Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

Leitfaden

Abschätzung des Radon-222-Jahresmittelwerts in Innenräumen aus Kurzzeitmessungen

Wien, 2024

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien
Autorinnen und Autoren: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Franz Josef Maringer
Wien, 2024
Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an v8@bmk.gv.at.

Vorwort

Die Ermittlung der mittleren jährlichen Radon-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen erfordert aufgrund der insbesondere jahreszeitlich variierenden meteorologischen Einflussfaktoren grundsätzlich eine Langzeitmessung der Aktivitätskonzentration über einen Zeitraum von mindestens sechs Monaten, wobei mindestens die Hälfte der Messzeit in der Wintersaison liegen muss (festgelegt z.B. für bestimmte Arbeitsplätze in Anlage 2 zu §5 der österreichischen Radonschutzverordnung).

In bestimmten Fällen – z. B. wegen möglicher gesundheitlicher Risiken bei stark erhöhter Radonaktivitätskonzentrationen in Innenräumen, zur raschen Abschätzung der Wirksamkeit einer Radonsanierung an einem Gebäude oder im Zuge von Immobilientransaktionen – ist eine kurzfristige Abschätzung bzw. Ermittlung der durchschnittlichen Radonkonzentration (Jahresmittelwert) wünschenswert bzw. notwendig.

Inhalt

Vorwort **3**

1 Anwendungsbereich **5**

Begriffe und Formelzeichen 5

2 Messtechnische Erhebungen **6**

3 Einflussparameter auf Kurzzeit-Messergebnisse **7**

4 Verfahren zur Abschätzung des Radon-222-Jahresmittelwertes **8**

5 Abschätzung der Unsicherheit des Radon-222-Jahresmittel-Schätzwertes **10**

Zugrundeliegende akademische Arbeiten **11**

Normativer Verweis **12**

Anhang A (informativ) **13**

1 Anwendungsbereich

Der Leitfaden dient zur Abschätzung der mittleren jährlichen Radonaktivitätskonzentration in Innenräumen aus dreiwöchigen Kurzzeitmessungen mittels aktiven Radon-222-Messgeräten unter Berücksichtigung relevanter Einflussparameter.

Begriffe und Formelzeichen

IRC, Bq/m³	Radon-222-Aktivitätskonzentration der Innenraumluft (Indoor Radon Concentration)
SIRC, Bq/m³	IRC-Mittelwert der Kurzzeitmessung (**S**hortterm *IRC*)
LIRC, Bq/m³	IRC-Mittelwert der Langzeitmessung (**L**ongterm *IRC*)
EIRC, Bq/m³	IRC-Jahresmittelwert, abgeschätzt aus einer Kurzzeitmessung (Estimated *IRC*)
c_{Rn}, Bq/m³	Einzelner Messwert der Rn-222-Aktivitätskonzentration (z.B. 10 min-Mittelwert)
u(x)	Einfache (Mess-)Unsicherheit (k=1) des (Mess-)Wertes x (in der jeweiligen Einheit)
u_{rel}(x)	Relative einfache (Mess-)Unsicherheit (k=1) des Messwertes x (bezogen auf den (Mess-)Wert x; evt. in %)
x^*	Mittelwert einer Reihe von Messwerten x in einer Zeitspanne (z.B. Stundenmittelwert, Dreiwochen-Mittelwert, Jahresmittelwert)
s(x)	Relative Standardabweichung einer Reihe von Messwerten x in einer Zeitspanne

2 Messtechnische Erhebungen

Anhand von Radon-222-Messungen mit passiven Radondetektoren (24 Langzeit-Radonmessungen, 6 Monate, davon 3 Monate in der Wintersaison) und aktiven Radonmessgeräten (50 Kurzzeit-Radonmessungen, 3 Wochen) in 24 Wohnräumen in 4 österreichischen Bundesländern im Zeitraum Oktober 2022 bis Juli 2023 wurde untersucht, welche Parameter die *IRC* wesentlich beeinflussen, beziehungsweise welche Faktoren für zeitliche Veränderungen der *IRC* jedenfalls berücksichtigt werden müssen. Die Ergebnisse der Messungen und deren Auswertungen sind in den zugrundeliegenden wissenschaftlich-akademischen Arbeiten (Abschnitt 7) zu finden.

Die physikalisch-statistische Auswertung der Messungen mittels Regressionsanalyse dient als Basis für die Erstellung eines multiplikativen Modells für die Anwendung von Kurzzeitmessungen zur Abschätzung des Radon-222-Jahresmittelwertes in Innenräumen.

3 Einflussparameter auf Kurzzeit-Messergebnisse

Aus dem Ergebnis der physikalisch-statistischen Auswertung messtechnischer Erhebungen mittels Spearman Korrelationsanalyse (ausgeführt mit SPSS-Software) sowie aus physikalischen Überlegungen wurden Einflussparameter identifiziert, in Funktionen getestet und letztendlich festgelegt, welche die *IRC* nachweislich signifikant beeinflussen. Diese Einflussparameter sind für die Abschätzung des Jahresmittelwertes der *IRC* im Messzeitraum der dreiwöchigen Kurzzeitmessungen in geeigneter Weise messtechnisch zu ermitteln bzw. zu beschaffen (z. B. Daten des GeoSphere Austria Data Hub, online):

TDJ	Tag-des-(Kalender-)Jahres (Mitte des Messzeitraumes), Wertebereich 1 – 365
TTX	Außentemperatur, °C, Stunden(mittel)wert (z.B. von GeoSphere Austria Data Hub)
MON	Monat des (Kalender-)Jahres (Mitte des Messzeitraumes), Wertebereich 1 – 12
FFX	relative Außenluftfeuchte, %, Stunden(mittel)wert (z.B. von GeoSphere Austria Data Hub)
VVX	Windgeschwindigkeit, m/s, Stunden(mittel)wert (z.B. von GeoSphere Austria Data Hub)
TIA	Differenz Innentemperatur-Außentemperatur, °C
$s(c_{Rn})$	Relative Standardabweichung der Reihe von Messwerten (z.B. Stundenmittelwerte) der Radon-222-Aktivitätskonzentration, Bq/m³
PPX'	Änderung (zeitlicher Gradient) des Außenluftdruckes in einer Stunde, mbar/h (ermittelt z.B. aus den Stunden(mittel)werten PPX des GeoSphere Austria Data Hub; Achtung: ggf. Seehöhenkorrektur der Luftdruckwerte notwendig)
$PPX'_{<0}$	PPX'-Wert < 0 während der Messreihe, mbar/h
TIA'	Änderung (zeitlicher Gradient) der Differenz Innentemperatur-Außentemperatur in einer Stunde, °C/h
$TIA'_{>0}$	TIA'-Wert > 0 während der Messreihe, °C/h

4 Verfahren zur Abschätzung des Radon-222-Jahresmittelwertes

Aus der Messreihe der Kurzzeitmessung (Stundenmittelwerte c_{Rn}* im Dreiwochen-Messzeitraum) der Radon-222-Aktivitätskonzentration im betreffenden Innenraum ist der Mittelwert *SIRC* der Stundenmittelwerte c_{Rn}* der Radonaktivitätskonzentration, die (einfache) Messunsicherheit des Mittelwertes *u*(*SIRC*) unter Einbeziehung der Unsicherheiten u(c_{Rn}*) der Stundenmittelwerte und die Standardabweichung s(c_{Rn}*) der Stundenmittelwerte c_{Rn}* der Radonaktivitätskonzentration zu ermitteln.

In analoger Weise sind die Messwerte der Einflussparameter (Abschnitt 4) nach dem Stand der Technik messtechnisch bzw. durch Beschaffung der Daten (z.B. Geosphere Austria Data Hub) am oder möglichst nahe dem Messort zu erheben für den Zeitraum der Kurzzeit-Radonmessung auszuwerten (Mittelwerte, Standardabweichung und soweit möglich und zweckmäßig Unsicherheiten).

Mittels Regressionsanalyse – Anpassung von Kurzzeitmessdaten an Langzeitmessdaten unter Berücksichtigung der wesentliche Einflussparameter mit der Methode der kleinsten Quadrate / least-square-fit – wurde ein **multiplikatives Modell zur Abschätzung des Jahresmittelwertes der Radon-222-Aktivitäts¬konzentration EIRC** in einem Innenraum aus den Daten einer Drei-Wochen-Kurzzeitmessung geschaffen:

$$EIRC = SIRC \cdot \prod_i p_i = SIRC \cdot p_{TDJ} \cdot p_{TTX} \cdot p_{MON} \cdot p_{FFX} \cdot p_{VVX} \cdot p_{TIA} \cdot p_{s(cRn)} \cdot p_{PPX'} \cdot p_{TIA'} \cdot p_{sym} \quad (1)$$

mit den Funktionen p_i der Einflussparameter

$$p_{TDJ} = 0{,}905 - 0{,}1992 \cdot \cos(TDJ) \quad (2)$$

$$p_{TTX} = 0{,}875 + 0{,}0227 \cdot TTX^* \quad (3)$$

$$p_{MON} = \text{wenn } (MON>5 \text{ und } MON<9) \text{ dann } 1{,}589 \text{ sonst } 0{,}959 \quad (4)$$

$$p_{FFX} = 0{,}512 + 6{,}24 \cdot 10^{-3} \cdot FFX^* \quad (5)$$

$$p_{VVX} = 1{,}053 - 0{,}0342 \cdot VVX^* \quad (6)$$

$$p_{TIA} = 0{,}978 + 1{,}683 \cdot 10^{-3} \cdot TIA^* \quad (7)$$

$$p_{s(cRn)} = 1{,}111 - 0{,}225 \cdot s_{(cRn)} \quad (8)$$

$$p_{PPX'} = 0{,}881 - 0{,}339 \cdot PPX'_{<0}{}^{*} \quad (9)$$

$$p_{TIA'} = 0{,}674 + 0{,}405 \cdot TIA'_{>0}{}^{*} \quad (10)$$

$$p_{sym} = 0{,}962 \quad (11)$$

Mit den Funktionen (2) bis (10) werden die, in den Arbeiten (Abschnitt 7) mittels Spearman-Korrelationsanalyse sowie aus der Fachliteratur bekannten radioökologisch-physikalischen Zusammenhängen und Regressionsrechnungen gefundenen wesentlichen Einflüsse – sowohl auf den Radoneintritt in den gemessenen Innenraum als auch durch Ventilation (Verdünnung) mit Außenluft – zur Ermittlung der *EIRC* quantitativ berücksichtigt:

p_{TDJ}	saisonaler Einfluss – Winter / Frühling / Sommer / Herbst
p_{TTX}	Außentemperatur
p_{MON}	starke Lüftung während der ‚heißen' Sommermonate Juni bis August
p_{FFX}	relative Außenfeuchte
p_{VVX}	Windstärke am Gebäude
p_{TIA}	Temperaturdifferenz innen-außen
$p_{s(cRn)}$	Variabilität der Radonaktivitätskonzentration während der Kurzzeitmessung
$p_{PPX'}$	Änderung des Außenluftdruckes – negativer Außenluftdruckgradient (Luftdruckgradient-‚Radonpumpe')
$p_{TIA'}$	Änderung der Differenztemperatur innen-außen – positiver Temperaturdifferenzgradient (Temperaturgradient-‚Radonpumpe')

Die Konstante p_{sym} dient zur Einstellung der Symmetrie der Minimal- und Maximal-Werte der Verhältnisse *EIRC/LIRC* um den Optimalwert 1,0 (*EIRC = LIRC*).

5 Abschätzung der Unsicherheit des Radon-222-Jahresmittel-Schätzwertes

Die (einfache) Messunsicherheit *u(EIRC)* der mit Formel (1) abgeschätzten *EIRC* ist nach dem Stand der Technik (z. B. JCGM 100:2008) abzuschätzen.

Dabei ist in geeigneter Weise die Unsicherheit des Mittelwertes *SIRC* der gemessenen Stundenmittelwerte c_{RN}* mit den Unsicherheiten der einzelnen Stundenmittelwerte $u(c_{RN}*)$ zu berechnen. Die Unsicherheiten der einzelnen Stundenmittelwerte – hauptsächlich verursacht durch die Unsicherheit der Kalibrierung des verwendeten Radonmessgerätes und die zählstatistische Unsicherheit – werden in den meisten Fällen von den Radonmessgeräten gemeinsam mit den Stundenmittelwerten ausgegeben: $c_{RN}* \pm u(c_{RN}*)$.

Die relative Unsicherheit $u_{rel}(\prod_i p_i)$ der Funktion $\prod_i p_i$ aus Formel (1) wird durch einen konstanten Beitrag von 3 % zur Gesamtunsicherheit $u_{rel}(EIRC)$ plausibel abgeschätzt:

$$u_{rel}(EIRC) = u_{rel}(SIRC) + 3\ \% \qquad (12)$$

Im **informativen Anhang A** sind die **Ergebnisse der Anwendung des physikalisch-statistischen Modells** zur Anpassung der 50, im Zeitraum Oktober 2022 bis Juli 2023, durchgeführten Radon-Kurzzeitmessungen auf die Ergebnisse der 24 Langzeitmessungen zusammengefasst.

Zugrundeliegende akademische Arbeiten

M. Blum, D. Boya, X. Goidinger, F. J. Maringer, T. Moreau, J. Toth, H. Wiedner, Abschätzung des Jahresmittelwertes der Radonkonzentration in Innenräumen mittels aktiver Kurzzeitmessungen, Tagungsband, 10. Gemeinsame Fachtagung des ÖVS und FS, Hg. F.J. Maringer, H. Völkle, M. Froning, Österreichischer Verband für Strahlenschutz, Fachverband für Strahlenschutz, Seibersdorf, 2023.

M. Blum, Abschätzung des Jahresmittelwertes der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Innenräumen mittels aktiver Kurzzeitmessungen: Messungen im südlichen Niederösterreich, Projektarbeit, TU Wien, 2023.

D. Boya, Abschätzung des Jahresmittelwerts von Radon-222-Konzentrationen in Innenräumen durch aktive Kurzzeitmessungen: Vergleich von aktiven mit passiven Messungen in Oberösterreich, Projektarbeit, TU Wien, 2023.

X.A. Goidinger, Abschätzung des Jahresmittelwerts von Radon-222-Konzentrationen in Innenräumen durch aktive Kurzzeitmessungen: Untersuchung der meteorologischen Einflussfaktoren auf die Radonkonzentration in Privathäusern, Bachelorarbeit, TU Wien, 2023.

J. Toth, Abschätzung des Jahresmittelwerts von Radon-222-Konzentrationen in Innenräumen durch aktive Kurzzeitmessungen: Kalibriermessungen von aktiven Radonmessgeräten, Projektarbeit, TU Wien, 2023.

M. Blum, Neue Kurzzeitmessmethoden für die Ermittlung der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Wohnräumen, Diplomarbeit, TU Wien, 2024 (zum Zeitpunkt der Berichtslegung in Vorbereitung).

Normativer Verweis

JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections), Joint Committee for Guides in Metrology, BIPM Sèvres, 2008 (https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6?version=1.12&t=1696944486074&download=true)

Anhang A (informativ)

Anwendung des Verfahrens auf die durchgeführten Radonmessungen

In der Tabelle A1 ist das Ergebnis der Spearman-Korrelationsanalyse der Radon-222-Stundenmittelwerte der 50 Kurzzeitmessungen von den miterhobenen meteorologischen Parametern angegeben. Daraus ist ersichtlich, dass rund 50 % der Kurzzeitmessserien signifikante Korrelationen (Antikorrelationen) mit p > 0,2 zu den Parametern ‚relative Luftfeuchte außen', ‚Temperatur außen' und ‚Temperaturdifferenz innen-außen' aufweisen. Darüber hinaus wurden geringere Anzahlen signifikanter Zusammenhänge für die Parameter ‚Temperatur innen', ‚relative Luftfeuchte innen', ‚Luftdruck außen', ‚Windgeschwindigkeit' und ‚Luftdruck-Differenz innen-außen' gefunden (Tab. A1).

Tab. A1: Anzahlen der jeweils gefundenen Anti-/Korrelationen mit Spearman-Korrelations-(Signifikanz-) Faktoren p = 0,2 / 0,3 / 0,5 der Radon-222-Stundenmittelwerte der 50 Kurzzeit(-Dreiwochen)-Messserien zu den meteorologischen Parametern p…Luftdruck, T…Temperatur, F…relative Luftfeuchte.

Korrelationen

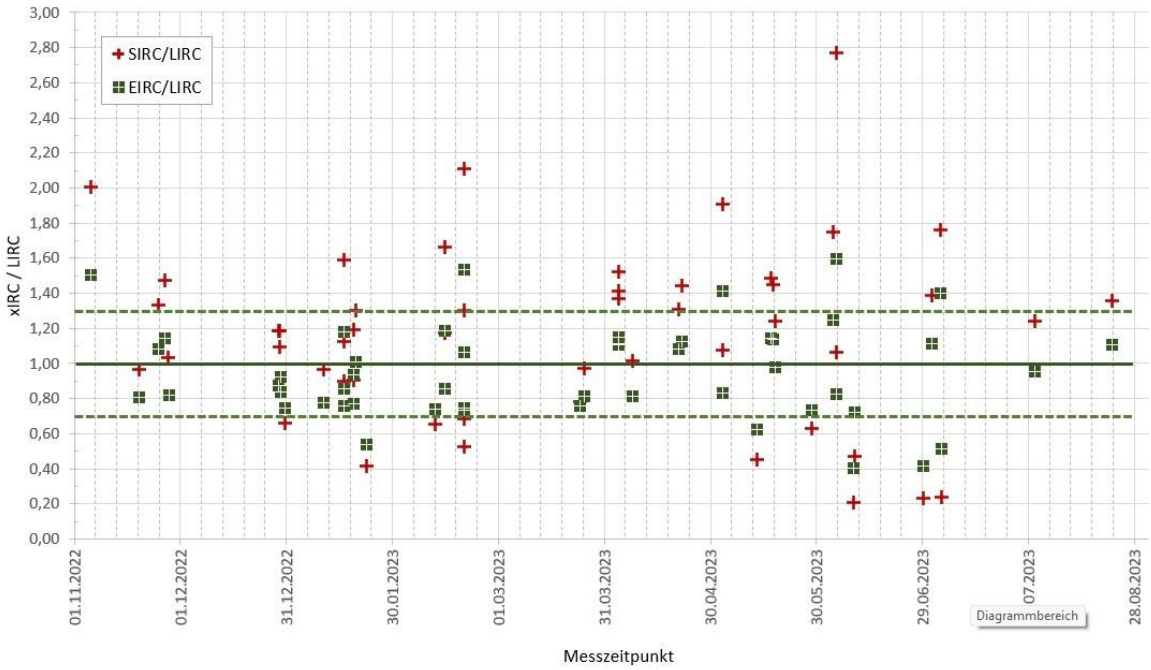
	p_innen	T_innen	F_innen	p_außen	T_außen	F_außen	Niederschlag	Windgeschw	Windri	p_Diff	T_Diff
Summe der Korrelationen (über 0,2)	3	7	**16**	5	3	**25**	1	2	3	**10**	**23**
Summe der Korrelationen (über 0,3)	3	3	**9**	4	3	**20**	1	1	0	4	**17**
Summe der Korrelationen (über 0,5)	1	1	**5**	2	1	**5**	0	0	0	2	**5**
Summe der Antikorrelationen (über 0,2)	7	**18**	5	**10**	**26**	1	2	**16**	4	6	3
Summe der Antikorrelationen (über 0,3)	5	**10**	3	6	**17**	1	0	**8**	1	1	2
Summe der Antikorrelationen (über 0,5)	1	0	0	1	**7**	0	0	2	0	0	1
	von 35	von 50	von 50	von 50	von 50	von 50	von 50	von 50	von 50	von 35	von 50

Im Zuge der durchgeführten Regressionsanalyse wurden auf Basis in der Fachliteratur bekannten physikalischen Überlegungen und den Ergebnissen der vorangegangenen Spearman-Korrelationsanalyse neun Einflussparameter und funktionale Zusammenhänge (Abschnitte 4 und 5) identifiziert, die erfolgreich zur Regression herangezogen werden können. Keine signifikanten Einflüsse auf die Regression konnten für die Parameter ‚Lüftungsgewohnheit der Nutzer', ‚Hanglage des Gebäudes', ‚erdberührter Bauteil am gemessenen Innenraum' gefunden werden.

In Abb. A1 und Abb. A2 sind die Ergebnisse der Regressionsanalyse durch Anpassung der Kurzzeitmessdaten an die Langzeitmessdaten (Methode der kleinsten Quadrate / least-square-fit) unter Einbeziehung der identifizierten Einflussparameter der 50 Kurzzeit- und 24 Langzeit-Rn-222-Messungen in den 24 untersuchten Innenräumen im Zeitraum Oktober 2022 bis Juli 2023 dargestellt. In jedem der 24 Innenräume wurde eine Langzeitmessung und zumindest je eine Kurzzeitmessung in der Winter- und in der Sommersaison, in zwei Innenräumen zusätzlich je eine Messung im Frühjahr, durchgeführt.

In Abb. A1 sind die Verhältniswerte über den Messzeitraum, in Abb. A2 die Verteilungen der Verhältniswerte (aufsteigend sortiert) dargestellt.

Abb. A1: Verhältnisse *SIRC* (Kurzzeitmessung)/*LIRC* (Langzeitmessung) (rot) sowie *EIRC* (Jahresmittel-Schätzwert)/*LIRC* (Langzeitmessung) (grün) der einzelnen Messungen (Messzeitpunkt = Mitte des Messzeitraumes; Unsicherheitsbalken ±3% bis ±11% zur besseren Übersichtlichkeit weggelassen)



Aus Abb. A1 ist ersichtlich, dass durch die Anwendung des physikalisch-statistischen Modells auf Basis der Spearman-Korrelationsanalyse und weiterer physikalischer Überlegungen eine signifikante Verbesserung der Abschätzung des Jahresmittelwertes (*EIRC*) gegenüber den Kurzzeitmessungen (*SIRC*) gelungen ist. Während für 32 von 50

Kurzzeitmessungen (62 %) die Verhältniswerte um mehr als ± 30 % vom Optimalwert 1,0 abweichen, liegen nur mehr 10 von 50 *EIRC*-Werte (20 %) außerhalb des ± 30 %-Intervalls.

Aus Abb. A2 ist ersichtlich, dass für die untersuchten 24 Innenräume sämtliche Verhältnisse *EIRC/LIRC* der 50 Kurzzeitmessungen innerhalb des Intervalls 0,4 bis 1,6 liegen, während die *SIRC/LIRC*-Werte im größeren Intervall 0,2 bis 2,8 liegen.

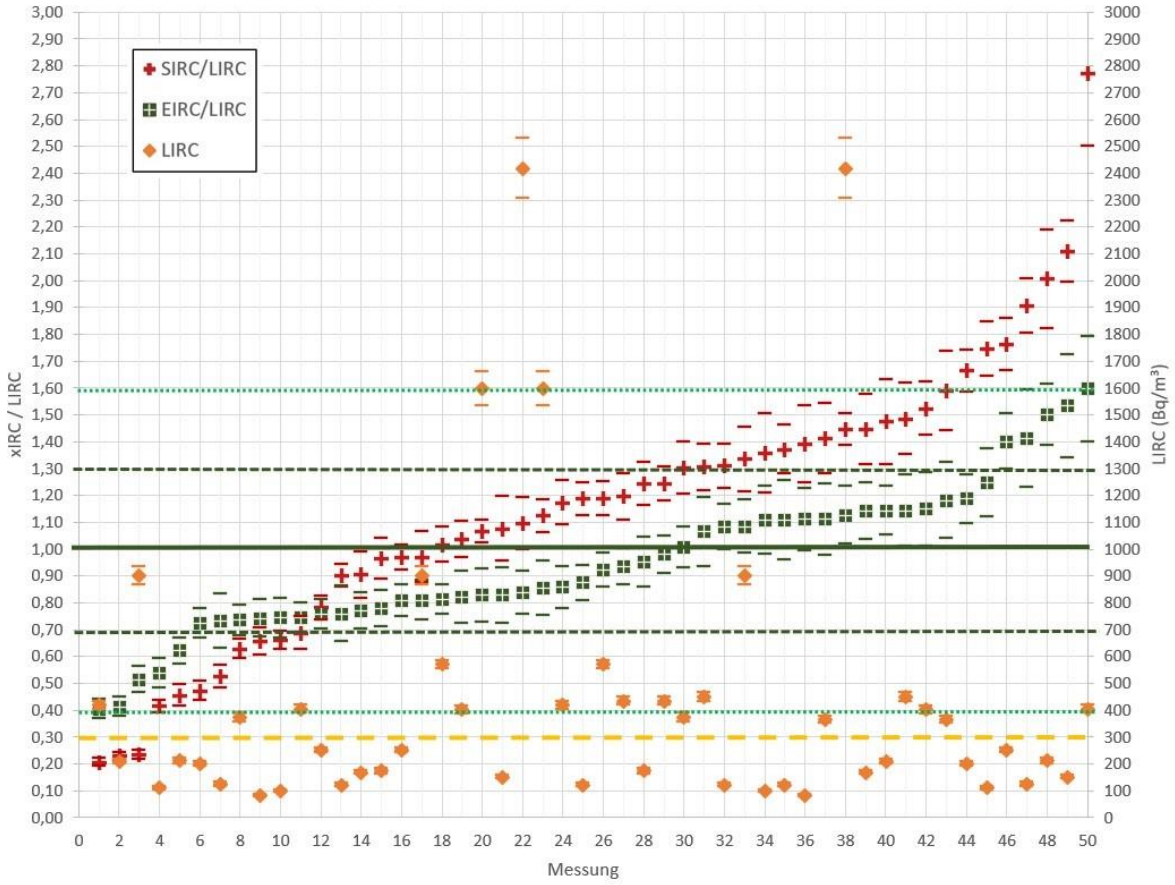
11 von 24 Radon-Langzeitmittelwerte *LIRC* (46%) sind größer als 300 Bq/m³ (Abb. A2; Achtung: Die 24 Langzeitmittelwerte der 24 untersuchten Innenräume sind auf die 50 Kurzzeitmittelwerte verteilt).

Wird mit einer Kurzzeitmessung versucht, die Unterschreitung eines Radon-222-Richt-(Grenz)wertes für den Jahresmittelwert zu überprüfen, kann bei Anwendung des hier vorgelegten Verfahrens der ermittelte *EIRC*-Wert, multipliziert mit dem Sicherheitsfaktor 2,5, zur relativ gut gesicherten Feststellung, ob der Radon-222-Jahresmittel-Grenzwert unterschritten wird, herangezogen werden:

EIRC · 2,5 < Radon-222-Richt-(Grenz)wert

Würde der Kurzzeitmesswert *SIRC* für diese Feststellung herangezogen, müsste der Sicherheitsfaktor 5,0 eingesetzt werden.

Abb. A2: Verhältnisse (mit Unsicherheitsbalken) *SIRC* (Kurzzeitmessung)/*LIRC* (Langzeitmessung) (rot) sowie *EIRC* (Jahresmittel-Schätzwert)/*LIRC*-Langzeitmessung (rot) – aufsteigend sortiert, dazu *LIRC* der Langzeitmessung (orange)



Bei der Anwendung der Ergebnisse die hier durchgeführten Analysen ist zu beachten, dass der messtechnisch ermittelte Langzeitmittelwert *LIRC* (6-Monatsmessung, davon 3 Monate in der Wintersaison) eines Innenraums ebenfalls nur einen, mit Unsicherheit behafteten, Schätzwert des ‚hypothetischen' *IRC*-Jahresmittelwerts darstellt.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
+43 (0) 800 21 53 59
servicebuero@bmk.gv.at
bmk.gv.at