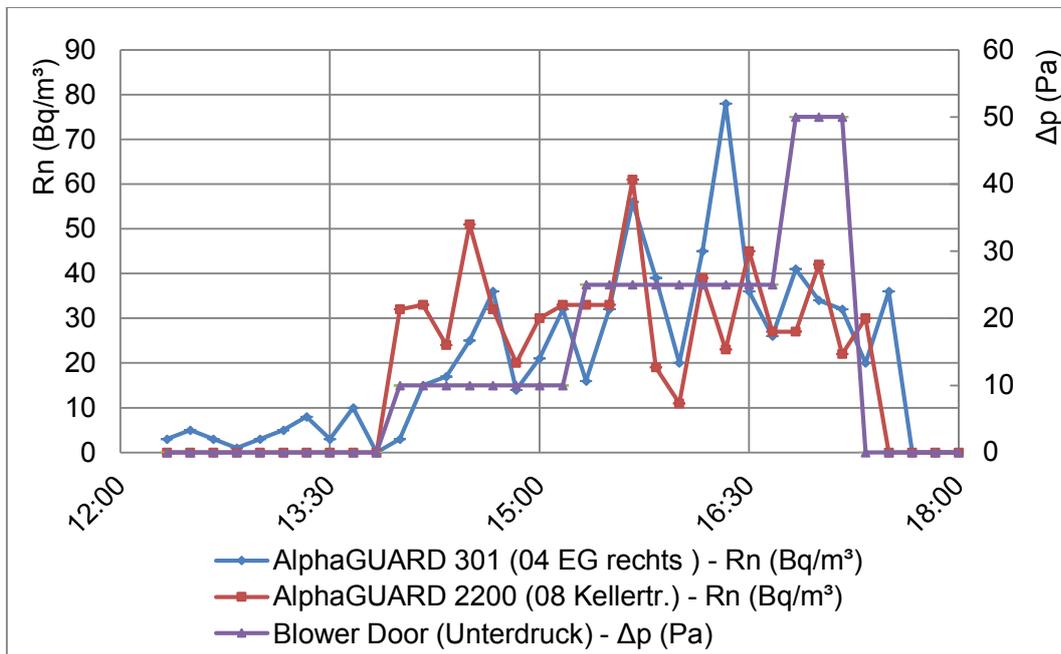


Abbildung 65: Unterdruck-Messung nach der Sanierung in Messobjekt 2

	Druckstufe (Unterdruck) (Pa)	Volumenstrom (m ³ /h)	Berücksichtigtes Gebäudevolumen (m ³)	Luftwechselrate (1/h)	Radonkonzentration (Bq/m ³)	Radonaustrittsrate bei Unterdruck (Bq/h)	Radonaustrittsrate geschätzt unter Normalbedingungen (Bq/h)
Messobjekt 2 vorher	5	1200	422	2,84	40	48.000±25.400	40.000
	25	3200	422	7,58	30	96.000±56.600	
	25, abgedichtete Kellerfenster	2700	422	6,40	20	54.000±37.800	
	60	5600	422	13,27	15	84.000±69.800	
Messobjekt 2 nachher	10	630	1163	0,54	30	18.900±11.200	10.000
	25	1180	1163	1,01	32	37.760±21.500	
	50	1700	1163	1,46	35	59.500±32.800	

Tabelle 33: Protokollierte und berechnete Werte der Unterdruck-Messung in Messobjekt 2 vor und nach der Sanierung

In der Messung vor der Sanierung wurden bei einer Druckstufe von -25 Pa die Fenster im Keller abgedichtet. Diese waren sehr undicht und wurden als Grund für den unterbleibenden Radonanstieg vermutet. Trotz dieser Maßnahme stieg die Radonkonzentration nicht an. Leider ergab sich in Messobjekt 2 vor der Sanierung kein Plateau, aus dem die Quellstärke verlässlich ermittelt werden könnte. Das Gebäude hatte während der gesamten Messphase eher geringes Radonaufkommen. Zudem ergab sich bei der Unterdruck-Messung eine Luftwechselrate von $n_{50} = 5,6$ /h, was ein sehr hoher Wert ist. Dies zeigt, dass die Gebäudehülle so undicht ist, dass mehr Außenluft durch die Undichtigkeiten in der Gebäudehülle eindringt als durch Öffnungen im Keller.

In der Messung nach den Sanierungsarbeiten ist die Radonkonzentration während der Unterdruck-Messung ebenfalls nicht angestiegen. Dennoch kann man im Ansatz eine leichte Plateaubildung erkennen. Dieses liegt bei ungefähr 35 Bq/m³ und ergibt eine Quellstärke von 60.000 Bq/h bei einem Unterdruck von 50 Pa. Der Wert ist deutlich kleiner als der in Messobjekt 1, was als Ursache für die geringe Radonkonzentration in der gesamten Messzeit in Frage kommt.

Aus der Luftdichtheitsmessung ergab sich nach der Sanierung eine Luftwechselrate von $n_{50} = 1,0$ /h. Trotz des nun sehr dichten Gebäudes ist die Radonkonzentration aufgrund des geringen Radonpotentials nicht angestiegen.

Dies zeigt auch die graphische Darstellung der Quellstärke in Abbildung 66.

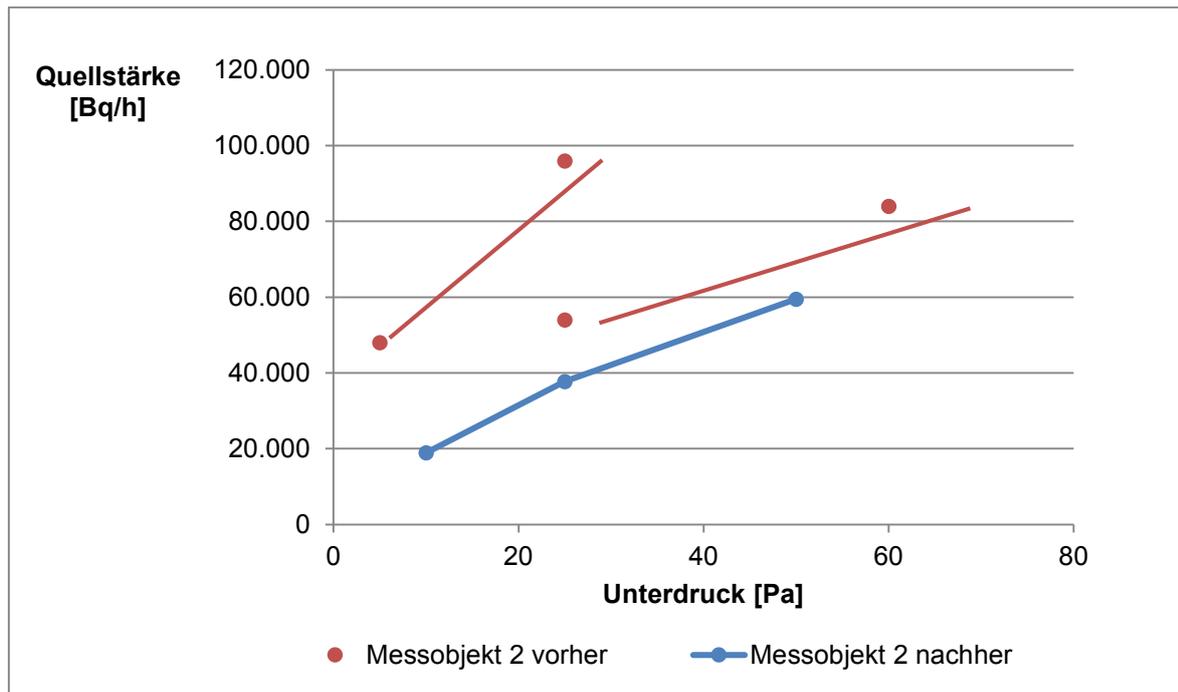


Abbildung 66: Quellstärke vor und nach der Sanierung während einer Unterdruck-Messung in Messobjekt 2

Der unterbrochene Verlauf vor der Sanierung ist ein Resultat der abgedichteten Fenster. Die Vermutung, die Quellstärke durch das Abkleben zu erhöhen bzw. auf gleichem Niveau zu erhalten, hat sich nicht bestätigt. Auch die Sanierungsarbeiten haben keinen erhöhenden Effekt auf die Quellstärke unter Normalbedingungen. Sie sank von 40.000 Bq/h auf 10.000 Bq/h. Dieser Wert ist allerdings lediglich eine grobe Näherung, da sich nicht bei allen Druckstufen ein Plateau gebildet hat.

Messobjekt 3

Die Unterdruck-Messung in Messobjekt 3 wurde am 12.6.13 vor der Renovierung und am 18.3.14 nach der Renovierung durchgeführt. Vor der Renovierung betrug die Luftwechselrate $n_{50}=4,3$. Nach der Renovierung ergab sich für die Luftwechselrate ein Wert von $n_{50}=3,8$. Dieser Wert ist sehr hoch, die gesetzliche Vorgabe gibt für renovierte Altbauten einen n_{50} -Wert von 3,0 /h vor. Die Undichtigkeiten stammen aus dem Dachgeschoss, indem die Dampfsperffolie nicht ausreichend mit der Wand verklebt war.

Abbildung 67 zeigt den Verlauf der Radonkonzentration während der Unterdruck-Messung im Flur des Erdgeschosses sowie in der Waschküche des Untergeschos-

ses inklusive der angelegten Unterdruckstufe vor den Renovierungsmaßnahmen. Es ist erkennbar, dass die Radonkonzentration in der Waschküche auf ein hohes Plateau von 430 Bq/m^3 ansteigt, während die Radonkonzentration im Flur auf ein etwas niedrigeres Niveau von ca. 230 Bq/m^3 ansteigt.

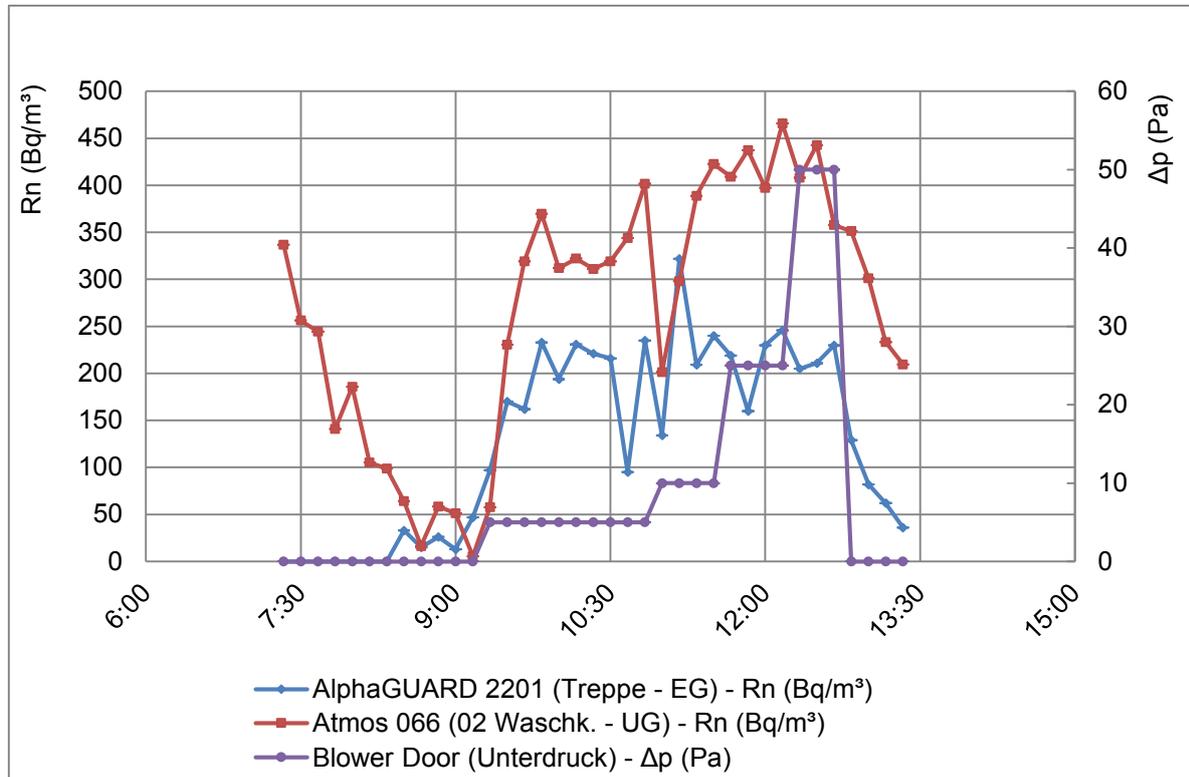


Abbildung 67: Unterdruck-Messung vor der Sanierung in Messobjekt 3

Abbildung 68 zeigt ebenfalls den Verlauf der Radonkonzentration während der Unterdruck-Messung im Flur des Erdgeschosses sowie in der Waschküche des Untergeschosses inklusive der angelegten Unterdruckstufe nach den Renovierungsmaßnahmen. Auch hier ist ein deutlicher Anstieg der Radonkonzentration während des angelegten Unterdrucks erkennbar. In der Waschküche des Untergeschosses steigt die Radonkonzentration auf ein Plateau von ca. 450 Bq/m^3 und im Flur des Erdgeschosses auf ungefähr 270 Bq/m^3 .

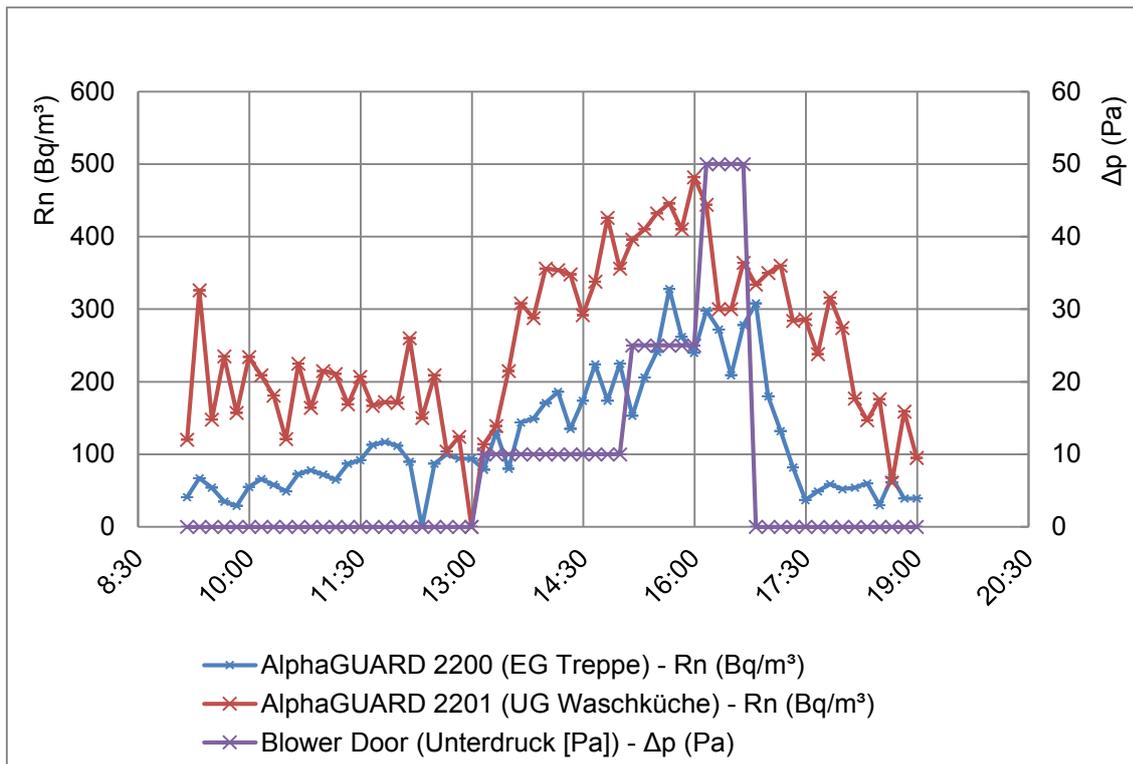


Abbildung 68: Unterdruck-Messung nach der Sanierung in Messobjekt 3

Tabelle 34 zeigt eine Übersicht der protokollierten Werte. Die Radonkonzentration bildet bei einem Unterdruck von 50 Pa ein Plateau von 270 Bq/m³. Daraus ergibt sich eine Quellstärke von 662.000 Bq/h. Dieser Wert ist deutlich höher als in den anderen Messobjekten, was auch die durchschnittlichen Radonkonzentrationen der gesamten Messperioden widerspiegeln.

	Druckstufe (Unterdruck) (Pa)	Volumenstrom (m³/h)	Berücksichtigtes Gebäudevolumen (m³)	Luftwechselrate (1/h)	Radonkonzentration (Bq/m³)	Radonaustrittsrate bei Unterdruck (Bq/h)	Radonaustrittsrate geschätzt unter Normalbedingungen (Bq/h)
Messobjekt 3 vorher	5	800	755	1,06	160	128.000±38.700	130.000
	10	1300	755	1,72	200	260.000±72.600	
	25	2100	755	2,78	230	483.000±128.700	
	50	3300	755	4,37	240	792.000±208.200	
Messobjekt 3 nachher	10	900	750	1,20	180	162.000±47.000	110.000
	25	1620	750	2,16	270	437.400±110.000	
	50	2450	750	3,27	270	661.500±167.000	

Tabelle 34: Protokolierte und berechnete Werte der Unterdruck-Messung in Messobjekt 3 nach der Sanierung

Abbildung 69 zeigt die Quellstärke bei Unterdruck vor und nach der Sanierung. Durch Extrapolation des Verlaufs bis zu einem Unterdruck von ca. 2,5 Pa kann die Quellstärke unter Normalbedingungen abgeschätzt werden. Sie fällt von 130.000 Bq/h vor der Sanierung auf 110.000 Bq/h nach der Sanierung. Ein Grund dafür kann das undichte Dach des Gebäudes nach der Sanierung sein. Dieses hat auf den Luftwechsel ohne Unterdruck weniger Einfluss als wenn ein starker Unterdruck angelegt wird, bei dem die Außenluft auch vom Dachgeschoss in die bewohnten Etagen transportiert wird.

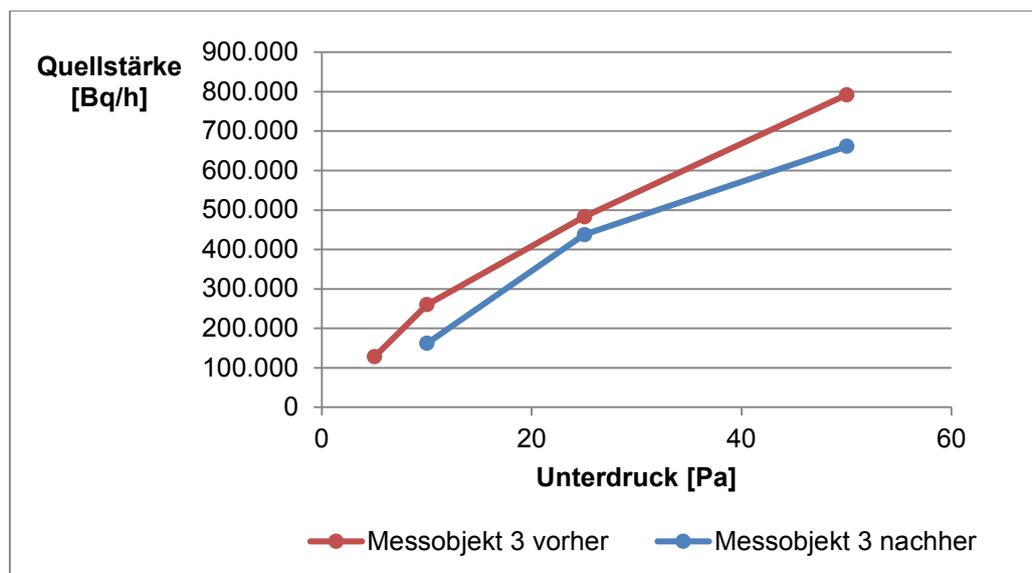


Abbildung 69: Quellstärke vor und nach der Sanierung während einer Unterdruck-Messung in Messobjekt 3

Messobjekt 4

Tabelle 35 sowie Abbildung 70 und Abbildung 71 zeigen die Ergebnisse der Unterdruck-Messungen in Messobjekt 4. Da sich die Renovierungsarbeiten bis zum Messzeitpunkt auf den Keller beschränkten, hat sich die Gebäudedichtheit wenig verändert. Die Unterdruck-Messung ergab vor der Sanierung einen Wert für die Luftwechselrate von 4,5/h. Nach der Sanierung ist dieser unverändert geblieben.

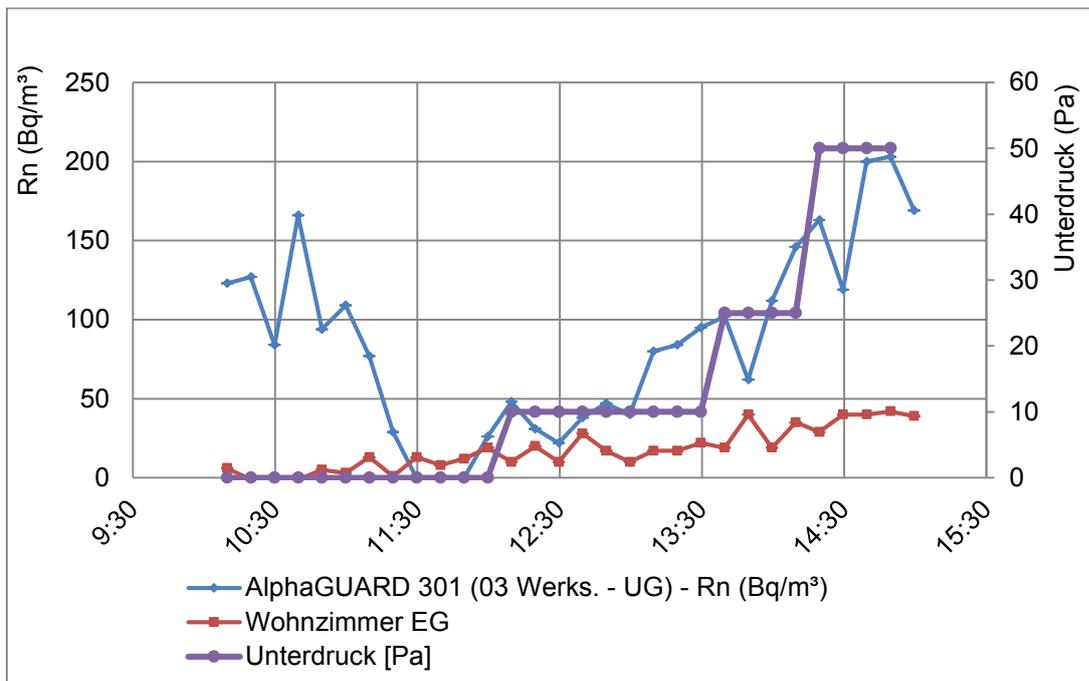


Abbildung 70: Unterdruck-Messung vor der Sanierung in Messobjekt 4

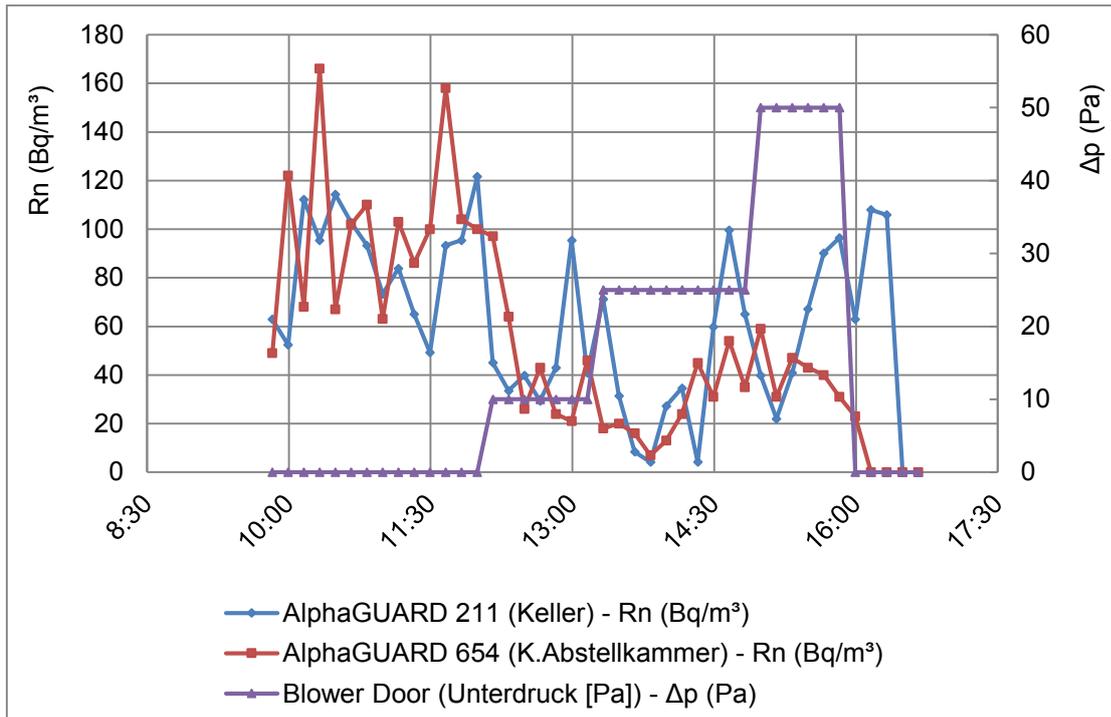


Abbildung 71: Unterdruck-Messung nach der Sanierung in Messobjekt 4

	Druckstufe (Unterdruck) (Pa)	Volumenstrom (m³/h)	Berücksichtigtes Gebäudevolumen (m³)	Luftwechselrate (1/h)	Radonkonzentration (Bq/m³)	Radonaustrittsrate bei Unterdruck (Bq/h)	Radonaustrittsrate geschätzt unter Normalbedingungen (Bq/h)
Messobjekt 4 vorher	10	580	500	1,16	20	11.600±8100	10.000
	25	1500	500	3,00	30	45.000±26.600	
	50	2380	500	4,76	40	95.200±50.500	
Messobjekt 4 nachher	10	950	500	1,90	50	47.500±22.600	15.000
	25	1500	500	3,00	20	30.000±21.000	
	25 nur UG	320	245	1,31	60	19.200±8.500	
	50 nur UG	555	245	2,27	65	36.075±15.500	

Tabelle 35: Protokollierte und berechnete Werte der Unterdruck-Messung in Messobjekt 4 vor und nach der Sanierung

Die Radonkonzentrationen sind während der Unterdruck-Messung vor der Sanierung im Untergeschoss deutlich angestiegen. Eine Plateaubildung ist zu erkennen. Die Radonkonzentration steigt hier von 10 Bq/m³ auf 200 Bq/m³ an. Im Wohnzimmer, in dem das Druckgerät aufgebaut war, steigt die Radonkonzentration deutlich geringer

an. Dennoch wird ein Plateau von ca. 40 Bq/m^3 erreicht. Daraus ergibt sich bei 50 Pa Unterdruck eine Quellstärke von 95.000 Bq/h .

Die Messungen in Messobjekt 4 nach der Sanierung stellten sich als schwierig heraus. Die Mieterin akzeptierte das Druckgerät nicht im Wohnzimmer, in dem es bei der Messperiode vor der Sanierung stand. Stattdessen erlaubte sie lediglich einen Einbau des Druckgerätes im Keller. Dies hat deutlich einschränkende Auswirkungen auf die Messergebnisse. Die radonhaltige Luft wird nun nicht mehr aus dem Keller gesogen und im ganzen Haus verteilt, sondern direkt durch das Druckgerät nach außen geblasen. Eine Aufsummierung des Radons ist dadurch schwer zu erreichen.

Während der Messung stellte sich tatsächlich heraus, dass die Radonkonzentration stark abnimmt. Aus diesem Grund wurde die Kellertür geschlossen und abgedichtet, da der obere Bereich unsaniert ist und dadurch zusätzliche Verdünnungen vermieden werden sollten. Durch diese Maßnahme wurde erreicht, dass die Quellstärke mit zunehmendem Druck anstieg statt abzufallen, wie in Abbildung 31 zu sehen ist.

Eine Plateaubildung war nur im Abstellraum des Kellers zu erahnen, allerdings stand in diesem nicht das Druckgerät, weswegen die Quellstärke nicht verlässlich berechnet werden konnte. In dem Raum des Druckgerätes schwankt die Radonkonzentration zwischen 20 Bq/m^3 und 100 Bq/m^3 .

Aus den genannten Gründen bietet sich die Unterdruck-Messung in dieser Messreihe nicht zur Quellstärkenbestimmung an, zeigt aber, dass die Luftdichtheit des Gebäudes unverändert ist, wodurch auch kein Radonanstieg erwartet wird.

Dennoch wurde die Radonaustrittsrate bei Unterdruck graphisch in Abbildung 72 aufgetragen, um zumindest eine Näherung der Quellstärke unter Normalbedingungen abschätzen zu können.

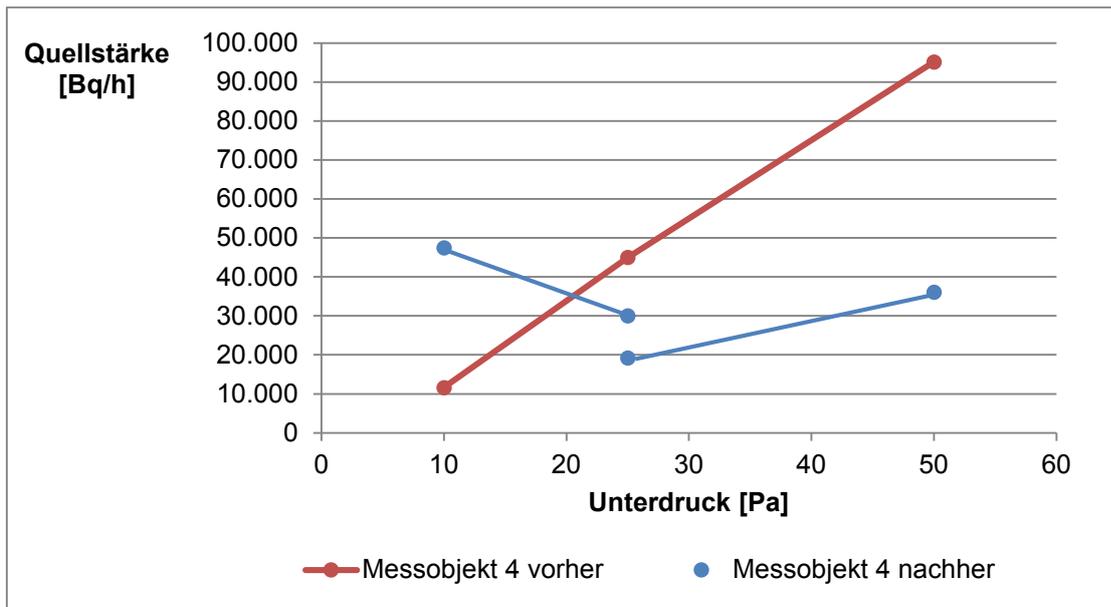


Abbildung 72: Quellstärke vor und nach der Sanierung während einer Unterdruck-Messung in Messobjekt 4

Die Quellstärke wurde vor der Sanierung mit 10.000 Bq/h und nach der Sanierung mit 15.000 Bq/h bestimmt. Aus den genannten Gründen ist dies aber nur ein grober Richtwert.

Messobjekt 5

Die Unterdruck-Messung vor der Renovierung wurde am 4.2.14 durchgeführt. Dabei ergab sich eine Luftwechselrate von $n_{50}=3,7/h$. Nach der Renovierung wurde die Unterdruck-Messung am 21.08.2014 durchgeführt. Für die Luftwechselrate ergab sich dabei ein Wert von $n_{50}=2,4/h$.

Abbildung 73 zeigt den Verlauf der Radonkonzentration im Untergeschoss sowie im Obergeschoss, in dem das Druckgerät eingebaut war. Es zeigt sich, dass ein Radonanstieg lediglich im Keller erfolgt. Dort steigt die Konzentration auf ein Plateau von ca. 200 Bq/m³ an.

Ein Grund dafür, dass der Anstieg nur im Keller erfolgt, ist, dass dieser als Radonquelle fungiert. Dort wird noch das Radon aus dem Erdreich befördert, wogegen in den oberen Stockwerken mehrere Beimischungen der Außenluft durch eine undichte Gebäudehülle zu erwarten sind.

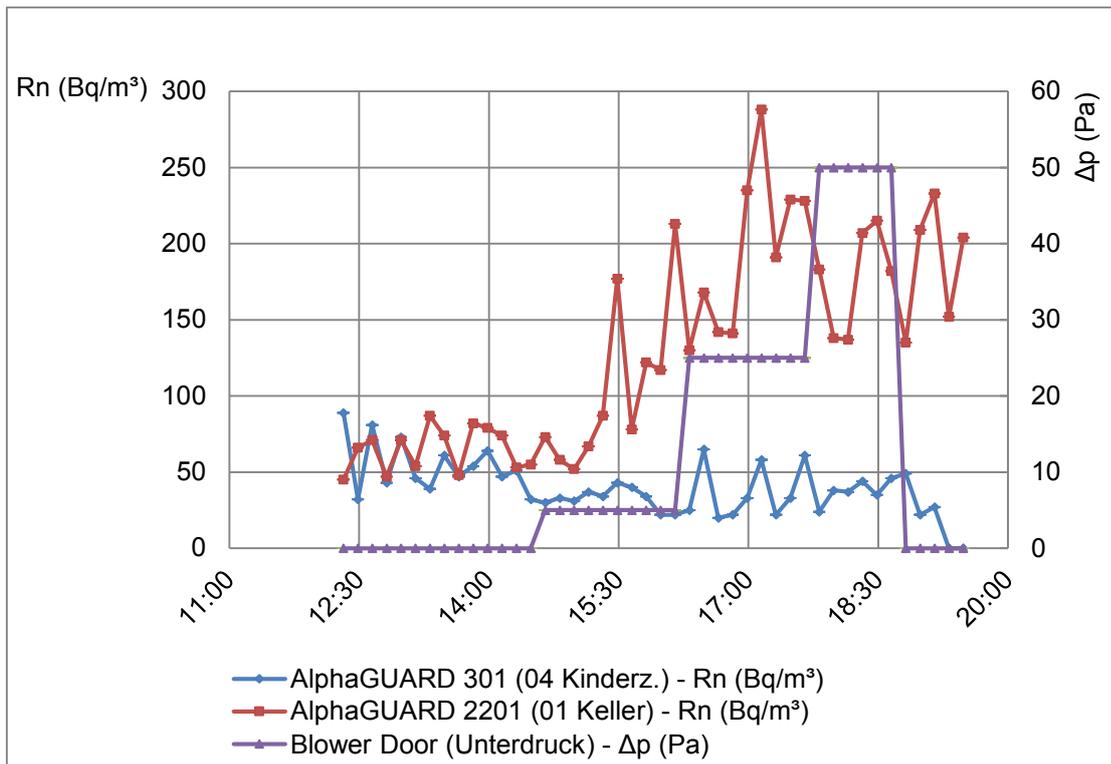


Abbildung 73: Unterdruck-Messung vor der Sanierung in Messobjekt 5

Abbildung 74 zeigt den Radonkonzentrationsanstieg während der Unterdruck-Messung nach der Sanierung. Es bildet sich in mehreren beobachteten Räumen ein Plateau aus. Dargestellt wird nur der Verlauf der Radonkonzentration im Keller sowie im Kinderzimmer des Obergeschosses, in dem das Druckgerät eingebaut war. Im Keller liegt die Radonkonzentration zwar ungefähr bei dem gleichen Wert wie die bei den Unterdruck-Messungen vor der Sanierung, allerdings war der Anfangswert geringer und der Anstieg dadurch stärker.

Im Kinderzimmer ist kein Anstieg zu erkennen. Dennoch bildet sich bei einem Unterdruck von 25 Pa ein Plateau aus.

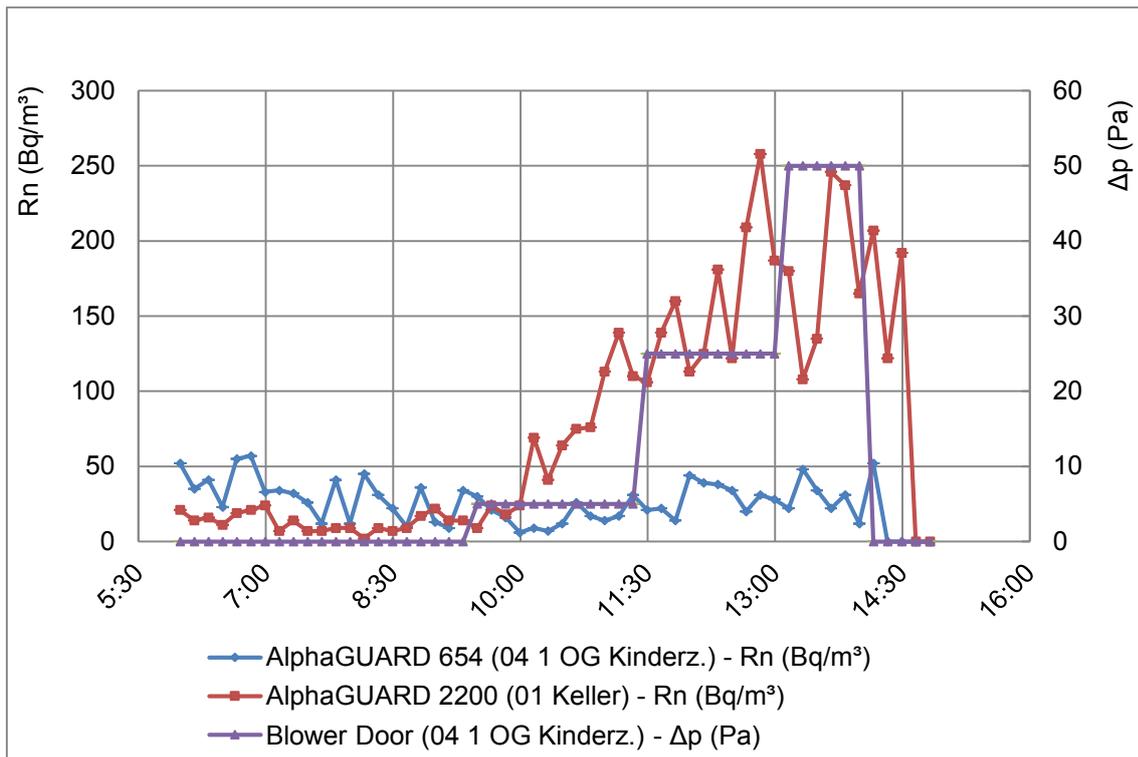


Abbildung 74: Unterdruck-Messung nach der Sanierung in Messobjekt 5

Tabelle 36 zeigt die protokollierten und berechneten Werte aus der Unterdruck-Messung vor und nach der Sanierung von Messobjekt 5.

Das Plateau bei einem Unterdruck von 25 Pa bewirkt eine Quellstärke von 35.000 Bq/h nach der Sanierung. Dies ist ein kleinerer Wert als in den anderen Messobjekten, da diese bei einem Unterdruck von 50 Pa ihr Plateau bilden. Ein geringerer Unterdruck bewirkt eine kleinere Quellstärke.

Messobjekt	Druckstufe (Unterdruck) (Pa)	Volumenstrom (m³/h)	Berücksichtigtes Gebäudevolumen (m³)	Luftwechselrate (1/h)	Radonkonzentration (Bq/m³)	Radonaustrittsrate bei Unterdruck (Bq/h)	Radonaustrittsrate geschätzt unter Normalbedingungen (Bq/h)
Messobjekt 5 vorher	5	350	662	0,53	30	10.500±6.200	10.000
	25	1200	662	1,81	40	48.000±25.400	
	50	1900	662	2,87	36	68.400±37.600	
Messobjekt 5 nachher	5	250	662	0,38	20	5.000±3.500	5.000
	25	870	662	1,31	40	34.800±18.400	
	50	1300	662	1,96	30	39.000±23.000	

Tabelle 36: Protokollierte und berechnete Werte der Unterdruck-Messung in Messobjekt 5 nach der Sanierung

Abbildung 75 zeigt die Quellstärke bzw. Radonaustrittsrate bei Unterdruck auch für die Druckstufen, bei denen sich kein Plateau ausgebildet hat. Durch Extrapolation lässt sich die Quellstärke unter Normalbedingungen daraus abschätzen.

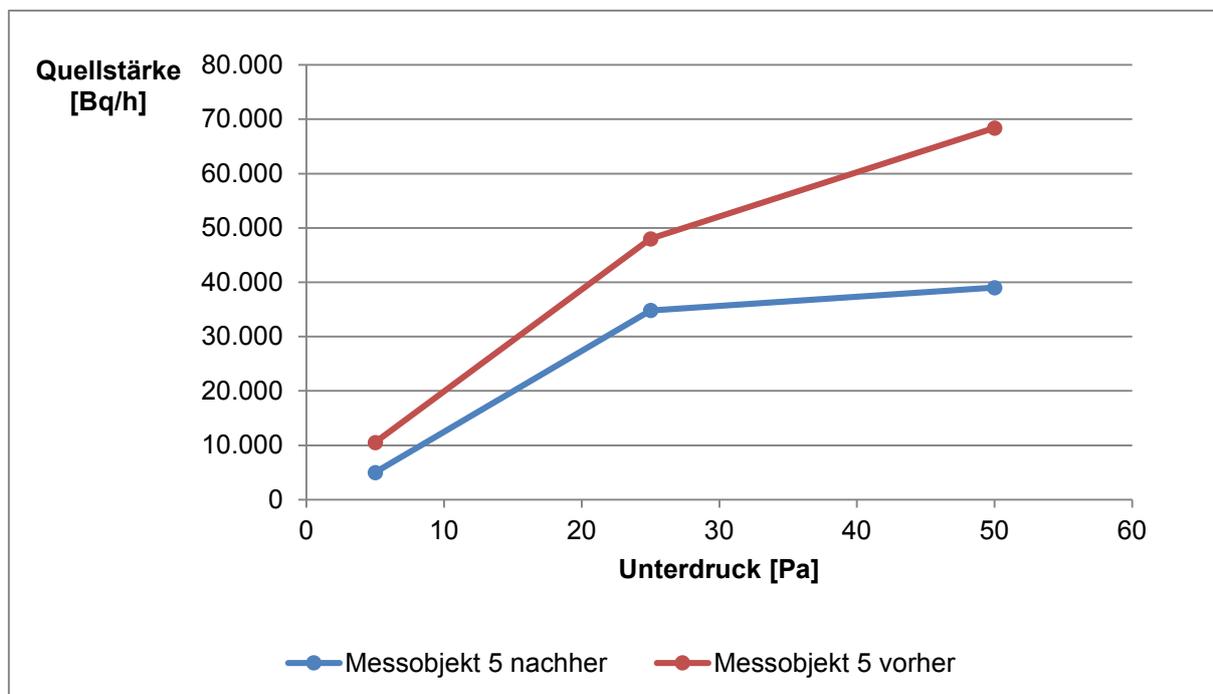


Abbildung 75: Quellstärke vor und nach der Sanierung während einer Unterdruck-Messung in Messobjekt 5

Die abgeschätzte Quellstärke unter Normalbedingungen beträgt vor der Sanierung 10.000 Bq/h und nach der Sanierung 5.000 Bq/h. Inwieweit die sehr unterschiedlichen Außentemperaturen einen Einfluss darauf ausüben muss in weiteren Projekten geklärt werden. Auffallend ist auch, dass nach der Sanierung des Gebäudes die Quellstärke bei einem Unterdruck von ca. 30 Pa eine Sättigung erreicht und trotz Druckerhöhung nicht weiter ansteigt. Hier kann es sein, dass der Druck so groß ist, dass nun wieder mehr Luft von außen angesogen wird oder die Quellstärke aufgrund der geologischen Gegebenheiten nicht weiter ansteigen kann.

Lineares Modell

Eine weiterführende Untersuchung mittels eines linearen Regressionsmodells ist exemplarisch für den Verlauf der Radonkonzentration im Wohnzimmer des Messobjekts 1 erstellt worden. Die Daten beziehen sich auf die Messung nach der energetischen Sanierung. Für die Modellierung wurde auf die Statistiksoftware R zurückgegriffen.

Auf die detaillierte Modellbildung kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Außerdem sind die Ergebnisse noch nicht belastbar, da die Überprüfung des Modells hinsichtlich der allgemeinen Anforderungen an die Modellbildung noch aussteht. Es ist an dieser Stelle lediglich als ein Ausblick und kurzer Einblick in eine weitere Analysemethoden zu betrachten.

Die Modellformel, Koeffizienten und Signifikanzen sind Tabelle 37 zu entnehmen.

```
Call:
lm(formula = log(AG950_Rn_ts_an_0) ~ log(AG950_Rn_ts_an_1) +
    log(AG950_Rn_ts_an_2) + log(AG950_Rn_ts_an_3) + log(AG950_Rn_ts_an_4) +
    log(AG950_Rn_ts_an_5) + log(AG950_Rn_ts_an_6) + log(AG950_Rn_ts_an_7) +
    dfrel_AG950_ts_an_0 + dp_AG950_ts_an_5 + dt_AG950_ts_an_6)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.12210 -0.30647  0.06741  0.42219  2.19639

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      -2.401899   0.486057  -4.942 7.98e-07 ***
log(AG950_Rn_ts_an_1)  0.200823   0.013344  15.049 < 2e-16 ***
log(AG950_Rn_ts_an_2)  0.226337   0.013584  16.662 < 2e-16 ***
log(AG950_Rn_ts_an_3)  0.150953   0.013891  10.867 < 2e-16 ***
log(AG950_Rn_ts_an_4)  0.119641   0.013952   8.575 < 2e-16 ***
log(AG950_Rn_ts_an_5)  0.080656   0.013911   5.798 7.09e-09 ***
log(AG950_Rn_ts_an_6)  0.070920   0.013647   5.197 2.10e-07 ***
log(AG950_Rn_ts_an_7)  0.097093   0.013435   7.227 5.60e-13 ***
dfrel_AG950_ts_an_0   -0.009493   0.001356  -6.998 2.89e-12 ***
dp_AG950_ts_an_5     -0.146475   0.028275  -5.180 2.29e-07 ***
dt_AG950_ts_an_6     -0.041768   0.004877  -8.564 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.7189 on 5551 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.736,    Adjusted R-squared:  0.7356
F-statistic: 1548 on 10 and 5551 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Tabelle 37: Ausgabe lineares Modell

Das Modell setzt sich zusammen aus der zu erklärenden Variablen, der Radonkonzentration (*_Rn_*) und den Regressoren Temperaturdifferenz (dt_*), Differenz der relativen Luftfeuchte (dfrel_*), der Druckdifferenz (dp_*) und zeitverschobenen Radonkonzentrationen. Mithilfe der Regressoren wurde versucht den Radonverlauf zu erklären. Es handelt sich bei den klimatischen Regressoren jeweils um die Differenz der Werte der Messung im Gebäude und der Umgebung.

Mit dem Modell wird gezeigt, dass die Radonkonzentration eine zeitliche retrograde Abhängigkeit aufweist. Dies wird verdeutlicht durch die ersten sieben Parameter des Modells. Der suffix „ts_an_i“ gibt die negative Verschiebung der Zeitreihe um $i \cdot 10 \text{min}$ an. Ursache für diese Abhängigkeit ist möglicherweise die Radonquelle, die bedingt durch äußere Einflüsse eine nicht konstante Stärke zeigt.

Weiterhin sind signifikante Einflüsse der Differenzen von Luftfeuchte (dfrel_*), Druck (dp_*) und Temperatur (dt_*) erkennbar. Hier ist nicht klar zu unterscheiden, ob die Radonquelle oder das Verhalten der Bewohner des Gebäudes durch diese Faktoren beeinflusst werden. Leider hat der Parameter für die CO_2 -Konzentration keinen signifikanten Beitrag für das Modell geliefert. Somit ist es vorerst nicht möglich, hier einen Zusammenhang zu erkennen.

Über das Ausmaß des Einflusses der einzelnen Modellparameter kann zu diesem Zeitpunkt keine Aussage gemacht werden und bedarf weiterer Analyse. Der graphische Verlauf ist in Abbildung 76 dargestellt, zeigt aber noch deutliche Abbildungsschwächen im Bereich der Maximalwerte.

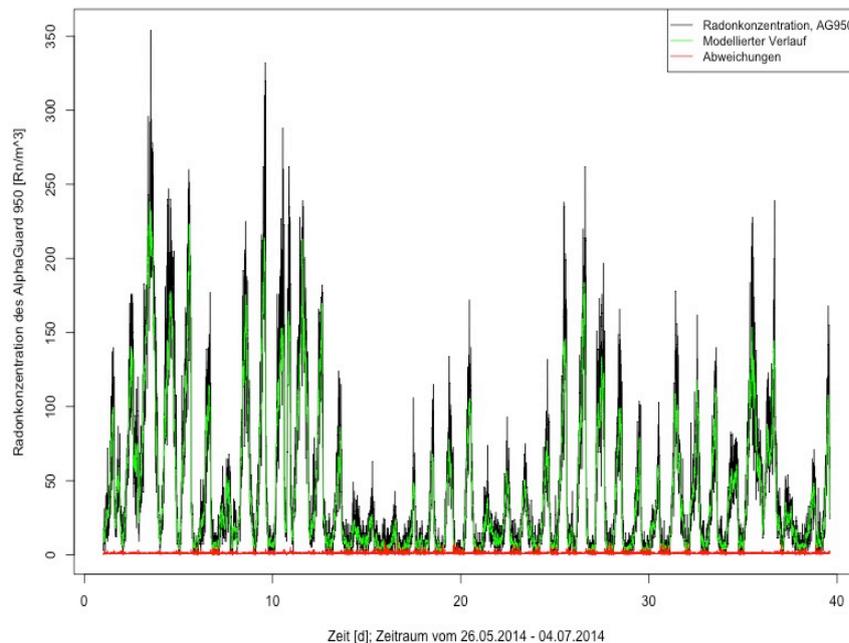


Abbildung 76: Verlauf der Modellkurve im Vergleich zur gemessenen Kurve

Fazit und abschließende Betrachtung

Insgesamt kann die Aussage, eine energetische Sanierung erhöhe die Radonkonzentration in Innenräumen, nicht pauschal getroffen werden. Der Einfluss des Verhaltens der Bewohner überlagert sich zu dem Einfluss der baulichen Veränderungen. Bei geringen Radonkonzentrationen ist regelmäßiges Lüften ausreichend, um eine Erhöhung der Radonkonzentration in Wohnräumen zu vermeiden.

Im Rahmen des Projekts wurde die Quellstärke als kennzeichnender Parameter, der das Radonpotential eines Hauses unabhängig von den Nutzern wiedergeben kann, identifiziert. Ziel des Projekts war nicht die Evaluation eines Zeit- und Kostengünstigen Verfahrens zur Bestimmung der Quellstärke. Eine Verifizierung der Methoden, im Hinblick auf die Unsicherheit des Ergebnisses, die praktische Anwendbarkeit, Kosten und zeitlichem Aufwand ist sinnvoll. Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Methoden zur Bestimmung der Luftwechselrate sowie der Radonquellstärke angewendet. Diese ergaben zum Teil gute Übereinstimmungen. Abweichungen waren aufgrund der unterschiedlichen Herangehensweisen deutlich. Mit der Bestimmung der Radonquellstärke kann eine Nutzerunabhängige Methode entwickelt werden, die Radonsituation in Wohnräumen zu bestimmen. Allerdings fehlen die Verfahren für eine genaue Bestimmung der Quellstärke.

Im Rahmen eines in der Entwicklung stehenden Modells kann es möglich sein, die Parameter der Radonausbreitung zu bestimmen und im Folgenden anhand der äußeren Einflussparameter den Radonkonzentrationsverlauf berechnen zu können. In diesem Rahmen wären Simulationen möglich, mit denen möglicherweise die Radonkonzentrationen nach potentiellen Veränderungen im Vorfeld bestimmt werden könnten. Ein erstes grobes Modell, abhängig von Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und Raumnutzern, zeigt bereits gute Ergebnisse zur Nachbildung der Radonkonzentration. Dieses sollte weiter verifiziert werden, um insbesondere den Einfluss der Raumnutzer besser zuordnen zu können.

Zusammenfassung

Zur Untersuchung des Einflusses baulicher Energiesparmaßnahmen auf die Radonkonzentration in Innenräumen wurde der zeitliche Verlauf der Radonkonzentration vor und nach der energetischen Sanierung in fünf Messobjekten aufgenommen. Auch meteorologische und raumklimatische Parameter, wie Temperatur, Druck und CO₂-Konzentration, wurden erfasst.

Ein Vergleich der Zeitreihen vor und nach der Sanierung zeigt sehr unterschiedliche Ergebnisse, die von der Art des Hauses, den Sanierungsmaßnahmen, dem Verhalten der Bewohner sowie dem Radon im Untergrund abhängig sind.

In Messobjekt 1 hat sich trotz eines Austauschs der Fenster und der damit verbundenen dichten Gebäudehülle die mittlere Radonkonzentration nicht signifikant erhöht. Die Berechnung der Quellstärke zeigte dennoch eine deutliche Erhöhung. Durch die regelmäßige Lüftung des Gebäudes kann ein Anstieg der mittleren Radonkonzentration vermieden werden.

Auch in Messobjekt 2 hat sich trotz der deutlich dichter gewordenen Gebäudehülle keine höhere Radonkonzentration ergeben. Hier zeigten sich nach der Sanierung des Objekts große Amplituden der Radonkonzentration in einem schlecht belüfteten Raum. Insgesamt verschlechterte sich die Radonsituation nicht, da das Radonpotential im Untergrund gering ist und die meisten Räume regelmäßig gelüftet werden.

Für Messobjekt 3 lässt sich sagen, dass die Radonkonzentration in den sanierten Gebäudeabschnitten signifikant angestiegen ist. Die Konzentrationserhöhung bezieht sich nicht auf den unsanierten Teil des Gebäudes. Ein negativer Einfluss der energetischen Sanierungsmaßnahmen auf die Radonkonzentration in Innenräumen ist hier feststellbar. Die Berechnung der Quellstärke zeigte keinen negativen Effekt der energetischen Sanierung.

Messobjekt 4 wurde in sehr geringem Maße renoviert. Es ergab sich keine Verringerung der Luftwechselrate. Auch die Radonkonzentration hat sich im Vergleich zu vorher nicht verändert.

In Messobjekt 5 lassen sich die Mittelwerte der Radonkonzentration nicht vergleichen, da ein Messintervall im Sommer und das andere im Winter durchgeführt werden musste.

Es zeigt sich, dass lediglich bei 3 Messobjekten ein Anstieg der Radonkonzentration plausibel zu erwarten wäre. Nur bei einem dieser drei Objekte ist der Anstieg tatsächlich nachweisbar. Dieses Objekt zeichnet sich dadurch aus, dass die dortige Radonkonzentration bereits vor der Sanierung höher war als bei den anderen Messobjekten. Es besteht also mehr Radonpotenzial als in den anderen Gebäuden. Dies bestätigt auch die Berechnung der Quellstärke. Zusätzlich sind an dem Messobjekt mehre-

re energetische Sanierungsmaßnahmen durchgeführt worden, unter anderem wurde eine neue Fassadendämmung angebracht sowie neue Fenster eingebaut.

Die Abhängigkeiten von Radon zu den Wettereinflüssen sind sehr unterschiedlich. Es wurden für Temperatur und Luftdruck sowohl positive als auch negative Korrelationen gefunden, abhängig von der Jahreszeit. Die Korrelation des Absolutdrucks zum Radon ist größer als die der Druckdifferenz. Die Einflüsse sind sehr träge, das heißt, sie müssen bis zu einem Tag wirken, ehe der Einfluss sichtbar wird. Dies ist besonders beim Einfluss des Windes ersichtlich. Bei hohen Radonkonzentrationen sind Korrelationen besser ersichtlich.

Die Sanierung der Gebäude zeigte ebenfalls, dass die Wettereinflüsse bei einem dichteren Gebäude mehr Relevanz haben. Drücke können sich dadurch besser aufbauen, die Räume wirken mehr untereinander als mit der Außenluft.

In jedem Messobjekt wurden sowohl vor als auch nach der Sanierung des Hauses Unterdruck-Messungen durchgeführt. Diese eignen sich nicht nur zur Bestimmung der Luftdichtheit, sondern in gewissem Umfang auch zur Bestimmung der Quellstärke. Die Bestimmung der Quellstärke zeigte, dass eine Nutzerunabhängige Beurteilung der Radonsituation möglich ist. Grundlage dafür muss eine Plateaubildung sein, für die lange Messzeiten eingehalten werden müssen. Im Rahmen des Projekts waren lange Messzeiten nicht immer möglich, da dies für die Bewohner nicht zumutbar gewesen wäre. Dennoch wurde das Plateau bei verschiedenen Druckstufen erreicht. Daraus lässt sich durch Extrapolation die Radonquellstärke unter Normalbedingungen ermitteln. Die Bestimmung der Quellstärke vereinfacht sich bei großem Radonpotenzial. Es zeigte sich, dass die Quellstärke in Häusern mit einer hohen mittleren Radonkonzentration größer ist.

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der Quellstärke wurde angewendet. Dabei wurde die Luftwechselrate aus dem CO₂-Abfall ermittelt, und mit dem zeitgleichen Radonanstieg die Radonquellstärke berechnet. Ein Nachteil des Verfahrens liegt in den geringen CO₂-Konzentrationen, insbesondere im Keller. Auch der Anstieg der Radonkonzentration war meist gering und ließe sich im Keller deutlich besser bestimmen. Mit dem Verfahren lässt sich die Quellstärke nicht für das gesamte Haus, sondern nur für den jeweils betrachteten Raum bestimmen.

Ein erstes mathematisches Modell kann bei einer Weiterentwicklung die zeitliche Entwicklung der Radonkonzentration anhand der Einflussparameter nachbilden. Die ersten Versuche waren bereits vielversprechend, sollten aber weiterentwickelt werden.

Quellenangabe

- ¹ Strahlenthemen; Bundesamt für Strahlenschutz; http://www.bfs.de/bfs/druck/strahlenthemen/STTH_Radon.pdf; Stand: 27.6.2012
- ² Lungenkrebsrisiko durch Radonexpositionen in Wohnungen; Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, Verabschiedet in der 199. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 21./22. April 2005
- ³ M. Janssen: *Modeling ventilation and radon in new Dutch dwellings*; National Institute of Public Health and the Environment; 2002
- ⁴ E. Hermann: *CO² als Leitparameter für eine gute Luftqualität in Schulen, auch im Hinblick auf Radon*, 4. Sächsischer Radontag, Herausgeber KORA e.V., September 2010
- ⁵ E. Paul: *Wie wirken sich verschiedene Lüftungstechniken auf die Radonbelastung aus?* 4.Sächsischer Radontag, Herausgeber KORA e.V., September 2010
- ⁶ Bergmann, Frank: *Untersuchungen zur Radonsituation in Passivhäusern*; Diplomarbeit HTW Dresden, 2006
- ⁷ R. Schmidt: *Raumluftqualität durch konsequente Lüftungstechnik*, Tagungsband zur Radonschutzkonferenz 25. Und 26. Juni in Bad Schlema
- ⁸ Flesch, Hermann, Jobski, Leißring, Löbner, Schulz: *Neue Aspekte der Radonmessung in Gebäuden*; 2.Sächsischer Radontag, Herausgeber KORA e.V., September 2008
- ⁹ Schulz, H.: *Aktueller Kenntnisstand zu Radon in Gebäuden*; Tagungsband 1. Sächsischer Radontag, Dresden 2007
- ¹⁰ Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. E. Panzhauser: *Lüftung und Wohnqualität*, http://www.fgw.at/publikationen/pdf/03/2003-1_Panzhauser.pdf
- ¹¹ F.Marley: *Investigation of atmospheric, mechanical and other pressure effects influencing the levels of radon and radon progeny in buildings*; Health Physics, 1999
- ¹² W. Nazaroff; S. Doyle: *Radon entry into houses having a crawl space*. Health Physics; 1985
- ¹³ J. Conrady, K. Turek, A. Guhr, P. Žárský: *Der Einfluss meteorologischer Parameter auf die Radonkonzentration der Bodenluft*; 4. Sächsischer Radontag, Herausgeber KORA e.V., September 2010
- ¹⁴ E. Paul: *Wie wirken sich verschiedene Lüftungstechniken auf die Radonbelastung aus?* 4.Sächsischer Radontag, Herausgeber KORA e.V., September 2010
- ¹⁵ R. Stephen: *Positive Pressurisation: aBRE guide to Radon remedial measures in existing dwellings*. Building research Establishment, 119 (BRE Report; 281)
- ¹⁶ M. Luigi: *Radongegenmaßnahmen in Südtirol /Italien*; 4.Sächsischer Radontag, Herausgeber KORA e.V., September 2010
- ¹⁷ G. Keller, M. Schütz: *Lokale Radonmessungen im Rahmen einer Risikostudie*; Uni Saarland
- ¹⁸ B. Hofmann: *Radon in Baumaterialien*; 2. Sächsischer Radontag; Herausgeber KORA e.V., September 2008
- ¹⁹ B. Leißring: *Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien und Böden; Ursache und Ausbreitung*; 1. Tagung Radonsicheres Bauen; Herausgeber KORA e.V., September 2005
- ²⁰ P. Schewe: *Herausforderungen der geplanten EURATOM-Direktive an Baumeister, Architekten und Ingenieure*; Tagungsband zur Radonschutzkonferenz 25. und 26. Juni 2012 Bad Schlema
- ²¹ G. Akerblom, P. Andersson, B. Clavensjöt: *Soil Gas Radon- A source for Indoor Radon daughters, Radiat Prot Dosimetry (1984)*
- ²² J. Kemski, R. Klingel: *Das geogene Radon-Potential in: Siehl, A. (Hrsg.): Umweltradioaktivität.- 179-222, Ernst & Sohn*
- ²³ M. Heidler, S. Körner: *Die Auswirkung energetischer Sanierungen auf die Radonkonzentration in öffentlichen Gebäuden in Bayern*; 5. Sächsischer Radontag; September 2011
- ²⁴ J. Conrady, A. Guhr, B. Leissring: *Veränderung der Radonkonzentration in Gebäuden im Ergebnis von Bau- und Sanierungsmaßnahmen – Fallbeispiele*, 2. Tagung Radonsicheres Bauen; Herausgeber KORA e.V., September 2006
- ²⁵ *Lüftung im Wohngebäude; Wissenswertes über den Luftwechsel und moderne Lüftungsmethoden*, Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
- ²⁶ M. Heidler, S. Körner: *Die Auswirkung energetischer Sanierungen auf die Radonkonzentration in öffentlichen Gebäuden*, 5. Sächsischer Radontag, Herausgeber KORA e.V., September 2011
- ²⁷ J. Conrady, A. Guhr, B. Leissring: *Veränderung der Radonkonzentration in Gebäuden im Ergebnis von Bau- und Sanierungsmaßnahmen – Fallbeispiele*, 2. Tagung Radonsicheres Bauen; Herausgeber KORA e.V., September 2006

-
- ²⁸ J. Conrady, A. Guhr: *Die Prognose der Radonkonzentration in Gebäuden bzw. ihrer Veränderung ist ein komplexes Optimierungsproblem*; 1. Sächsischer Radontag, 3. Tagung Radonsicheres Bauen, Herausgeber KORA e.V., 2007
- ²⁹ J. Conrady, A. Guhr, B. Leissring: *Veränderung der Radonkonzentration in Gebäuden im Ergebnis von Bau- und Sanierungsmaßnahmen – Fallbeispiele*, 2. Tagung Radonsicheres Bauen; Herausgeber KORA e.V., September 2006
- ³⁰ J. Gräser, C. Grimm, H. Kaineder, S. Körner, M. Loch: *Radon-Einfluss der energetischen Sanierung*; Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- ³¹ M. Heidler, S. Körner: *Die Auswirkung energetischer Sanierungen auf die Radonkonzentration in öffentlichen Gebäuden in Bayern*; 5. Sächsischer Radontag; Herausgeber KORA e.V., September 2011
- ³² J. Conrady, A. Guhr: *Die Prognose der Radonkonzentration in Gebäuden bzw. ihrer Veränderung ist ein komplexes Optimierungsproblem*; 1. Sächsischer Radontag, 3. Tagung Radonsicheres Bauen, Herausgeber KORA e.V., 2007
- ³³ J. Conrady, A. Guhr, B. Leissring: *Veränderung der Radonkonzentration in Gebäuden im Ergebnis von Bau- und Sanierungsmaßnahmen – Fallbeispiele*, 2. Tagung Radonsicheres Bauen; Herausgeber KORA e.V., September 2006
- ³⁴ WHO Handbook on Indoor Radon- A Public health perspective; WHO 2009
- ³⁵ Olaf Sarenio: *Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten*; Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission Band 47; Urban & Fischer
- ³⁶ W. Löbner: *Luftaustausch in Gebäuden- Bestimmung der Luftwechselrate in Räumen*; 2. Tagung Radonsicheres Bauen, Herausgeber KORA e.V., September 2006
- ³⁷ Olaf Sarenio: *Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten*; Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission Band 47; Urban & Fischer
- ³⁸ Olaf Sarenio: *Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten*; Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission Band 47; Urban & Fischer
- ³⁹ Olaf Sarenio: *Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten*; Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission Band 47; Urban & Fischer
- ⁴⁰ Prof. Dr. H. Friedmann: *Das österreichische nationale Radonprojekt – ÖNRAP*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und Bundesministerium für Gesundheit, Familie und Jugend; <http://www.bmg.gv.at/cms/home/attachments/0/5/4/CH1238/CMS1253800995913/oenrapprojekttendbericht.pdf>
- ⁴¹ Schrift 08 der Energiesparinformationen, Hess. Ministerium f. Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
- ⁴² Schrift 02 der Energiesparinformationen, Hess. Ministerium f. Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
- ⁴³ T. Königstein: *Ratgeber energiesparendes Bauen*, Fraunhofer IRB Verlag 2009
- ⁴⁴ Schrift 01 der Energiesparinformationen, Hess. Ministerium f. Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
- ⁴⁵ You, Y., Bai, Z., Jia, C., Wan, Z., Ran, W., Zhang, J., *Measuring Air Exchanges Rates Using Continuous CO2 Sensors*, Clima 2007 WellBeing Indoor Congress, Helsinki, 2007, abrufbar im Internet: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB6974.pdf> (22.05.2013)
- ⁴⁶ Rößler, F. A., *Entwicklung eines effizienten Messverfahrens zur Bestimmung der Radonkonzentration als Indikator für die Qualität der Innenraumluft*, Masterarbeit am Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen, 2013
- ⁴⁷ Azzam Jai, T., *Systemtheoretischer Ansatz für ein Rekonstruktionsverfahren zur Ermittlung von Luftwechselraten aus Radonmessdaten*, Masterarbeit am Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen, 2012
- ⁴⁸ Rößler, F. A., *Entwicklung eines effizienten Messverfahrens zur Bestimmung der Radonkonzentration als Indikator für die Qualität der Innenraumluft*, Masterarbeit am Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen, 2013
- ⁴⁹ Azzam Jai, T., *Systemtheoretischer Ansatz für ein Rekonstruktionsverfahren zur Ermittlung von Luftwechselraten aus Radonmessdaten*, Masterarbeit am Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen, 2012

Anhang

Anhang 1: Zuordnung der Messobjekte

In dieser Version ist die Zuordnung der Messobjekte mit der jeweiligen Adresse aus Datenschutzgründen nicht enthalten.

Anhang 2: Glossar

Abgasverlust:

Die Differenz zwischen dem Wärmeinhalt des Abgases und dem Wärmeinhalt der Verbrennungsluft bezogen auf den Heizwert des Brennstoffes.

Behaglichkeit

Das menschliche Wohlbefinden in Abhängigkeit von Wärme. Dabei muss sichergestellt sein, dass keine starken Luftströmungen oder kalte Oberflächen auftreten. Letztere führen aufgrund fehlender Strahlungswärme zu einem subjektivem Kältegefühl. Dagegen können Oberflächen mit vergleichsweise geringer Erwärmung aufgrund der davon ausgehenden Wärmestrahlung zu einer größeren Behaglichkeit führen (Fußboden- oder Wandheizung, Kellerdeckendämmung).

Dampfbremse:

Eine Barriere, die ein Eindringen von Raumluft in den eingebauten Dämmstoff verhindert, wo es zum Abkühlen der Luft und zum Niederschlagen von Kondenswasser kommen könnte. Im Gegensatz zur Dampfsperre ist eine geringe Diffusion möglich.

Dampfsperre:

Dichte Barriere zwischen Raumluft und Dämmstoff.

Diffusionswiderstandsfaktor μ :

Materialkonstante, die angibt, wie gut Wasserdampf durch ein bestimmtes Material diffundiert.

Drucktest:

Verfahren zur Überprüfung der Luftdichtheit eines Gebäudes. Mit einem Ventilator, der in einen Tür- oder Fensterrahmen eingesetzt wird, wird eine definierte Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenluft aufgebaut. Mögliche Leckagen in der Gebäudehülle können mit Rauchröhrchen oder durch Messung der Luftgeschwindigkeit lokalisiert werden. Ferner lässt sich über die durchgesetzte Luftmenge der druckdifferenzabhängige Luftwechsel ermitteln, der ein Maß für die Luftdichtheit des Gebäudes darstellt.

Endenergiebedarf:

Die für die gesamte Anlagentechnik (Heizung, Lüftung, Warmwasserbereitung, Anlagenverluste) eines Gebäudes benötigte Energiemenge.

Kaltdach:

Eine zweischalige, belüftete Dachkonstruktion. Raumseitig verhindert eine Dampfbremse das Eindringen von Raumluft in den Dämmstoff, oberhalb des Dämmstoffs

und unterhalb der Dacheindeckung kann Luft zirkulieren, um möglicherweise eingetretene Feuchtigkeit und sommerliche Hitze abzuführen.

Lee:

Die vom Wind abgewandte Seite.

Luv:

Die dem Wind zugewandte Seite.

Luftdichtigkeit:

Maß für die Dichtheit der Gebäudehülle gegenüber Luftströmungen. Im Regelfall über die Luftwechselrate angegeben. Die Luftdichtigkeitsschicht befindet sich auf der raumzugewandten Seite der Gebäudehülle (z.B. Dampfsperre o.ä.) und verhindert das Eindringen von Raumluft in die Dämmung.

Luftwechselrate:

Maß für die in einem Raum / Gebäude pro Zeiteinheit durchgesetzte Luftmenge, i.d.R. angegeben als Anzahl des stündlichen kompletten Volumenaustauschs. Die Luftwechselrate hängt stark vom Differenzdruck zwischen Innen- und Außenluft ab.

Nutzenergie:

Energiemenge zur Beheizung eines Gebäudes und zur Warmwasserbereitung. Sie ergibt sich aus der Summe von Transmissionswärmeverlusten, Lüftungswärmeverlusten und Warmwasserbedarf abzüglich der nutzbaren solaren und inneren Wärmegevinne und des Trinkwasserbedarfs.

Spezifische Wärmeleitfähigkeit λ :

Die spezifische Wärmeleitfähigkeit ist eine Materialkonstante, die angibt, wie gut ein Material bei einer vorgegebenen Temperaturdifferenz Wärmeenergie ableitet.

S_d-Wert:

Widerstand, den ein Bauteil einem Dampfstrom entgegensetzt. Er wird als „diffusionsäquivalente Luftschichtdicke“ in Metern angegeben, also der Dicke einer Luftschicht, die den gleichen Widerstand darstellen würde. Ermittelt wird der S_d-Wert, indem die Schichtdicke mit dem Diffusionswiderstandsfaktor μ multipliziert wird. Bei der Auslegung mehrschichtiger Bauteile muss darauf geachtet werden, dass die Schichten nach außen hin immer wasserdampfdurchlässiger werden.

Taupunkt:

Temperatur, bei der Kondensatbildung beginnt.

Transmission:

Wärmeleitung durch Materie. Transmissionwärmeverluste entstehen beim Durchgang von Wärmeenergie durch die Gebäudehülle und hängen direkt von der Dämmwirkung der Bauteile ab, die durch den U-Wert klassifiziert wird.

U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient):

Maß für den Wärmestromdurchgang durch ein Bauteil bei vorgegebener Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Dabei gehen die spezifische Wärmeleitfähigkeit und die Dicken aller beteiligten Materialschichten ein. Unterschieden werden z.B. der U_w -Wert für Fenster (engl. „window“), der U_g -Wert für die reine Fensterverglasung (engl. „glazing“),

Warmdach:

Auf einer Dampfsperre wird die Dämmschicht eingebaut, oberhalb derer sich direkt die Dachhaut anschließt. Im Gegensatz zum Kaltdach befindet sich hier also keine Luftschicht mehr.

Winddichtigkeit:

Barriere gegen von außen in die Wand- / Dachkonstruktion eindringende Luft. Hintergrund ist, dass der dahinter eingebaute Dämmstoff seine dämmende Wirkung nur erreichen kann, wenn die Luft in seinen Poren / Zwischenräumen ruht.

Anhang 3: Korrelationskoeffizienten zur Kreuzkorrelation der einzelnen Messobjekte

Messobjekt 1 vorher	Gesamtes Haus	Schlafzimmer 654	Gästezimmer 950	Wohnzimmer 301	Flur atmos	Keller
Korrelation Radon/CO2						
Verzögerung in Minuten						
Korrelation Radon/Tout						
Lag_min in Min	167	290	90	110	150	
kleinster Korr.Koeff.	-0,4	-0,25	-0,31	-0,61	-0,31	
Lag_max in min	-556	-420	-660	-610	-580	
größter Korr. Koeff.	0,2	0,13	0,046	0,36	0,12	
Korrelation Radon/Temperaturdifferenz						
Lag_min in Min	108	1440	1230	-1440	-	
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	0,02	-0,07	-0,21	-	
Lag_max in min	-78	-590	-1090	780	-	
größter Korr. Koeff.	0,1	0,14	0,10	0,16	-	
Korrelation Radon/pout						
Lag_min in Min	201	-590	-1440	1440	690	
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,17	-0,16	-0,15	-0,05	
Lag_max in min	-326	150	1250	-1440	-210	
größter Korr. Koeff.	0,0	-0,08	0,02	0,15	-0,00	
Korrelation Radon/ Druckdifferenz						
Lag_min in Min	-449	500	-30	-1380	-	
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,11	-0,23	-0,20	-	
Lag_max in min	-4	-530	-940	830	-	
größter Korr. Koeff.	0,0	0,03	-0,10	0,10	-	
Korrelation Radon/LF Außen						
Lag_min in Min	-565	-430	-660	-620	-600	
kleinster Korr.Koeff.	-0,3	-0,20	-0,18	-0,34	-0,22	
Lag_max in min	266	250	700	110	150	
größter Korr. Koeff.	0,3	0,18	0,12	0,50	0,24	
Korrelation Radon/LF Innen						
Lag_min in Min	154	650	940	-590	-	
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,08	-0,17	-0,11	-	
Lag_max in min	-735	-1410	-1440	110	-	
größter Korr. Koeff.	0,1	-0,00	-0,09	0,23	-	
Korrelation Radon/Wind						
Lag_min in Min	274	370	1380	50	-1140	
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,06	-0,06	-0,12	-0,07	
Lag_max in min	54	-300	-680	770	-380	
größter Korr. Koeff.	0,1	0,05	0,02	0,11	0,07	
Korrelation RadonTREND/ToutTREND						

Lag_min in Min	668	1440	740	10	760	
kleinster Korr.Koeff.	-0,5	-0,41	-0,57	-0,45	-0,50	
Lag_max in min	-31	-650	-1440	1440	-1440	
größter Korr. Koeff.	-0,2	-0,24	-0,32	-0,20	-0,27	
<i>Korrelation RadonTREND/TemperaturdifferenzTREND</i>						
Lag_min in Min	-89	690	910	-1150	-	
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	0,12	-0,08	-0,31	-	
Lag_max in min	73	-800	-1440	1440	-	
größter Korr. Koeff.	0,3	0,23	0,29	0,39	-	
<i>Korrelation RadonTREND/ poutTREND</i>						
Lag_min in Min	-78	-800	-1440	1440	-1440	
kleinster Korr.Koeff.	-0,4	-0,37	-0,40	-0,38	-0,17	
Lag_max in min	99	1440	970	-1280	-160	
größter Korr. Koeff.	0,0	-0,27	-0,02	0,26	-0,08	
<i>Korrelation RadonTREND/ DruckdifferenzTREND</i>						
Lag_min in Min	-159	460	-120	-660	-	
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,17	-0,26	-0,22	-	
Lag_max in min	45	-880	-1440	1440	-	
größter Korr. Koeff.	0,1	0,06	-0,06	0,24	-	
<i>Korrelation RadonTREND/LF AußenTREND</i>						
Lag_min in Min	595	-410	0	1440	1440	
kleinster Korr.Koeff.	0,1	-0,05	0	0,19	0,04	
Lag_max in min	-437	1130	-1440	-1440	500	
größter Korr. Koeff.	0,2	0,12	0,02	0,39	0,11	
<i>Korrelation RadonTREND/LF InnenTREND</i>						
Lag_min in Min	1363	1440	1060	1440	-	
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,18	-0,40	0,11	-	
Lag_max in min	-1440	-1440	-1440	-1440	-	
größter Korr. Koeff.	0,1	-0,06	-0,22	0,33	-	
<i>Korrelation RadonTREND/Wind TREND</i>						
Lag_min in Min	322	850	720	0	-770	
kleinster Korr.Koeff.	-0,3	-0,19	-0,20	-0,35	-0,14	
Lag_max in min	-217	-1440	-1440	880	1440	
größter Korr. Koeff.	-0,1	0,07	-0,12	-0,20	-0,11	
Räume untereinander						
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum UG		0,21/200	0,45/-70	0,33/-20	0,3/-120	
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum EG		0,34/120	0,38/-40	-	0,58/-70	
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum OG		0,19/280	0,19/-280	0,34/-120 bzw. 0,38/40	0,22/-140 bzw. 0,28/-50	

Messobjekt 1 nachher	Gesamtes Haus	Schlafzimmer 654	Gästezimmer 950	Wohnzimmer 301	Flur atmos	Keller
Korrelation Radon/CO2	0,5	0,353	0,364	0,594	0,426	0,468
Verzögerung in Minuten	85	190	-60	-90	1440	-160
Korrelation Radon/Tout						
Lag_min in Min	136	120	130	120	100	190
kleinster Korr.Koeff.	-0,4	-0,281	-0,424	-0,549	-0,395	-0,529
Lag_max in min	-250	-610	-580	-580	-610	920
größter Korr. Koeff.	0,2	0,231	0,049	0,162	0,142	0,16
Korrelation Radon/Temperaturdifferenz						
Lag_min in Min	1101	50	1440	1440	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	0,053	-0,122	-0,128	-0,064	-0,073
Lag_max in min	-917	-740	-1440	-780	-1440	-790
größter Korr. Koeff.	0,2	0,161	0,281	0,202	0,176	0,353
Korrelation Radon/pout						
Lag_min in Min	1293	1440	1440	1440	1440	790
kleinster Korr.Koeff.	-0,3	-0,212	-0,423	-0,331	-0,257	-0,336
Lag_max in min	-1423	-1370	-1440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	0,0	-0,096	0,042	-0,006	-0,007	0,023
Korrelation Radon/ Druckdifferenz						
Lag_min in Min	210	-1350	1260	130	230	1340
kleinster Korr.Koeff.	-0,3	-0,087	-0,295	-0,355	-0,188	-0,282
Lag_max in min	-482	680	-970	-780	-710	-940
größter Korr. Koeff.	-0,1	0,007	-0,118	-0,221	-0,076	0,026
Korrelation Radon/LF Außen						
Lag_min in Min	-596	-610	-610	-600	-640	-550
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,31	-0,227	-0,135	-0,262	-0,302
Lag_max in min	1157	1440	1440	1440	1440	190
größter Korr. Koeff.	0,4	0,246	0,367	0,473	0,341	0,475
Korrelation Radon/LF Innen						
Lag_min in Min	-708	-770	-780	-650	-840	-630
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,11	-0,042	-0,039	-0,03	-0,147
Lag_max in min	1337	1150	1340	1440	1210	1440
größter Korr. Koeff.	0,2	0,162	0,292	0,269	0,141	0,141
Korrelation Radon/Wind						
Lag_min in Min	-1236	-1290	-1240	-1220	-1290	-1180
kleinster Korr.Koeff.	0,0	-0,029	-0,028	-0,034	-0,026	-0,044
Lag_max in min	-221	110	90	-380	-520	-450
größter Korr. Koeff.	0,1	0,212	0,178	0,1	0,101	0,058
Korrelation RadonTREND/ToutTREND						
Lag_min in Min	541	1440	280	510	630	-250
kleinster Korr.Koeff.	-0,4	-0,183	-0,464	-0,556	-0,449	-0,45
Lag_max in min	-788	-1440	-1440	-1440	-1440	1440
größter Korr. Koeff.	-0,2	0,175	-0,244	-0,343	-0,188	-0,328
Korrelation RadonTREND/TemperaturdifferenzTREND						

Lag_min in Min	1182	380	1440	1440	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	0,0	0,19	-0,129	-0,124	-0,069	-0,032
Lag_max in min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	0,4	0,364	0,468	0,416	0,405	0,51
<i>Korrelation RadonTREND/ poutTREND</i>						
Lag_min in Min	1419	1440	1440	1440	1440	1350
kleinster Korr.Koeff.	-0,6	-0,54	-0,666	-0,623	-0,587	-0,506
Lag_max in min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	0,0	0,175	0,02	-0,073	-0,076	-0,028
<i>Korrelation RadonTREND/ DruckdifferenzTREND</i>						
Lag_min in Min	526	-60	940	0	1070	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,146	-0,264	-0,299	-0,206	-0,194
Lag_max in min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	0,0	0,05	0,057	-0,095	0,007	0,084
<i>Korrelation RadonTREND/LF AußenTREND</i>						
Lag_min in Min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,305	-0,125	0,003	-0,091	-0,063
Lag_max in min	1428	1440	1440	1440	1440	1390
größter Korr. Koeff.	0,4	0,043	0,496	0,533	0,395	0,395
<i>Korrelation RadonTREND/LF InnenTREND</i>						
Lag_min in Min	-1364	-1130	-1440	-1440	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	0,0	-0,024	0,026	0,115	0,012	-0,239
Lag_max in min	1342	1040	1440	1440	1440	1440
größter Korr. Koeff.	0,3	0,177	0,428	0,393	0,28	0,128
<i>Korrelation RadonTREND/Wind TREND</i>						
Lag_min in Min	-1386	-1220	-1440	-1440	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	0,1	0,072	0,051	0,119	0,097	-0,013
Lag_max in min	501	220	280	820	220	600
größter Korr. Koeff.	0,4	0,544	0,532	0,304	0,463	0,181
Räume untereinander						
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum UG		-10/0,368	-20/0,511	110/0,354	-30/0,395	0/1
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum EG		-70/0,392 bzw -30/0,657	-50/0,465 bzw - 20/0,731	70/0,548	-70/0,548	30/0,395 bzw - 110/0,354
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum OG		-10/0,635	10/0,635	50/0,465 bzw 70/0,392	20/0,731 bzw 30/0,657	20/0,511 bzw 10/0,368

Messobjekt 2 vorher	Gesamtes Haus	EG re. 950	654 EG li	OG re 211	OG li 301	Keller 066
Korrelation Radon/CO2	0,1	0,245	-0,191	0,247	0,120	0,12
Verzögerung in Minuten	680,1	-10	1160	10	-10	1420
Korrelation Radon/Tout						
Lag_min in Min	-546	970	980	920	-310	-1440
kleinster Korr.Koeff.	0,1	-0,142	0,283	0,089	0,143	-0,098
Lag_max in min	367	-1440	-1440	-160	-1380	1440
größter Korr. Koeff.	0,1	0,087	0,173	0,178	0,066	-0,028
Korrelation Radon/Temperaturdifferenz						
Lag_min in Min	-250	-770	1440	-1440	-700	-
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,078	-0,322	-0,118	-0,13	-
Lag_max in min	330	1400	-1440	1440	380	-
größter Korr. Koeff.	-0,1	-0,008	-0,262	-0,025	-0,091	-
Korrelation Radon/ pout						
Lag_min in Min	-521	-1050	-1440	-1120	-390	-1420
kleinster Korr.Koeff.	0,1	0,026	0,347	0,04	0,116	-0,090
Lag_max in min	1320	710	1440	1440	1300	1440
größter Korr. Koeff.	0,2	0,057	0,262	0,129	0,147	0,133
Korrelation Radon/ Druckdifferenz						
Lag_min in Min	-213	-1080	-1010	-750	-1330	-
kleinster Korr.Koeff.	0,0	-0,105	0,041	-0,029	-0,024	-
Lag_max in min	1337	1350	1350	1420	1110	-
größter Korr. Koeff.	0,0	0,021	-0,041	0,136	0,056	-
Korrelation Radon/LF Außen						
Lag_min in Min	-10	-1120	-620	-1080	1330	1400
kleinster Korr.Koeff.	0,0	-0,092	-0,051	-0,047	0	0,023
Lag_max in min	350	970	150	770	150	-60
größter Korr. Koeff.	0,1	0,189	0,035	0,09	0,146	0,081
Korrelation Radon/LF Innen						
Lag_min in Min	1340	1040	1440	1380	1440	-
kleinster Korr.Koeff.	0,1	-0,061	0,198	0,052	0,055	-
Lag_max in min	-371	-1320	10	20	-770	-
größter Korr. Koeff.	0,2	0,062	0,308	0,14	0,163	-
Korrelation Radon/Wind						
Lag_min in Min	110	990	290	740	260	-1030
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,053	-0,262	-0,119	-0,154	-0,141
Lag_max in min	-418	-1090	-1430	-1030	-950	1420
größter Korr. Koeff.	0,0	0,091	-0,106	0,099	0,027	-0,068
Korrelation RadonTREND/ToutTREND						
Lag_min in Min	-366	1440	-1440	1440	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	0,0	-0,261	0,287	0,196	0,166	-0,210
Lag_max in min	373	-1440	1140	-330	-240	1440
größter Korr. Koeff.	0,2	0,08	0,413	0,345	0,26	-0,063

Korrelation RadonTREND/TemperaturdifferenzTREND						
Lag_min in Min	-401	-980	1440	-1440	-1440	-
kleinster Korrr.Koeff.	-0,2	-0,166	-0,047	-0,271	-0,258	-
Lag_max in min	438	1440	-1330	1440	810	-
größter Korrr. Koeff.	-0,2	-0,059	-0,392	-0,057	-0,197	-
Korrelation RadonTREND/ poutTREND						
Lag_min in Min	-1364	-1440	-1440	-1440	-720	-1440
kleinster Korrr.Koeff.	0,1	0,066	0,502	0,082	0,256	-0,162
Lag_max in min	1322	620	1440	1440	1440	1440
größter Korrr. Koeff.	0,3	0,138	0,415	0,284	0,3	0,228
Korrelation RadonTREND/ DruckdifferenzTREND						
Lag_min in Min	563	-1140	-1320	1440	-960	-
kleinster Korrr.Koeff.	-0,1	-0,199	0,058	-0,021	-0,038	-
Lag_max in min	857	640	1440	600	420	-
größter Korrr. Koeff.	0,1	-0,024	-0,019	0,176	0,07	-
Korrelation RadonTREND/LF AußenTREND						
Lag_min in Min	-464	-1440	1440	-1440	1440	-1440
kleinster Korrr.Koeff.	0,0	0,037	-0,092	-0,057	0,062	0,153
Lag_max in min	287	620	0	380	120	340
größter Korrr. Koeff.	0,2	0,34	-0,013	0,167	0,242	0,185
Korrelation RadonTREND/LF InnenTREND						
Lag_min in Min	1440	1440	1440	1440	1440	-
kleinster Korrr.Koeff.	0,1	-0,194	0,312	0,132	0,135	-
Lag_max in min	-538	-1440	0	-520	-540	-
größter Korrr. Koeff.	0,3	0,1	0,449	0,414	0,315	-
Korrelation RadonTREND/Wind TREND						
Lag_min in Min	273	960	330	870	570	-700
kleinster Korrr.Koeff.	-0,3	-0,007	-0,479	-0,236	-0,306	-0,319
Lag_max in min	-1292	-980	-1440	-1180	-1230	-1440
größter Korrr. Koeff.	-0,1	0,193	-0,292	0,166	-0,018	-0,261
Räume untereinander						
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum UG		-	-	-	-	-
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum EG		580/0,068	-580/0,068	520/0,167 bzw - 70/0,135	-330/0,191 bzw - 20/0,082	0,08/1300 bzw. 0,03/1190
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum OG		70/0,135 bzw 20/0,082	-520/0,167 bzw 330/0,191	10/0,228	-10/0,228	0,04/1390 bzw. 0,04/1420

Messobjekt 2 nachher	Gesamtes Haus	EG re. 950	654 EG li	OG re 211	OG li 301	Keller 066
Korrelation Radon/CO2	0,2	0,090	0,35	-	0,117	-0,241
Verzögerung in Minuten	251,5	1370	-10	-	-350	1440
Korrelation Radon/Tout						
Lag_min in Min	268	-1300	1300	-	230	200
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,192	-0,087	-	-0,006	0,133
Lag_max in min	571	960	0	-	1080	-550
größter Korr. Koeff.	0,2	-0,011	0,3	-	0,136	0,373
Korrelation Radon/Temperaturdifferenz						
Lag_min in Min	351	1440	-1190	-	1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	0,0	0,059	0,122	-	-0,129	-0,05
Lag_max in min	-661	-790	-10	-	-1440	810
größter Korr. Koeff.	0,1	0,196	0,323	-	-0,051	0,045
Korrelation Radon/ pout						
Lag_min in Min	1440	1440	1440	-	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	0,0	-0,14	-0,123	-	0,066	0,066
Lag_max in min	-271	-1440	-780	-	-1440	-810
größter Korr. Koeff.	0,0	0,04	-0,306	-	0,141	-0,026
Korrelation Radon/ Druckdifferenz						
Lag_min in Min	328	-870	-1220		-1430	-1410
kleinster Korr.Koeff.	0,0	0,058	0,088		0,068	0,226
Lag_max in min	1153	1440	780	-	1400	740
größter Korr. Koeff.	0,1	-0,071	0,28	-	0,016	0,304
Korrelation Radon/LF Außen						
Lag_min in Min	505	-500	700	-	1080	-570
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,035	-0,191	-	-0,15	-0,156
Lag_max in min	511	210	1270	-	120	160
größter Korr. Koeff.	0,1	0,115	0,177	-	0,042	0,138
Korrelation Radon/LF Innen						
Lag_min in Min	-58	980	1370	-	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	0,0	-0,48	0,06	-	0,228	0,15
Lag_max in min	-31	-1440	-1050	-	1190	1420
größter Korr. Koeff.	0,1	-0,346	0,113	-	0,276	0,228
Korrelation Radon/Wind						
Lag_min in Min	-75	-1340	500	-	20	260
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,173	-0,019	-	-0,064	-0,277
Lag_max in min	-520	1100	-470	-	-1380	-470
größter Korr. Koeff.	0,1	-0,121	0,265	-	0,137	-0,208
Korrelation RadonTREND/ToutTREND						
Lag_min in Min	462	-1440	1440	-	410	1440
kleinster Korr.Koeff.	0,1	-0,195	0,216	-	0,139	0,379
Lag_max in min	799	1440	0	-	1440	-670
größter Korr. Koeff.	0,2	-0,089	0,35	-	0,169	0,444
Korrelation RadonTREND/TemperaturdifferenzTREND						

Lag_min in Min	271	1440	-1440	-	1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	0,0	0,0662	0,236	-	-0,2055	-0,0580
Lag_max in min	-547	-1180	420	-	-1440	1440
größter Korr. Koeff.	0,1	0,2155	0,3	-	-0,0763	0,0478
<i>Korrelation RadonTREND/ poutTREND</i>						
Lag_min in Min	978	1440	0	-	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	0,2	0,04	0,48	-	0,108	0,08
Lag_max in min	-452	-1440	1440	-	-1280	-1440
größter Korr. Koeff.	0,0	-0,015	-0,242	-	0,231	-0,030
<i>Korrelation RadonTREND/ DruckdifferenzTREND</i>						
Lag_min in Min	-422	-1270	-1440	-	-310	-1440
kleinster Korr.Koeff.	0,0	0,081	-0,003	-	-0,017	0,114
Lag_max in min	471	1440	440	-	0	530
größter Korr. Koeff.	0,1	-0,050	0,327	-	0	0,171
<i>Korrelation RadonTREND/LF AußenTREND</i>						
Lag_min in Min	-515	-1440	1440	-	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	0,037	-0,068	-	-0,298	-0,181
Lag_max in min	459	1240	0	-	230	1440
größter Korr. Koeff.	0,0	0,126	0,059	-	-0,131	0,107
<i>Korrelation RadonTREND/LF InnenTREND</i>						
Lag_min in Min	-978	-1440	0	-	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	0,2	0,005	0,25	-	0,181	0,197
Lag_max in min	515	1440	-1440	-	1440	1440
größter Korr. Koeff.	0,3	0,279	0,344	-	0,323	0,287
<i>Korrelation RadonTREND/Wind TREND</i>						
Lag_min in Min	451	-1440	1060	-	690	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,280	0,137	-	-0,010	-0,496
Lag_max in min	-407	1440	0	-	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	0,1	-0,230	0,3	-	0,270	-0,442
Räume untereinander						
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum UG		1300/-0,115 bzw 1380/0,197	1040/0,108 bzw - 150/0,077	-	- 1270/0,094	1270/0,094
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum EG		1440/-0,061	-1440/- 0,061	-	- 1040/0,108 bzw - 1300/0,115	150/0,077 bzw - 1380/0,197
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum OG		-	-	-	-	-
Messobjekt 3 vorher	Gesamtes Haus	Schlafzimmer 654	Verteilterraum 082	Wohnzimmer 211	Büro 301	Keller 066
Korrelation Radon/CO2	0,2	0,27		0,06	0,34	
Verzögerung in Minuten	-175	10		180	-1190	
<i>Korrelation Radon/Tout</i>						
Lag_min in Min	815	1440	-	840	340	-
kleinster Korr.Koeff.	0,16	0,03		0,09	0,43	
Lag_max in min	477	-690		140	-1440	

größter Korr. Koeff.	0,2	0,28		-0,15	0,24	
Korrelation Radon/Temperaturdifferenz						
Lag_min in Min	1348	1440		1430	1080	
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	0,00		-0,16	0,05	
Lag_max in min	-928	-820		-760	-1420	
größter Korr. Koeff.	0,0	0,12		-0,04	0,20	
Korrelation Radon/ pout						
Lag_min in Min						
kleinster Korr.Koeff.						
Lag_max in min						
größter Korr. Koeff.						
Korrelation Radon/ Innendruck (da Außendruck konstant)						
Lag_min in Min	-1361	-1440		-1440	-1110	
kleinster Korr.Koeff.	0,0	-0,09		-0,10	0,20	
Lag_max in min	1412	1370		1440	1370	
größter Korr. Koeff.	0,0	0,08		-0,05	0,29	
Korrelation Radon/LF Außen						
Lag_min in Min	-517	700		-610	-1090	
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,12		-0,10	-0,23	
Lag_max in min	204	1420		120	-390	
größter Korr. Koeff.	0,2	0,17		0,24	-0,05	
Korrelation Radon/LF Innen						
Lag_min in Min	-727	510		-770	-1440	
kleinster Korr.Koeff.	0,0	0,17		-0,09	0,29	
Lag_max in min	590	-1440		1360	0	
größter Korr. Koeff.	0,1	0,23		0,01	0,38	
Korrelation Radon/Wind						
Lag_min in Min	1342	1390		1430	1090	
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,14		-0,08	-0,13	
Lag_max in min	-645	-760		-470	-1010	
größter Korr. Koeff.	0,1	0,03		0,10	0,02	
Korrelation RadonTREND/ToutTREND						
Lag_min in Min	-983	1440		-1440	-1440	
kleinster Korr.Koeff.	0,1	0,28		-0,08	0,46	
Lag_max in min	58	-510		0	580	
größter Korr. Koeff.	0,2	0,40		-0,05	0,68	
Korrelation RadonTREND/TemperaturdifferenzTREND						
Lag_min in Min	1228	1440		1140	1310	
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	0,04		-0,19	0,11	
Lag_max in min	-573	-1440		0	-1440	
größter Korr. Koeff.	0,0	0,23		-0,17	0,27	
Korrelation RadonTREND/ poutTREND						
Lag_min in Min						
kleinster Korr.Koeff.						

Lag_max in min						
größter Korr. Koeff.						
Korrelation RadonTREND/ Innendruck TREND						
Lag_min in Min	-1323	-1440		-1440	-950	
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,15		-0,17	0,32	
Lag_max in min	1428	1440		1440	1390	
größter Korr. Koeff.	0,1	0,12		-0,09	0,41	
Korrelation RadonTREND/LF AußenTREND						
Lag_min in Min	-853	-1260		-1440	890	
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,05		0,02	-0,34	
Lag_max in min	750	1440		1440	-1440	
größter Korr. Koeff.	0,1	0,11		0,27	-0,28	
Korrelation RadonTREND/LF InnenTREND						
Lag_min in Min	-293	1440		-1440	1440	
kleinster Korr.Koeff.	0,1	0,32		-0,10	0,44	
Lag_max in min	867	0		1440	0	
größter Korr. Koeff.	0,2	0,39		-0,05	0,54	
Korrelation RadonTREND/Wind TREND						
Lag_min in Min	1293	1340		1290	1270	
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,26		-0,08	-0,29	
Lag_max in min	-1440	-1440		-1440	-1440	
größter Korr. Koeff.	0,1	0,05		0,19	-0,04	
Räume untereinander						
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum UG		0,28/-10		0,07/280	1	
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum EG		0,33/-110		1	0,07/-280	
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum OG		1		0,33/110	0,28/10	

Messobjekt 3 nachher	Gesamtes Haus	Schlafzimmer 654	Verteilerraum 082	Wohnzimmer 211	Büro 301	Keller 066
Korrelation Radon/CO2	0,3	0,42	0,32	0,23	0,25	0,22
Verzögerung in Minuten	-124	10	-50	10	-690	-150
Korrelation Radon/Tout						
Lag_min in Min	-985	-1400	-1380	-1280	-20	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,14	-0,16	-0,12	-0,12	-0,08
Lag_max in min	296	780	-620	880	700	-700
größter Korr. Koeff.	0,4	0,50	0,47	0,41	0,29	0,35
Korrelation Radon/Temperaturdifferenz						
Lag_min in Min	1386	1210	1430	1440	1440	930
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,10	-0,11	-0,11	0,01	-0,29
Lag_max in min	-783	-830	-790	-690	-860	-1110
größter Korr. Koeff.	0,2	0,19	0,16	0,11	0,29	-0,10
Korrelation Radon/pout						
Lag_min in Min	-808	-720	-850	-710	-920	-1110
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,15	-0,11	-0,07	-0,28	0,12
Lag_max in min	1364	1270	1370	1440	1440	750
größter Korr. Koeff.	0,1	0,09	0,10	0,09	-0,03	0,30
Korrelation Radon/ Druckdifferenz						
Lag_min in Min	1401	1310	1380	1440	1430	1330
kleinster Korr.Koeff.	0,0	0,05	-0,02	0,01	0,02	-0,07
Lag_max in min	-614	-530	-580	-580	-750	-830
größter Korr. Koeff.	0,2	0,30	0,24	0,22	0,17	0,16
Korrelation Radon/LF Außen						
Lag_min in Min	772	790	790	890	700	0
kleinster Korr.Koeff.	-0,4	-0,49	-0,48	-0,40	-0,31	0,21
Lag_max in min	-1290	-1420	-1390	-1300	-1430	0
größter Korr. Koeff.	0,2	0,27	0,27	0,23	0,18	0,21
Korrelation Radon/LF Innen						
Lag_min in Min	921	550	870	780	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,18	-0,19	-0,23	-0,13	0,00
Lag_max in min	-179	10	-60	10	-740	-980
größter Korr. Koeff.	0,2	0,31	0,10	0,28	0,04	0,22
Korrelation Radon/Wind						
Lag_min in Min	-504	-1440	240	-1170	100	40
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,19	-0,19	-0,17	-0,18	-0,20
Lag_max in min	-403	-550	-530	-390	-520	840
größter Korr. Koeff.	0,1	0,16	0,15	0,11	0,09	0,13
Korrelation RadonTREND/ToutTREND						
Lag_min in Min	42	-1440	1440	-1440	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	0,4	0,47	0,45	0,40	0,22	0,26
Lag_max in min	70	360	80	540	-1000	-860
größter Korr. Koeff.	0,5	0,62	0,57	0,53	0,30	0,37
Korrelation RadonTREND/TemperaturdifferenzTREND						

Lag_min in Min	1399	1440	1440	1440	1440	670
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,14	-0,17	-0,14	0,09	-0,46
Lag_max in min	-1354	-1100	-1440	-1440	-1100	-1440
größter Korr. Koeff.	0,3	0,33	0,31	0,13	0,58	-0,18
<i>Korrelation RadonTREND/ poutTREND</i>						
Lag_min in Min	-1382	-1180	-1440	-1440	-1230	-1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,26	-0,25	-0,11	-0,60	0,23
Lag_max in min	1399	1440	1440	1440	1440	670
größter Korr. Koeff.	0,2	0,15	0,20	0,17	-0,10	0,48
<i>Korrelation RadonTREND/ DruckdifferenzTREND</i>						
Lag_min in Min	1408	1440	1440	1440	1440	850
kleinster Korr.Koeff.	0,1	0,27	0,03	0,09	0,04	-0,12
Lag_max in min	-644	-190	-780	-640	-580	-940
größter Korr. Koeff.	0,3	0,46	0,31	0,23	0,27	0,19
<i>Korrelation RadonTREND/LF AußenTREND</i>						
Lag_min in Min	1317	1320	1080	1440	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,6	-0,60	-0,63	-0,56	-0,48	-0,25
Lag_max in min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	-0,3	-0,28	-0,39	-0,25	-0,21	-0,18
<i>Korrelation RadonTREND/LF InnenTREND</i>						
Lag_min in Min	1440	1440	1440	1440	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,09	-0,30	-0,19	-0,28	0,08
Lag_max in min	-1360	-650	-1440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	0,1	0,15	-0,04	0,24	0,06	0,44
<i>Korrelation RadonTREND/Wind TREND</i>						
Lag_min in Min	240	370	380	0	590	-90
kleinster Korr.Koeff.	-0,3	-0,28	-0,28	-0,25	-0,36	-0,26
Lag_max in min	269	1440	-1140	1440	-1020	1440
größter Korr. Koeff.	-0,1	-0,15	-0,10	-0,01	-0,14	0,21
Räume untereinander						
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum UG		0,37/40 bzw. 0,31/0	0,33/20 bzw. 0,35/40	0,25/80 bzw. 0,37/90	0,12/1420	0,12/-1420
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum EG		0,47/-80	0,46/-90	-	0,25/-80	0,37/-90
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum OG		0,58/-10	0,58/10	0,47/80 bzw. 0,46/90	0,31/0 bzw. 0,33/-20	0,37/-40 bzw 0,35/-40

Messobjekt 4 vorher	Gesamtes Haus	Gästeschlafzimmer UG 2201	Kinderzimmer EG 654	Wohnzimmer EG 950	Werkstatt UG 301
Korrelation Radon/CO2		0,18	0,38	0,26	0,23
Verzögerung in Minuten		1440	70	140	-890
Korrelation Radon/Tout					
Lag_min in Min	1249	1440	80	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,10	-0,32	-0,33	0,01
Lag_max in min	-395	840	-610	-750	-530
größter Korr. Koeff.	0,1	0,15	-0,05	-0,06	0,28
Korrelation Radon/Temperaturdifferenz					
Lag_min in Min	1007	-130	1270	1160	1410
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,12	-0,20	-0,23	0,00
Lag_max in min	-1272	-1440	-1090	-1170	-1440
größter Korr. Koeff.	0,0	-0,01	-0,09	-0,09	0,15
Korrelation Radon/pout					
Lag_min in Min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	0,0	0,01	0,08	0,10	-0,14
Lag_max in min	675	-160	500	660	1420
größter Korr. Koeff.	0,1	0,11	0,19	0,21	0,02
Korrelation Radon/ Druckdifferenz					
Lag_min in Min	1400	1430	1420	1370	1420
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,07	-0,24	-0,25	0,00
Lag_max in min	-1026	-610	-970	-990	-1430
größter Korr. Koeff.	0,0	0,03	-0,13	-0,13	0,18
Korrelation Radon/LF Außen					
Lag_min in Min	-196	880	840	-770	-540
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,11	-0,06	0,01	-0,15
Lag_max in min	66	20	60	40	150
größter Korr. Koeff.	0,4	0,34	0,41	0,41	0,28
Korrelation Radon/LF Innen					
Lag_min in Min	1219	870	850	1410	1340
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,01	-0,23	-0,22	0,15
Lag_max in min	-1109	-1360	-1380	-770	-1390
größter Korr. Koeff.	0,0	0,09	-0,09	-0,14	0,22
Korrelation Radon/Wind					
Lag_min in Min	213	160	220	200	270
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,21	-0,26	-0,27	-0,21
Lag_max in min	-812	-600	-610	-620	-1440
größter Korr. Koeff.	-0,1	-0,04	-0,07	-0,10	0,01
Korrelation RadonTREND/ToutTREND					
Lag_min in Min	1193	1440	810	1080	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,3	0,02	-0,54	-0,55	0,18
Lag_max in min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	-0,1	0,06	-0,38	-0,30	0,44
Korrelation RadonTREND/TemperaturdifferenzTREND					

Lag_min in Min	927	410	660	940	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,3	-0,23	-0,48	-0,48	0,01
Lag_max in min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	-0,1	-0,01	-0,21	-0,22	0,27
<i>Korrelation RadonTREND/ poutTREND</i>					
Lag_min in Min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	0,1	0,02	0,22	0,23	-0,26
Lag_max in min	982	560	740	980	1440
größter Korr. Koeff.	0,3	0,23	0,48	0,49	0,01
<i>Korrelation RadonTREND/ DruckdifferenzTREND</i>					
Lag_min in Min	561	-60	410	380	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,10	-0,38	-0,33	-0,01
Lag_max in min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	0,0	0,08	-0,15	-0,14	0,25
<i>Korrelation RadonTREND/LF AußenTREND</i>					
Lag_min in Min	-525	1440	1440	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	0,3	0,27	0,39	0,42	-0,07
Lag_max in min	185	50	60	140	440
größter Korr. Koeff.	0,5	0,42	0,64	0,69	0,23
<i>Korrelation RadonTREND/LF InnenTREND</i>					
Lag_min in Min	1440	1440	1440	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,03	-0,49	-0,46	0,27
Lag_max in min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	-0,1	0,11	-0,40	-0,34	0,38
<i>Korrelation RadonTREND/Wind TREND</i>					
Lag_min in Min	430	290	390	380	650
kleinster Korr.Koeff.	-0,5	-0,42	-0,65	-0,66	-0,32
Lag_max in min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	-0,1	-0,13	-0,22	-0,22	0,07
Räume untereinander					
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum UG		0,36/-70	0,38/30 bzw. 0,28/-120	0,36/0 bzw 0,26/-70	0,36/70
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum EG		0,38/-30 bzw. 0,36/0	0,43/50	0,43/-50	0,26/70 bzw. 0,28/120

Messobjekt 4 nachher	Gesamtes Haus	Gästeschlafzimmer UG 2201	Kinderzimmer EG 654	Wohnzimmer EG 950	Werkstatt UG 301
Korrelation Radon/CO2		-	-	0,17	0,19
Verzögerung in Minuten		-	-	-1080	-970
Korrelation Radon/Tout					
Lag_min in Min	391	70	70	50	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,08	-0,29	-0,30	-0,08
Lag_max in min	-695	-630	-570	-830	-570
größter Korr. Koeff.	0,0	0,04	-0,05	-0,11	0,05
Korrelation Radon/Temperaturdifferenz					
Lag_min in Min	-155	-120	-80	-250	-50
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,10	-0,03	-0,09	-0,18
Lag_max in min	623	-1440	-740	1440	1440
größter Korr. Koeff.	0,0	-0,06	0,02	-0,03	-0,11
Korrelation Radon/ pout					
Lag_min in Min	929	-1440	1440	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	0,1	0,07	-0,01	0,03	0,11
Lag_max in min	-697	-120	-110	-1440	-100
größter Korr. Koeff.	0,1	0,12	0,03	0,09	0,17
Korrelation Radon/ Druckdifferenz					
Lag_min in Min	22	-1430	-120	-180	-150
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	0,00	-0,18	-0,21	-0,16
Lag_max in min	1246	870	780	1440	1440
größter Korr. Koeff.	-0,1	-0,06	-0,11	-0,12	-0,10
Korrelation Radon/LF Außen					
Lag_min in Min	-216	910	890	-860	-510
kleinster Korr.Koeff.	0,0	-0,09	-0,01	0,06	0,00
Lag_max in min	51	50	30	20	120
größter Korr. Koeff.	0,3	0,11	0,34	0,32	0,20
Korrelation Radon/LF Innen					
Lag_min in Min	-392	-570	-550	-320	-300
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,22	-0,25	-0,16	-0,35
Lag_max in min	796	1440	30	430	1440
größter Korr. Koeff.	-0,1	0,02	-0,01	-0,04	-0,27
Korrelation Radon/Wind					
Lag_min in Min	151	170	160	130	170
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,15	-0,24	-0,24	-0,22
Lag_max in min	-789	-690	-660	-990	-570
größter Korr. Koeff.	0,0	0,03	-0,03	-0,03	0,00
Korrelation RadonTREND/ToutTREND					
Lag_min in Min	704	860	360	350	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,3	-0,06	-0,47	-0,47	-0,07
Lag_max in min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	-0,2	0,04	-0,36	-0,32	0,05
Korrelation RadonTREND/TemperaturdifferenzTREND					

Lag_min in Min	-1190	-30	-1440	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,22	-0,03	-0,19	-0,30
Lag_max in min	1184	0	1440	1440	1440
größter Korr. Koeff.	0,0	0,20	0,04	-0,07	-0,18
<i>Korrelation RadonTREND/ poutTREND</i>					
Lag_min in Min	929	-1440	1440	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	0,1	0,16	-0,02	0,07	0,20
Lag_max in min	-1183	10	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	0,2	0,25	0,04	0,19	0,32
<i>Korrelation RadonTREND/ DruckdifferenzTREND</i>					
Lag_min in Min	164	-260	480	400	-140
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,11	-0,12	-0,14	-0,13
Lag_max in min	929	-1440	1440	1440	1440
größter Korr. Koeff.	0,0	0,01	-0,02	-0,04	-0,02
<i>Korrelation RadonTREND/LF AußenTREND</i>					
Lag_min in Min	1440	1440	1440	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	0,1	-0,07	0,24	0,22	0,09
Lag_max in min	-111	-1170	90	120	130
größter Korr. Koeff.	0,4	0,04	0,55	0,51	0,23
<i>Korrelation RadonTREND/LF InnenTREND</i>					
Lag_min in Min	-1117	-690	-1440	-1440	-650
kleinster Korr.Koeff.	-0,4	-0,31	-0,34	-0,25	-0,62
Lag_max in min	1440	1440	1440	1440	1440
größter Korr. Koeff.	-0,3	-0,17	-0,28	-0,18	-0,47
<i>Korrelation RadonTREND/Wind TREND</i>					
Lag_min in Min	345	420	320	260	460
kleinster Korr.Koeff.	-0,4	-0,25	-0,56	-0,53	-0,37
Lag_max in min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	-0,2	-0,02	-0,29	-0,30	-0,18
Räume untereinander					
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum UG		0,28/-30	0,27/0 bzw. 0,28/10	0,2/10 bzw. 0,23/-100	0,28/30
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum EG		0,27/0 bzw. 0,2/-10	0,47/20	0,27/-20	0,28/-10 bzw. 0,23/10

Messobjekt 5 vorher	Gesamtes Haus	Schlafzimmer 654	Kinderzimmer 301	Wohnzimmer 950	Küche 2200	Keller 2201
Korrelation Radon/CO2	0,2	0,363	0,448	0,218	0,130	0,184
Verzögerung in Minuten	384	-10	-20	880	790	-90
Korrelation Radon/Tout						
Lag_min in Min	1367	1320	1340	1440	1380	1320
kleinster Korr.Koeff.	-0,3	-0,344	-0,387	-0,23	-0,304	-0,250
Lag_max in min	-641	-730	-760	-490	-650	-680
größter Korr. Koeff.	0,1	0,134	0,161	0,148	0,093	-0,024
Korrelation Radon/Temperaturdifferenz						
Lag_min in Min	-1351	-1380	-1250	-1440	-1380	-1280
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,150	-0,115	-0,159	-0,251	-0,242
Lag_max in min	516	-70	1400	590	720	50
größter Korr. Koeff.	0,1	0,047	0,065	0,082	0,021	0,149
Korrelation Radon/ pout						
Lag_min in Min	-129	90	-1440	260	10	-50
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,054	-0,051	-0,086	-0,043	-0,156
Lag_max in min	1395	1290	1440	1440	1440	1330
größter Korr. Koeff.	0,2	0,139	0,118	0,114	0,211	0,233
Korrelation Radon/ Druckdifferenz						
Lag_min in Min	-1392	-1280	-1320	-1440	-1380	-1440
kleinster Korr.Koeff.	#WERT!	-0,258	-0,241	-0,257	-0,311	0,...
Lag_max in min	992	970	1180	630	790	1440
größter Korr. Koeff.	-0,1	0,012	0,027	0,001	-0,035	-0,42
Korrelation Radon/LF Außen						
Lag_min in Min	-675	-710	-780	-500	-690	-760
kleinster Korr.Koeff.	0,0	-0,095	0,117	-0,098	-0,008	0,074
Lag_max in min	397	1280	1310	270	0	40
größter Korr. Koeff.	0,3	0,28	0,348	0,266	0,234	0,225
Korrelation Radon/LF Innen						
Lag_min in Min	880	520	750	910	870	1080
kleinster Korr.Koeff.	0,0	-0,168	-0,118	0,015	0,046	0,017
Lag_max in min	-66	20	20	30	10	-310
größter Korr. Koeff.	0,3	0,337	0,234	0,215	0,292	0,285
Korrelation Radon/Wind						
Lag_min in Min	1025	350	1380	350	1410	1420
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,153	-0,233	-0,153	-0,233	-0,170
Lag_max in min	-455	-400	-460	-400	-420	-560
größter Korr. Koeff.	0,0	0,017	0,001	0,017	-0,016	-0,004
Korrelation RadonTREND/ToutTREND						
Lag_min in Min	1402	1380	1440	1440	1440	1320
kleinster Korr.Koeff.	-0,5	-0,472	-0,463	-0,418	-0,461	-0,475
Lag_max in min	-1108	-740	-680	-1400	-850	-1440
größter Korr. Koeff.	-0,1	-0,104	-0,101	0,011	-0,067	-0,136

<i>Korrelation RadonTREND/TemperaturdifferenzTREND</i>						
Lag_min in Min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,3449	0,2622	-0,2202	-0,3669	-0,3034
Lag_max in min	812	1440	1440	150	1440	280
größter Korr. Koeff.	0,1	0,0587	0,1182	0,1052	0,0045	0,1448
<i>Korrelation RadonTREND/ poutTREND</i>						
Lag_min in Min	-879	-1440	-1440	-220	-1440	-470
kleinster Korr.Koeff.	-0,1	-0,1	-0,113	-0,145	-0,064	-0,136
Lag_max in min	1440	1440	1440	1440	1440	1440
größter Korr. Koeff.	0,3	0,293	0,248	0,167	0,316	0,275
<i>Korrelation RadonTREND/ DruckdifferenzTREND</i>						
Lag_min in Min	-1388	-1440	-1440	-1440	-1440	-1240
kleinster Korr.Koeff.	-0,3	-0,3191	-0,244	-0,2258	-0,3171	-0,3289
Lag_max in min	-106	-150	-190	-300	-50	90
größter Korr. Koeff.	0,1	0,083	0,0215	0,0707	0,0701	0,1294
<i>Korrelation RadonTREND/LF AußenTREND</i>						
Lag_min in Min	-1338	-1440	-1160	-1260	-1360	-1440
kleinster Korr.Koeff.	0,2	0,161	0,243	0,161	0,236	0,212
Lag_max in min	658	690	880	690	680	480
größter Korr. Koeff.	0,4	0,346	0,453	0,346	0,36	0,371
<i>Korrelation RadonTREND/LF InnenTREND</i>						
Lag_min in Min	1095	1440	-1120	1440	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	0,1	0,045	-0,002	0,207	0,193	0,036
Lag_max in min	-692	-800	-800	-580	-570	-810
größter Korr. Koeff.	0,4	0,231	0,231	0,351	0,506	0,377
<i>Korrelation RadonTREND/Wind TREND</i>						
Lag_min in Min	1406	1440	1440	1440	1440	1310
kleinster Korr.Koeff.	-0,4	-0,372	-0,485	-0,372	-0,533	-0,325
Lag_max in min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	-0,1	-0,070	-0,199	-0,070	-0,179	-0,086
Räume untereinander						
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum UG		280/0,3	260/0,3	350/0,4	170/0,4	0/1
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum EG		-280/0,3 bzw - 30/0,4	-290/0,3 bzw 0/0,4	170/0,3	-170/0,3	- 170/0,391 bzw - 350/0,361
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum OG		0/0,5	0/0,5	290/0,3 bzw 280/0,3	0/0,4 bzw 30/0,4	-140/0,1 bzw - 120/0,1

Messobjekt 5 nachher	Gesamtes Haus	Schlafzimmer 654	Kinderzimmer 301	Wohnzimmer 950	Küche 2200	Keller 2201
Korrelation Radon/CO2	0,4	0,461	0,314	0,371	0,415	0,319
Verzögerung in Minuten	-35	-70	-20	-80	-30	10
<i>Korrelation Radon/Tout</i>						
Lag_min in Min	591	1440	110	120	1440	150
kleinster Korr.Koeff.	-0,3	-0,272	-0,173	-0,368	-0,292	-0,34
Lag_max in min	-572	-610	-570	-570	-570	-560
größter Korr. Koeff.	0,2	0,199	0,175	0,269	-0,02	0,26
<i>Korrelation Radon/Temperaturdifferenz</i>						
Lag_min in Min	-1376	-1440	-1160	-1440	-1440	-1340
kleinster Korr.Koeff.	-0,3	-0,246	-0,071	-0,279	-0,384	-0,289
Lag_max in min	772	720	1030	620	760	820
größter Korr. Koeff.	-0,1	-0,060	-0,032	-0,153	-0,093	-0,118
<i>Korrelation Radon/pout</i>						
Lag_min in Min	-718	-770	-700	-720	-700	-720
kleinster Korr.Koeff.	0,0	-0,002	-0,024	-0,031	0,007	-0,015
Lag_max in min	1412	1440	1310	1400	1440	1440
größter Korr. Koeff.	0,2	0,207	0,089	0,22	0,298	0,241
<i>Korrelation Radon/ Druckdifferenz</i>						
Lag_min in Min	-1439	-1440	-1430	-1440	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,137	-0,066	-0,224	-0,222	-0,18
Lag_max in min	234	590	-880	560	0	560
größter Korr. Koeff.	0,0	0,001	0,061	0,008	0	0,034
<i>Korrelation Radon/LF Außen</i>						
Lag_min in Min	868	820	-1390	860	890	880
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,239	0,204	-0,322	-0,056	-0,291
Lag_max in min	201	60	860	80	110	120
größter Korr. Koeff.	0,2	0,268	-0,186	0,38	0,21	0,357
<i>Korrelation Radon/LF Innen</i>						
Lag_min in Min	855	840	880	940	970	660
kleinster Korr.Koeff.	0,1	0,004	0,022	0,061	0,134	0,114
Lag_max in min	-731	50	10	-1330	-1390	-260
größter Korr. Koeff.	0,3	0,135	0,129	0,26	0,339	0,3
<i>Korrelation Radon/Wind</i>						
Lag_min in Min	281	170	250	280	310	320
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,167	-0,149	-0,186	-0,122	-0,192
Lag_max in min	405	940	-490	970	1000	-450
größter Korr. Koeff.	0,1	0,108	0,083	0,146	0,032	0,129
<i>Korrelation RadonTREND/ToutTREND</i>						
Lag_min in Min	1440	1440	1440	1440	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,3	-0,218	-0,048	-0,305	-0,392	-0,280
Lag_max in min	-1305	-1440	-440	-1440	-1440	-1440
größter Korr. Koeff.	-0,1	-0,049	-0,003	-0,121	-0,172	-0,090

<i>Korrelation RadonTREND/TemperaturdifferenzTREND</i>						
Lag_min in Min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,4	-0,46	-0,16	-0,51	-0,45	-0,52
Lag_max in min	1187	1440	670	1440	820	1440
größter Korr. Koeff.	-0,1	-0,12	-0,05	-0,12	-0,14	-0,16
<i>Korrelation RadonTREND/ poutTREND</i>						
Lag_min in Min	-1162	-1440	-730	-1320	-810	-1440
kleinster Korr.Koeff.	0,0	0,01	0,02	0,03	0,05	0,03
Lag_max in min	1440	1440	1440	1440	1440	1440
größter Korr. Koeff.	0,4	0,388	0,146	0,402	0,353	0,421
<i>Korrelation RadonTREND/ DruckdifferenzTREND</i>						
Lag_min in Min	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440	-1440
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,15	-0,05	-0,23	-0,20	-0,17
Lag_max in min	451	350	460	510	300	570
größter Korr. Koeff.	0,0	-0,021	0,0447	-0,0197	-0,0004	0,0099
<i>Korrelation RadonTREND/LF AußenTREND</i>						
Lag_min in Min	1440	1440	1440	1440	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	0,1	0,014	0,008	0,092	0,145	0,097
Lag_max in min	-859	-960	-1010	-970	-330	-1120
größter Korr. Koeff.	0,2	0,15	0,147	0,232	0,267	0,212
<i>Korrelation RadonTREND/LF InnenTREND</i>						
Lag_min in Min	1440	1440	1440	1440	1440	1440
kleinster Korr.Koeff.	0,2	0,174	0,078	0,241	0,174	0,264
Lag_max in min	-1194	-1440	-1440	-1440	-1440	-500
größter Korr. Koeff.	0,4	0,419	0,203	0,454	0,419	0,478
<i>Korrelation RadonTREND/Wind TREND</i>						
Lag_min in Min	255	210	500	450	-320	490
kleinster Korr.Koeff.	-0,2	-0,239	-0,251	-0,208	-0,191	-0,204
Lag_max in min	1052	1440	-1440	1440	1440	1440
größter Korr. Koeff.	-0,1	-0,169	-0,157	-0,154	-0,050	-0,157
Räume untereinander						
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum UG		-60/0,5	-20/0,4	0/0,6	-30/0,5	0/1
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum EG		-50/0,5 bzw - 30/0,4	-50/0,4 bzw - 20/0,3	20/0,4	-20/0,4	0/0,6 bzw 30/0,5
Korrelation und zeitl. Verzögerung zu Raum OG		20/0,4	-20/0,4	50/0,4 bzw 50/0,5	30/0,4 bzw 20/0,3	20/0,4 bzw 60/0,5