

**DIN IEC/TR 61577-5
(VDE 0493-1-10-5)****DIN**

Dies ist zugleich eine **VDE-Leitlinie** im Sinne von VDE 0022. Sie ist unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.

VDE

ICS 17.240

**Strahlenschutz-Messgeräte –
Geräte für die Messung von Radon und Radon-Folgeprodukten –
Teil 5: Allgemeine Eigenschaften von Radon und Radon-Folgeprodukten
und ihre Messverfahren
(IEC TR 61577-5:2019)**

Radiation protection instrumentation –
Radon and radon decay product measuring instruments –
Part 5: General properties of radon and radon decay products and their measurement methods
(IEC TR 61577-5:2019)

Instrumentation pour la radioprotection –
Instruments de mesure du radon et des descendants du radon –
Partie 5: Propriétés générales et procédures de mesure du radon et des descendants du radon
(IEC TR 61577-5:2019)

Das vorliegende Dokument wurde nach den Verfahrensregeln einer VDE-Leitlinie erstellt und ist die Übernahme eines Technischen Reports der IEC (IEC TR).

Gesamtumfang 58 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE
DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR)

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieses Dokuments ist 2020-11-01.

Inhalt	Seite
Nationales Vorwort.....	5
Nationaler Anhang NA (informativ) Zusammenhang mit europäischen und internationalen Dokumenten	7
Nationaler Anhang NB (informativ) Literaturhinweise.....	9
1 Anwendungsbereich	11
2 Normative Verweisungen	11
3 Symbole, Größen und Einheiten	11
3.1 Symbole.....	11
3.2 Größen und Einheiten	13
4 Radon in der Umgebung	13
4.1 Entstehung, Ausbreitung und Zerfall	13
4.2 Radon im Gestein und im Erdboden und sein Transport in die Atmosphäre.....	14
4.3 Radonkonzentration in der Außenluft.....	15
4.4 Radonkonzentration in Häusern und an Arbeitsplätzen.....	15
5 Radon-Folgeprodukte in der Atmosphäre	16
5.1 Physikalische Vorgänge bei Folgeprodukten in gasförmigen Medien	16
5.2 Merkmale von Aerosolen und ihre Beeinflussung durch die Lüftungsbedingungen	17
6 Physikalische und chemische Eigenschaften von Radon und Radon-Folgeprodukten.....	17
6.1 Physikalische und chemische Eigenschaften	17
6.2 Löslichkeit von Radon in Flüssigkeiten	18
6.3 Radiologische Eigenschaften und radioaktives Gleichgewicht	18
6.4 Wechselwirkung von Alphateilchen mit Materie und ihre Energiedeposition.....	21
7 Messung von ^{222}Rn und ^{220}Rn und ihren Folgeprodukten	22
7.1 Relevante Messgrößen und Einheiten	22
7.1.1 Aktivitätskonzentration (C).....	22
7.1.2 Gleichgewichtsäquivalente Radon-Aktivitätskonzentration (EEC , C_{eq}).....	22
7.1.3 Gleichgewichtsfaktor (F).....	23
7.1.4 Radonexposition (P_{Rn})	23
7.1.5 Potenzielle Alphaenergie (ε_p).....	23
7.1.6 Potenzielle Alpha-Energiekonzentration (C_p).....	24
7.1.7 Potenzielle Alphaenergie-Exposition (P_p)	26
7.1.8 Der nichtangelagerte und der angelagerte Anteil der potenziellen Alpha-Energiekonzentration	26
7.2 Geräte zur Messung der Radon-Aktivitätskonzentration in Luft.....	26
7.3 Messung von Radon-Folgeprodukten	27

7.3.1	Allgemeiner Überblick über die Messgeräte	27
7.3.2	Probenahme von nichtangelagerten Radon-Folgeprodukten	28
7.3.3	Zählverfahren zur Messung der Aktivitätskonzentrationen und der potenziellen Alpha-Energiekonzentration	29
8	Qualitätssicherung	34
8.1	Definition und Nutzen	34
8.2	Qualitätskontrolle	34
8.3	Validierung und Rückführbarkeit von Messungen	34
8.3.1	Validierung von Verfahren	34
8.3.2	Typprüfung von Radonmessgeräten.....	35
8.3.3	Messvergleiche zwischen Laboratorien	35
8.3.4	Messtechnische Rückführung und Kalibrierung	35
9	Bestimmung der Messunsicherheit, der Erkennungs- und der Nachweisgrenze	36
9.1	Allgemeines	36
9.2	Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit	36
Anhang A (informativ) Tabellen und Bilder		38
Anhang B (informativ) Radioaktive Zerfallsgleichungen		43
B.1	Allgemeines	43
B.2	Symbole	43
B.3	Vorbetrachtungen und Annahmen	43
B.4	Aufbau der Filteraktivität während der Probenahme	44
B.5	Abnahme der Filteraktivität nach Beendigung der Probenahme	45
B.6	Anzahl der nach der Probenahme zu registrierenden Alphazerfälle	47
Anhang C (informativ) Analyse der Unsicherheit bei der Bestimmung der Aktivitätskonzentration von Radon- und Thoron-Folgeprodukten mittels des Verfahrens der mehrfach aufeinanderfolgenden Zählungen		49
C.1	Symbole	49
C.2	Unsicherheiten der Parameter der Modellfunktion.....	49
C.3	Erkennungsgrenze	52
C.4	Nachweisgrenze.....	53
C.5	Grenzen des Vertrauensbereichs	53
C.6	Bester Schätzwert und seine Unsicherheit	54
Literaturhinweise		55

Bilder

Bild 1 – Tägliche Schwankungen der Radonaktivitätskonzentration in Keller, 1. und 2. Etage eines Einfamilienhauses gemessen über 12 Tage	16
Bild 2 – Zerfall von ^{222}Rn nach Zufuhr von 1 000 Bq und Bildung von Folgeprodukten	19
Bild 3 – Zerfall von ^{220}Rn (Thoron) nach Zufuhr von 1 000 Bq und Bildung von Folgeprodukten.....	19
Bild 4 – Aktivitätsaufbau von ^{222}Rn und seinen Folgeprodukten für eine kontinuierliche Zufuhr von ^{222}Rn mit einer Rate von 1 Bq/s (ohne Anfangsaktivitäten)	20

Bild 5 – Aktivitätsaufbau von ^{220}Rn (Thoron) und seinen Folgeprodukten für eine kontinuierliche Zufuhr von ^{220}Rn mit einer Rate von 1 Bq/s (ohne Anfangsaktivität)	20
Bild 6 – Gesamtes Bremsvermögen der in verschiedene Materialien eindringenden Alphateilchen, die Diagramme verwenden Daten aus	21
Bild 7 – Beiträge der einzelnen Depositionsprozesse zur Gesamteffektivität (exemplarisch für ein Drahtsieb berechnet)	28
Bild 8 – Abscheidungseffektivität eines Drahtsiebs in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit (exemplarisch für ein Drahtsieb berechnet)	28
Bild 9 – Messabweichung des Verfahrens nach MARKOV, angegeben in Prozent für verschiedene Verhältnisse von Folgeprodukten in der Luftprobe	31
Bild 10 – Verfahren der mehrfachen sukzessiven Zählung	32
Bild A.1 – Probenahme und Messverfahren, die für Radonmessgeräte üblicherweise verwendet werden	38
Bild A.2 – Probenahme und Messverfahren, die für Messgeräte für Radon-Folgeprodukte üblicherweise verwendet werden	38
Bild B.1 – Schematische Darstellung von Probenahme und Messung	47

Tabellen

Tabelle 1 – Koeffizienten für die Berechnung der gleichgewichtsäquivalenten Konzentration aus gemessenen Aktivitätskonzentrationen von Radon-Folgeprodukten	22
Tabelle 2 – Potenzielle Alphaenergie je Atom für ^{222}Rn -Folgeprodukte einschließlich Standardunsicherheiten	25
Tabelle 3 – Potenzielle Alphaenergie je Atom für ^{220}Rn -Folgeprodukte einschließlich Standardunsicherheiten	25
Tabelle 4 – Zeitschema des Verfahrens von Thomas	30
Tabelle 5 – Zeitschema des Verfahrens von MARKOV	31
Tabelle A.1 – Physikalische und chemische Eigenschaften	39
Tabelle A.2 – ^{226}Ra , ^{222}Rn und Radionuklide der ^{222}Rn -Zerfallsreihe	39
Tabelle A.3 – ^{224}Ra , ^{220}Rn und Radionuklide der ^{220}Rn -Zerfallsreihe	40
Tabelle A.4 – Reichweite bei kontinuierlichem Energieverlust (CSDA) von Alphateilchen, die von ^{222}Rn - und ^{220}Rn -Folgeprodukten emittiert werden	41
Tabelle A.5 – Löslichkeit von Radon in organischen Stoffen	41
Tabelle A.6 – Diffusionskoeffizienten und Diffusionslängen für Radon in verschiedenen Materialien	42

Nationales Vorwort

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium GK 851 „Aktivitätsmessgeräte für den Strahlenschutz“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DKE (www.dke.de) und DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Die VDE-Leitlinien enthalten sicherheitstechnische Festlegungen mit einem im Vergleich zu den VDE-Bestimmungen wesentlich erweiterten Ermessensraum für eigenverantwortliches sicherheitstechnisches Handeln.

VDE-Leitlinien sind angebracht, wenn die Vielfalt der zu betrachtenden Sachlagen oder Gestaltungsmöglichkeiten nach vorherrschender Meinung durch unmittelbar anwendbare Anweisungen nicht erfasst werden kann. Sie dienen dem Anwender als Beispielsammlung oder Grundlage für eigene sicherheitstechnische Entscheidungen. Für sich allein sind sie nicht als ausreichende Entscheidungsgrundlage für die Genehmigungs- und Überwachungsbehörden oder die Anwender geeignet.

VDE-Leitlinien sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerks.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom SC 45B „Radiation protection instrumentation“ des IEC/TC 45 „Nuclear instrumentation“ erarbeitet und unterliegt dem Copyright der IEC .

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieses Dokuments bis zu dem Datum (stability date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu diesem Dokument angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees das Dokument

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Zu Radon-Messgeräten bestehen in der Reihe DIN IEC 61577 (VDE 0491-1-10-x) bzw. DIN EN 61577 (VDE 0491-1-10-x) unter dem Haupttitel *Strahlenschutz-Messgeräte – Geräte für die Messung von Radon und Radon-Folgeprodukten* die folgenden Teile:

- *Teil 1: Allgemeine Anforderungen*
- *Teil 2: Besondere Anforderungen für Messgeräte für Rn-222 und Rn-220*
- *Teil 3: Besondere Anforderungen an Messgeräte für Radon-Folgeprodukte*
- *Teil 4: Einrichtungen für die Herstellung von Referenzatmosphären mit Radonisotopen und ihren Folgeprodukten (STAR)*
- *Teil 5: Allgemeine Eigenschaften von Radon und Radon-Folgeprodukten und ihre Messverfahren*

Die Reihe DIN (EN) ISO 11665 (VDE 0491-1-x) besteht unter dem Haupttitel *Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt – Luft: Radon-222* aus den folgenden Teilen:

- *Teil 1: Radon und seine kurzlebigen Folgeprodukte: Quellen und Messverfahren*
- *Teil 2: Integrierendes Messverfahren für die Bestimmung des Durchschnittswertes der potenziellen Alpha-Energiekonzentration der kurzlebigen Radon-Folgeprodukte*
- *Teil 3: Punktmessverfahren der potenziellen Alpha-Energiekonzentration der kurzlebigen Radon-Folgeprodukte*

- *Teil 4: Integrierendes Messverfahren zur Bestimmung des Durchschnittwertes der Aktivitätskonzentration mittels passiver Probenahme und zeitversetzter Auswertung*
- *Teil 5: Kontinuierliche Messverfahren für die Aktivitätskonzentration*
- *Teil 6: Punktmessverfahren für die Aktivitätskonzentration*
- *Teil 7: Anreicherungsverfahren zur Abschätzung der Oberflächenexhalationsrate*
- *Teil 8: Methodik zur Erstbewertung sowie für zusätzliche Untersuchungen in Gebäuden*
- *Teil 9: Bestimmung der Exhalationsrate aus Baumaterialien*
- *Teil 11: Verfahren zur Probenahme und Prüfung von Bodenluft*
- *Teil 12: Bestimmung des Diffusionskoeffizienten in wasserundurchlässigen Materialien: Prüfverfahren mit einseitiger Messung der Aktivitätskonzentration*
- *Teil 13: Bestimmung des Diffusionskoeffizienten in wasserundurchlässigen Materialien: Prüfverfahren mit beidseitiger Messung der Aktivitätskonzentration*

Bezüglich der Messung von Radon-220 gilt:

- **DIN EN ISO 16641 (VDE 0493-1-6641):2016-05**, *Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt – Luft – Radon-220: Integrierende Messmethoden für die Bestimmung der mittleren Aktivitätskonzentration mit passiven Festkörperspurdetektoren (ISO 16641:2014); Deutsche Fassung EN ISO 16641:2016*

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit europäischen und internationalen Dokumenten

Für den Fall einer undatierten Verweisung im Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ist nachstehend wiedergegeben.

Tabelle NA.1 (1 von 2)

Europäisches Dokument	Internationales Dokument	Deutsches Dokument	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 60050-393	a	–
–	IEC 60050-395	a	–
–	IEC 61577-1	DIN IEC 61577-1 (VDE 0493-1-10-1)	VDE 0493-1-10-1
EN 61577-2	IEC 61577-2	DIN EN 61577-2 (VDE 0493-1-10-2)	VDE 0493-1-10-2
EN 61577-3	IEC 61577-3	DIN EN 61577-3 (VDE 0493-1-10-3)	VDE 0493-1-10-3
EN 61577-4	IEC 61577-4	DIN EN 61577-4 (VDE 0493-1-10-4)	VDE 0493-1-10-4
–	IEC TR 62461:2015	DIN IEC/TR 62461 (VDE 0493-1000):2015-07	VDE 0493-1000
–	ISO/IEC Guide 98-3: 2008	– ^b	–
EN ISO 11665-2	ISO 11665-2	DIN EN ISO 11665-2 (VDE 0493-1-6652)	VDE 0493-1-6652
EN ISO 11665-3	ISO 11665-3	DIN EN ISO 11665-3 (VDE 0493-1-6653)	VDE 0493-1-6652
–	ISO 11665-4	DIN ISO 11665-4 (VDE 0493-1-6654)	VDE 0493-1-6654
EN ISO 11665-5	ISO 11665-5	DIN EN ISO 11665-5 (VDE 0493-1-6655)	VDE 0493-1-6655
EN ISO 11665-6	ISO 11665-6	DIN EN ISO 11665-6 (VDE 0493-1-6656)	VDE 0493-1-6656

Tabelle NA.1 (2 von 2)

Europäisches Dokument	Internationales Dokument	Deutsches Dokument	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	ISO 11929:2010 <i>ersetzt durch:</i>	DIN ISO 11929:2011-01 <i>ersetzt durch:</i>	–
–	ISO 11929-1:2019	DIN ISO 11929-1 (VDE 0493-9291):2020-03	VDE 0493-9291
–	ISO 11929-2:2019	DIN ISO 11929-2 (VDE 0493-9292):2020-03	VDE 0493-9292
–	ISO 11929-3:2019	DIN ISO 11929-3 (VDE 0493-9293):2020-03	VDE 0493-9293
–	ISO 11929-4 ^c	DIN ISO 11929-4 (VDE 0493-9294) ^c	VDE 0493-9294
EN ISO 13164-1	ISO 13164-1	DIN EN ISO 13164-1 ^c	–
EN ISO 13164-2	ISO 13164-2	DIN EN ISO 13164-2 ^c	–
EN ISO 13164-3	ISO 13164-3	DIN EN ISO 13164-3 ^c	–
EN ISO 13164-4	ISO 13164-4	DIN EN ISO 13164-4 ^c	–
EN ISO 16641	ISO 16641	DIN EN ISO 16641 (VDE 0493-1-6641)	VDE 0493-1-6641
EN ISO/IEC 17025	ISO/IEC 17025	DIN EN ISO/IEC 17025	–
^a „Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Deutsche Ausgabe“, Online-Zugang: http://www.dke.de/dke-iev . ^b Siehe jedoch DIN IEC/TR 62461 (VDE 0493-1000):2015-07. ^c In Vorbereitung.			

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 61577-2 (VDE 0493-1-10-2), Strahlenschutz-Messgeräte – Geräte für die Messung von Radon und Radon-Folgeprodukten – Teil 2: Besondere Anforderungen für Messgeräte für Rn-222 und Rn-220

DIN EN 61577-3 (VDE 0493-1-10-3), Strahlenschutz-Messgeräte – Geräte für die Messung von Radon und Radon-Folgeprodukten – Teil 3: Besondere Anforderungen an Messgeräte für Radonfolgeprodukte

DIN EN 61577-4 (VDE 0493-1-10-4), Strahlenschutz-Messgeräte – Geräte für die Messung von Radon und Radon-Folgeprodukten – Teil 4: Einrichtungen für die Herstellung von Referenzatmosphären mit Radonisotopen und ihren Folgeprodukten (STAR)

DIN EN ISO 11665-2 (VDE 0493-1-6652), Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt – Luft: Radon-222 – Teil 2: Integrierendes Messverfahren für die Bestimmung des Durchschnittswertes der potenziellen Alpha-Energiekonzentration der kurzlebigen Radon-Folgeprodukte

DIN EN ISO 11665-3 (VDE 0493-1-6653), Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt – Luft: Radon-222 – Teil 3: Punktmessverfahren der potenziellen Alpha-Energiekonzentration der kurzlebigen Radon-Folgeprodukte

DIN EN ISO 11665-5 (VDE 0493-1-6655), Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt – Luft: Radon-222 – Teil 5: Kontinuierliches Messverfahren für die Aktivitätskonzentration

DIN EN ISO 11665-6 (VDE 0493-1-6656), Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt – Luft: Radon-222 – Teil 6: Punktmessverfahren für die Aktivitätskonzentration

DIN EN ISO 13164-1 (in Vorbereitung), Wasserbeschaffenheit – Radon 222 – Teil 1: Grundlagen

DIN EN ISO 13164-2 (in Vorbereitung), Wasserbeschaffenheit – Radon-222 – Teil 2: Verfahren mittels Gammaskpektrometrie

DIN EN ISO 13164-3 (in Vorbereitung), Wasserbeschaffenheit – Radon-222 – Teil 3: Verfahren mittels Emanometrie

DIN EN ISO 13164-4 (in Vorbereitung), Wasserbeschaffenheit – Radon-222 – Teil 4: Verfahren mittels zweistufiger Flüssigszintillationszählung

DIN EN ISO 16641 (VDE 0493-1-6641), Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt – Luft – Radon-220: Integrierende Messmethoden für die Bestimmung der mittleren Aktivitätskonzentration mit passiven Festkörperspurdetektoren

DIN EN ISO/IEC 17025, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien

DIN IEC 61577-1 (VDE 0493-1-10-1), Strahlenschutz-Messgeräte – Geräte für die Messung von Radon und Radon-Folgeprodukten – Teil 1: Allgemeine Anforderungen

DIN IEC/TR 62461 (VDE 0493-1000):2015-07, Strahlenschutz-Messgeräte – Bestimmung der Unsicherheit beim Messen (IEC/TR 62461:2015)

DIN ISO 11665-4 (VDE 0493-1-6654), Messung der Radioaktivität in der Umwelt – Luft: Radon-222 – Teil 4: Integrierendes Messverfahren zur Bestimmung des Durchschnittswertes der Aktivitätskonzentration mittels passiver Probenahme und zeitversetzter Auswertung

DIN IEC/TR 61577-5 (VDE 0493-1-10-5):2020-11

DIN ISO 11929 Beiblatt 1:2014-08, *Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung – Grundlagen und Anwendungen; Beiblatt 1: Beispiele*

DIN ISO 11929-1 (VDE 0493-9291):2020-03, *Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Überdeckungsintervalls) bei Messungen ionisierender Strahlung - Grundlagen und Anwendungen – Teil 1: Elementare Anwendungen (ISO 11929-1:2019)*

DIN ISO 11929-2 (VDE 0493-9292):2020-03, *Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Überdeckungsintervalls) bei Messungen ionisierender Strahlung – Grundlagen und Anwendungen – Teil 2: Fortgeschrittene Anwendungen (ISO 11929-2:2019)*

DIN ISO 11929-3 (VDE 0493-9293):2020-03, *Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Überdeckungsintervalls) bei Messungen ionisierender Strahlung - Grundlagen und Anwendungen – Teil 3: Anwendung von Entfaltungstechniken (ISO 11929-3:2019)*

DIN ISO 11929-4 (VDE 0493-9294) (in Vorbereitung), *Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung – Teil 4: Anwendungsleitfaden*

Strahlenschutz-Messgeräte

Geräte für die Messung von Radon und Radon-Folgeprodukten

Teil 5: Allgemeine Eigenschaften von Radon und Radon-Folgeprodukten und ihre Messverfahren

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der IEC 61577 enthält grundlegende Daten und technische Informationen, um das Design von Geräten und deren praktische Anwendung für die Messung zu unterstützen. Das Dokument umfasst ^{222}Rn und ^{220}Rn und deren kurzlebige Folgeprodukte. Es unterstützt die Anwendung der technischen Normen der Reihe IEC 61577 und enthält physikalische und technische Grundlagen der Messverfahren. Für weitere Informationen wird auf die Literaturhinweise verwiesen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Ergänzungen zum vorliegenden Dokument darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 61577-1, *Radiation protection instrumentation – Radon and radon decay product measuring instruments – Part 1: General principles*

IEC 61577-2, *Radiation protection instrumentation – Radon and radon decay product measuring instruments – Part 2: Specific requirements for ^{222}Rn and ^{220}Rn measuring instruments*

IEC 61577-3, *Radiation protection instrumentation – Radon and radon decay product measuring instruments – Part 3: Specific requirements for radon decay product measuring instruments*

IEC 61577-4, *Radiation protection instrumentation – Radon and radon decay product measuring instruments – Part 4: Equipment for the production of reference atmospheres containing radon isotopes and their decay products (STAR)*

IEC TR 62461:2015, *Radiation protection instruments – Determination of uncertainty in measurement*

3 Symbole, Größen und Einheiten

3.1 Symbole

L	Ostwald-Koeffizient
$C_{\text{Rn,liquid}}, C_{\text{Rn}}$	Aktivitätskonzentration von Radon in einer Flüssigkeit, Aktivitätskonzentration von Radon in Luft in Becquerel je Kubikmeter ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)
$T_{\text{H}_2\text{O}}$	Temperatur von Wasser in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$)
A, A_i	Aktivität, Aktivität des Radionuklids i in Becquerel (Bq)
λ_i	Radioaktive Zerfallskonstante des Radionuklids i in je Sekunde (s^{-1})
Q_i	Zufuhrtrate, Entstehungsrate des Radionuklids i in je Sekunde (s^{-1})
t, t_s	Zeit, Probenahmezeit in Sekunden (s)
V	Volumen in Kubikmeter (m^3)

EEC, C_{eq}	Gleichgewichtsäquivalente Konzentration in Becquerel je Kubikmeter ($Bq \cdot m^{-3}$)
K_i	Wert zur Gewichtung des Radionuklids i
C_p	Potenzielle Alpha-Energiekonzentration in Joule je Kubikmeter ($J \cdot m^{-3}$)
F	Gleichgewichtsfaktor
P_{Rn}	Radonexposition in Becquerel-Stunden je Kubikmeter ($Bq \cdot h \cdot m^{-3}$)
ε_p	Potenzielle Alphaenergie in Joule (J)
N_i	Anzahl der Atome des Radionuklids i
P_p	Potenzielle Alphaenergie-Exposition in Joule-Stunden je Kubikmeter ($J \cdot h \cdot m^{-3}$)
$u(x)$	Standardunsicherheit der Größe x
$U(x)$	Erweiterte Unsicherheit $U(x) = k \cdot u(x)$ mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$
V	Volumenstrom der Luft in Liter je Minute ($m^3 s^{-1}$) ^{N1}
I_i	Anzahl der Zählereignisse für das Radionuklid i
$\varepsilon, \varepsilon_s, \varepsilon_{si}, \varepsilon_c, \varepsilon_{ci}$	Effektivität, Effektivität der Probenahme, Effektivität der Probenahme des Radionuklids i , Zähleffektivität für das Radionuklid i
α_k, α	Zeitdauer vom Ende der Probenahme bis zum Beginn des Zeitintervalls k , Zeitpunkt bei welchem das Zählintervall beginnt, in Sekunden (s)
β_k, β	Zeitdauer vom Ende der Probenahme bis zum Ende des Zeitintervalls k , Zeitpunkt bei welchem das Zählintervall endet, in Sekunden (s)
D_k	Koeffizienten des Vektors D : Anzahl der Alphazerfälle, die während des k -ten Zeitintervalls beobachtet werden (Dauer der Zählung von α_k bis β_k)
$a_{k,i}(\alpha_k, \beta_k)$	Koeffizienten der Matrix A : i -ter Koeffizient der k -ten Bestimmung innerhalb der Grenzen α_k und β_k
$N_i(t_s)$	Koeffizienten des Vektors N : enthält die fünf unbekannten kurzlebigen Folgeprodukte von ^{222}Rn und ^{220}Rn , die auf dem Filter während der Probenahmezeit t_s abgeschieden wurden
C_i	Koeffizienten des Vektors C : mittlere Aktivitätskonzentration der fünf kurzlebigen Folgeprodukte in der beprobten Luft
A, A^T, C, D, N, M	Matrizen und Vektoren (A^T ist die transponierte Matrix von A)
$\kappa_k, \eta_{k,l}$	Substitutionen (im Text erklärt)
M	Ergebnisgröße der linearen Modellfunktion, h
$h(X_1, \dots, X_T)$	Lineare Modellfunktion mit den Eingangsgrößen $X_1, \dots, X_T$
$X_1, \dots, X_T$	Eingangsgrößen des linearen Modells, h
$\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_T$	Beste Schätzer der Eingangsgrößen
$u_{rel}(x)$	Relative Standardunsicherheit der Größe x
$C_1, \dots, C_T$	Sensitivitätskoeffizient

^{N1} Nationale Fußnote: Die Einheit ist hier Kubikmeter je Minute.

Die Indizes i beziehen sich auf die folgenden Radionuklide:

Index $i = 1$ bezieht sich auf ^{218}Po

Index $i = 2$ bezieht sich auf ^{214}Pb

Index $i = 3$ bezieht sich auf $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Po}$

Index $i = 4$ bezieht sich auf ^{212}Pb

Index $i = 5$ bezieht sich auf ^{212}Bi

Index $i = 5'$ bezieht sich auf ^{212}Po

3.2 Größen und Einheiten

In diesem Dokument werden Einheiten des Internationalen Systems (SI) verwendet¹. Die Definitionen der Strahlungsgrößen sind in IEC 60050-393 und IEC 60050-395 enthalten. Die entsprechenden alten Einheiten (nicht SI) sind in Klammern angegeben.

Vielfache und Teilmultiplikatoren von SI-Einheiten werden, wenn möglich, nach dem SI-System verwendet.

4 Radon in der Umgebung

4.1 Entstehung, Ausbreitung und Zerfall

Die Schwermetalle Uran und Thorium sind natürliche Bestandteile der Lithosphäre. Beide Elemente können in unterschiedlichen Mengen in Mineralien, in Böden und im Wasser nachgewiesen werden. Die durchschnittliche Konzentration in der Lithosphäre für Uran liegt zwischen 2,5 mg/kg und 4 mg/kg und für Thorium bei 13 mg/kg [1]². Natürlich vorkommendes Uran ist eine Mischung aus drei Isotopen: 99,27 % ^{238}U , 0,72 % ^{235}U und 0,01 % ^{234}U . Die primordialen Radionuklide ^{238}U und ^{232}Th sind die Mutter-Nuklide der Zerfallsketten, aus denen ^{222}Rn bzw. ^{220}Rn gebildet werden.

Das direkte Mutternuklid von ^{222}Rn ist ^{226}Ra und von ^{220}Rn ist es ^{224}Ra . ^{226}Ra hat früher als Leuchtfarbe für Zifferblätter von Uhren und Messgeräten technische Bedeutung erlangt. Die beim Zerfall von Radium emittierten Alphateilchen regen eine phosphoreszierende Lumineszenz an. ^{226}Ra wurde auch als Strahlenquelle in der Medizin eingesetzt.

Im Gegensatz zu allen anderen Radionukliden der ^{238}U - und ^{232}Th -Zerfallsketten sind Radonisotope gasförmig. Radon ist wasserlöslich. Insbesondere kann ^{222}Rn im Grundwasser angereichert werden, wenn die Grundwasserschichten erhöhte Werte der natürlichen Radioaktivität enthalten (z. B. Granit). Eine technische Anwendung der Radonisotope ist nicht bekannt. In der Medizin wird Radon zur Behandlung von chronischen Erkrankungen des Bewegungsapparates eingesetzt. Typische Indikation für eine Radontherapie sind häufig rheumatische Erkrankungen der Gelenke [2].

Erhöhte Radonkonzentrationen wurden meist an untertägigen Arbeitsplätzen (Bergbau), in Radonbädern oder in Wasserwerken festgestellt. Erhöhte Konzentrationen von ^{222}Rn in Häusern und anderen Gebäuden können besonders dann auftreten, wenn eine hohe Konzentration von ^{222}Rn im Erdboden vorliegt und Radon durch Wege in den erdbodenberührenden Bauelementen in das Haus eindringt. Erhöhte Expositionen gegenüber ^{220}Rn werden überwiegend auf thoriumhaltige Baustoffe (z. B. Lehm- und Tonbaustoffe) zurückgeführt [3].

¹ Internationales Büro für Maße und Gewichte: Das Internationale Einheitensystem, 8. Edition, 2006

² Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf die Literaturhinweise im Anhang.

Die Hauptquelle für den Strahlungseffekt wird nicht auf die Inhalation von Radon selbst zurückgeführt, sondern auf die gleichzeitige Inhalation seiner kurzlebigen Folgeprodukte, die meist an Aerosolpartikel gebunden sind. Die kurzlebigen ^{222}Rn -Folgeprodukte sind ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi und ^{214}Po und jene von ^{220}Rn sind ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi und ^{212}Po . Die kurzlebigen Folgeprodukte lagern sich in den Atemwegen ab und zerfallen dort. Alphateilchen, die von ^{218}Po und ^{214}Po bzw. ^{212}Bi und ^{212}Po emittiert werden, übertragen ihre Energie entlang ihres Weges auf die strahlungsempfindlichen Zellen. Dies kann gesundheitliche Effekte verursachen. ^{216}Po ist eine Ausnahme. Aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit zerfällt es beim Einatmen und trägt daher nicht wesentlich zur Exposition der Lunge bei.

Während die ^{220}Rn -Zerfallskette mit dem stabilen Bleisotop ^{208}Pb endet, folgen bei der ^{222}Rn -Zerfallskette nach den kurzlebigen Folgeprodukten weitere Stufen: ^{210}Pb , ^{210}Bi und ^{210}Po , bis sie schließlich mit dem stabilen Bleisotop ^{206}Pb endet. Aufgrund der langen Halbwertszeit von ^{210}Pb mit mehr als 20 Jahren werden die restlichen Radionuklide durch biokinetische Prozesse aus den Atemwegen entfernt, ausgeschieden oder hauptsächlich in die mineralischen Bestandteile der Knochen eingelagert [4]. Im Hinblick auf den Strahlenschutz sind die Strahlenwirkungen der langlebigen Radionuklide nicht relevant.

4.2 Radon im Gestein und im Erdboden und sein Transport in die Atmosphäre

In Gesteinen und Böden erfolgt die permanente Erzeugung von Radon durch den Alphazerfall von Radium. Radonotope unterliegen auf ihrem Weg von der Entstehung bis zur Atmosphäre verschiedenen Prozessen.

Die Emanation ist die Freisetzung von Radon aus der festen, meist kristallinen Phase von Gesteinen und Böden in das freie Porenvolumen, Mikrorisse und Risse des Untergrunds. Die Menge, die das Verhältnis zwischen der Anzahl der aus der Festphase entwichenen Radonotope und der Gesamtanzahl der in der Festphase gebildeten Radonotope definiert, ist der Radon-Emanationskoeffizient. Der Vorgang der Freisetzung wird durch den Rückstoß aufgrund des Alphazerfalls eingeleitet. Die Effektivität dieses Prozesses hängt von der Verteilung des Radiums im Mineralkorn ab. Der Hauptteil des Radons entweicht aus Radium, das sich auf der Oberfläche des Mineralkorns oder unterhalb der Oberfläche in Tiefen, die geringer sind als die Rückstoßdistanz, befindet. Eine Freisetzung von Radon aus dem Mineralkorn ist nur möglich, wenn genügend Wege im Inneren des Kornes vorhanden sind. Sehr wichtig für die Freisetzung ist daher die Korngrößenverteilung.

Das Vorhandensein von Wasser kann die Radonabgabe erhöhen. Durch die Adsorption der kinetischen Energie bleiben Radonotope weiterhin im Porenwasser und können durch Diffusion das luftgefüllte Porenvolumen erreichen. Das Maximum der Radonfreisetzung aus Böden und Gesteinen wird bei verschiedenen Feuchtigkeiten erreicht. Mit zunehmender Füllung des Porenvolumens mit Wasser wird der Anteil in der Gasphase geringer, und die Weiterleitung in den Porenvolumina durch die sich ausbildenden Menisken gestört. Zwischen trockenem und feuchtem Gestein kann die Emanation um den Faktor 5 variieren [5].

Die Bewegung von Radon durch Gesteine und Böden wird als Migration bezeichnet. Sie unterliegt den geomechanischen und hydrologischen Bedingungen im Untergrund (Durchlässigkeit, Spaltungen, Grundwasser- und Bodenluftströmung). Der Haupttransportprozess ist die Diffusion, die durch Konvektion als zusätzlichen Prozess ergänzt werden kann. Die Diffusion ist der durch den Konzentrationsgradienten verursachte Massentransport von Radon durch das interkristalline Volumen, die Kapillaren und die feinen Poren. Der Diffusionskoeffizient ist ein Maß für die durch den Konzentrationsgradienten erzwungene Bewegung. In [Tabelle A.6](#) sind die effektiven Diffusionskoeffizienten für verschiedene Materialien angegeben. Die Koeffizienten berücksichtigen die Verlängerung des Diffusionswegs aufgrund von Verzweigungen von Poren, die das Gas um die festen Partikel herumleiten (Tortuosität).

Durch Konvektion wird Radon zusammen mit den Trägermedien, wie Grundwasser oder Bodenluft, transportiert. Der konvektive Radontransport kann zu Radonanomalien führen. Im Untergrund kanalisieren Spaltungen und Störungen die Bewegung radonhaltiger Gase oder Grundwasser, was zu einer inhomogenen Verteilung der Radonkonzentration weit weg vom Ursprung der Radonotope führt.

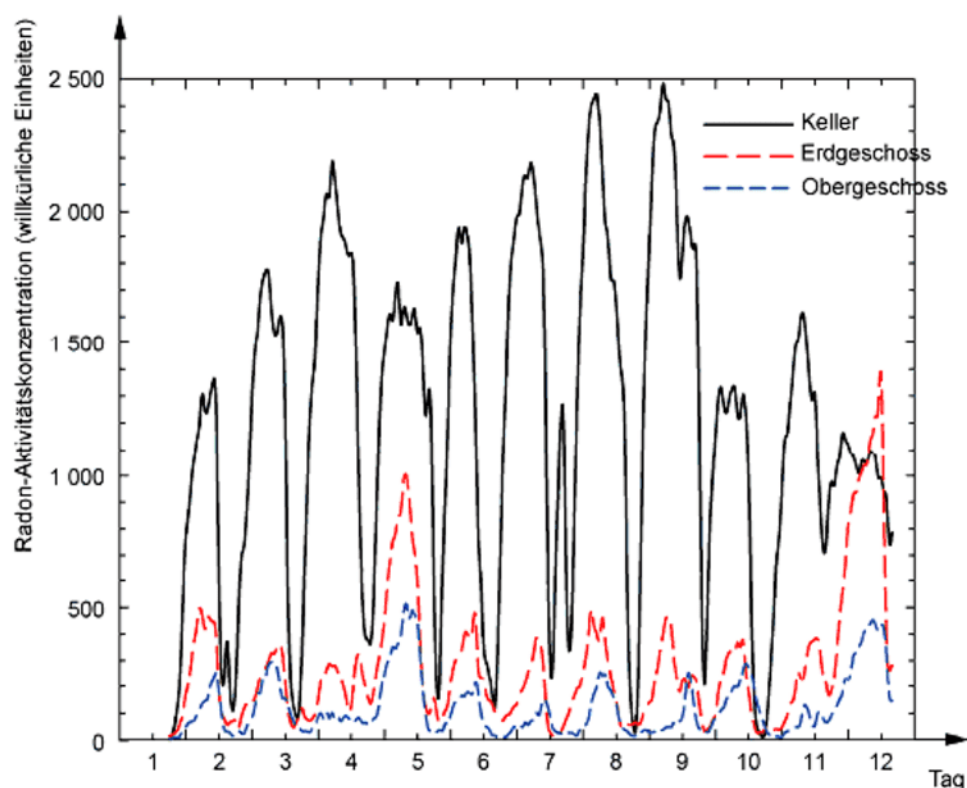
Neben der grundlegenden Verfügbarkeit von Radon durch Emanation und Transport aus dem Untergrund hängt die Radonkonzentration in den oberen Bodenschichten von der Permeabilität ab, die wiederum von der Porengrößenverteilung und dem Sättigungsgrad mit Feuchtigkeit abhängt und daher lokal und saisonal über mehrere Größenordnungen variieren kann. Die Freisetzung von Radon aus der Bodenoberfläche in die Luft wird als Exhalation bezeichnet.

4.3 Radonkonzentration in der Außenluft

Die Wetterbedingungen mit Lufttemperaturschwankungen von Tag zu Nacht führen zu Schwankungen der Radonkonzentration im Freien [6]. Tagsüber erwärmen sich die Bodenoberfläche und die unteren Schichten der Atmosphäre durch Sonneneinstrahlung stärker als die oberen Luftschichten und machen so die thermische Schichtung instabil. Die aufsteigende Warmluft führt zu einer vertikalen Vermischung der Atmosphäre mit niedrigen Radonkonzentrationen am Tag. In der Nacht und in den frühen Morgenstunden kühlen die Bodenoberfläche und die unteren Schichten der Atmosphäre ab. Dies führt zu einer stabilen Schichtung der Atmosphäre (Inversion bei Nacht). Dieser Prozess verringert die vertikale Vermischung der Atmosphäre. Dadurch entsteht eine hohe Radonkonzentration in den unteren Außenluftschichten. Die Variation der Radonkonzentration zwischen Tag und Nacht ist umso größer je größer der Unterschied in der Lufttemperatur ist. Messungen haben gezeigt, dass die Tag-zu-Nacht-Schwankungen der Radonkonzentration hauptsächlich durch Schwankungen der vertikalen Schichtung in der Atmosphäre hervorgerufen werden [7]. Im Gegensatz dazu haben die täglichen Schwankungen der Radonexhalation aus dem Boden keinen wesentlichen Einfluss auf die täglichen Schwankungen der Radonkonzentrationen im Freien [7].

4.4 Radonkonzentration in Häusern und an Arbeitsplätzen

Infolge des Unterdrucks durch die Windlast oder die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen kann Radon über das Fundament und andere bodenberührende Bauteile in ein Haus eindringen. Temperaturunterschiede zwischen Innen- und Außenraum führen zu konvektiven Luftströmungen, bei denen die Außenluft durch die unteren Bauteile in das Gebäude eindringt und das Gebäude über die oberen Stockwerke oder die Decke wieder verlässt. Die Architektur des Hauses beeinflusst die Verteilung des Radons im gesamten Gebäude. Im Untergeschoss strömt radonbelastete Bodenluft durch Risse in der Bodenplatte und den Wänden, Hohlräume im Mauerwerk, Sanitäranschlüsse und Sumpfschächte ein. Die Radonkonzentration im Bodengas, das in das Haus gelangt, hängt im Wesentlichen von der Geologie, dem Gehalt an ^{226}Ra im Boden und der Bodenfeuchte ab. Der Radontransport wird erhöht, wenn insbesondere auf Bodenniveau ein erheblicher Unterdruck in den Gebäuden besteht [6], [7], [9]. Die Radonkonzentration in Innenräumen unterliegt tageszeitlichen und saisonalen Änderungen [10], [11], [12], [13], [14]. Die langfristigen Trends, die sich aus der Nutzung des Gebäudes oder der relevanten Räume sowie aus meteorologischen Bedingungen ergeben, werden von stochastischen Schwankungen überlagert. Bild 1 stellt ein Beispiel für die täglichen Schwankungen der Radonaktivitätskonzentration im Keller, Erd- und Obergeschoss eines Einfamilienhauses, gemessen über 12 Tage, dar.



ANMERKUNG Die Maxima wurden in den frühen Morgenstunden und die Minima am Nachmittag gemessen. Die Schwankungen haben eine Periodendauer von 24 h. Das Bild zeigt die zeitliche Verzögerung der Schwankungen und die reduzierten Konzentrationen in den Stockwerken über dem Keller [8].

Bild 1 – Tägliche Schwankungen der Radonaktivitätskonzentration in Keller, 1. und 2. Etage eines Einfamilienhauses gemessen über 12 Tage

5 Radon-Folgeprodukte in der Atmosphäre

5.1 Physikalische Vorgänge bei Folgeprodukten in gasförmigen Medien

Nach der Bildung von Radon-Folgeprodukten unterliegen diese verschiedenen physikalischen und chemischen Prozessen. Die Prozesse werden hier am Beispiel von ^{218}Po beschrieben, das ausführlich untersucht wurde [15], [16], [17]. Messungen haben gezeigt, dass nach der Bildung mehr als 10 % bis 60 % der ^{218}Po -Ionen positiv geladen sind. Verschiedene Prozesse wirken gleichzeitig auf die frisch erzeugten Folgeprodukte ein: Clusterbildung, Neutralisation sowie Bindung an Aerosole und Oberflächen. Innerhalb einer kurzen Zeit (< 1 s) nach der Bildung binden sich die Radionuklide an Dämpfe (überwiegend H_2O) und an andere Spurengasmoleküle in der Atmosphäre. Die so erzeugten radioaktiven Cluster werden als ungebundene Fraktion der Radon-Folgeprodukte bezeichnet und haben einen Durchmesser zwischen 0,5 nm und 3 nm [18].

Aufgrund ihrer geringen Partikelgröße und ihres hohen Diffusionskoeffizienten zwischen $0,005 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ und $0,100 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ [18] besitzen die Cluster eine hohe Mobilität. Dadurch sind sie nahezu unabhängig von anderen Transportprozessen in der Luft, wie Turbulenzen, Konvektion, Sedimentation und Ablenkung durch elektromagnetische Felder. Ein radioaktives Aerosol entsteht, indem sich die radioaktiven Cluster an den in der Luft vorhandenen Aerosolpartikeln anlagern. Dieser Prozess dauert 1 s bis 100 s [19]. Das Verhältnis der potenziellen Alphaenergie der kurzlebigen Radon-Folgeprodukte, die nicht an Aerosolpartikel angelagert sind, zur potenziellen Alphaenergie der angelagerten kurzlebigen Radon-Folgeprodukte hängt hauptsächlich von der Konzentration der Aerosolpartikel ab und variiert bei Wohnungen zwischen 0,03 und 0,2 [19]. Das Verhältnis sinkt in Bergwerken aufgrund der hohen Partikelkonzentration auf unter 0,01 [20].

5.2 Merkmale von Aerosolen und ihre Beeinflussung durch die Lüftungsbedingungen

Atmosphärische Aerosolpartikel-Größenverteilungen bestehen im Wesentlichen aus drei verschiedenen Modi [21], [22]:

- a) dem Nukleationsmode (oder Kernmode) für Partikel mit Durchmessern kleiner als 100 nm und einem modalen Peak im Bereich zwischen 10 nm und 30 nm,
- b) dem Akkumulationsmode für Partikel mit Durchmessern zwischen etwa 100 nm und etwa 1 µm und einem modalen Peak bei etwa 300 nm und
- c) dem Grobmode, der Partikel mit Durchmessern größer als 1 µm umfasst.

Der Nukleationsmode erscheint, wenn Partikel neu gebildet oder emittiert werden. Dieser Mode hat eine relativ kurze Lebensdauer. Durch die Koagulation mit anderen Kernen und Partikeln des Akkumulationsmodes nehmen die Partikelgrößen zu. Dadurch gelangen sie in den nächsthöheren Modus, den Akkumulationsmodus [21]. Mehrere Quellen von Aerosolpartikeln, wie Zigarettenrauch, Gasherd oder Kerzen, beeinflussen die Partikelverteilung entsprechend den Eigenschaften der emittierten Partikel erheblich. 10 % bis 20 % der angelagerten Aktivität könnten dem Nukleationsmode zwischen 10 nm und 100 nm [19], [23] zugeordnet werden. Aerosolpartikel mit Durchmessern unter 100 nm werden auch als ultrafeine Partikel bezeichnet.

Der Akkumulationsmode resultiert im Wesentlichen aus der Kondensation von Wasser und anderen Dämpfen sowie der Anhaftung von Partikeln durch Koagulation. Dieser Mode ist in Bezug auf die Deposition stabil und hat eine relativ lange Verweilzeit in der Atmosphäre.

Partikel im Grobmode werden üblicherweise mechanisch gebildet oder sind resuspendierte Partikel, wie aufgewirbelter Staub. Dieser Mode erscheint hauptsächlich in der Außenumgebung oder am Arbeitsplatz.

Die Größenverteilung der Aerosolpartikel am Arbeitsplatz wird durch die örtlichen Lüftungsbedingungen und eventuell unterschiedliche Aerosolquellen beeinflusst. Die Konzentration der Aerosolpartikel hängt stark von der Arbeitstätigkeit ab. Bei Arbeiten im Bergbau neigen die radioaktiven Aerosolpartikel zu kleineren Durchmessern, was durch die große Anzahl von Partikeln, die durch Dieselmotoren freigesetzt werden, verursacht wird. An unterirdischen Arbeitsplätzen (Minen, Schauhöhlen) kann die Aktivitätsgrößenverteilung der angehängten Radon-Folgeprodukte durch eine unimodale Lognormalverteilung beschrieben werden, die durch den Median des aktivitätsgewichteten aerodynamischen Partikeldurchmessers und die geometrische Standardabweichung [20] bestimmt wird. Messungen an oberirdischen Arbeitsplätzen haben eine trimodale Aerosolgrößenverteilung mit dem Schwerpunkt auf dem Akkumulationsmodus [23] nachgewiesen. Abhängig von den Arbeitstätigkeiten, den Partikelquellen und der Belüftung sind der Nukleations- und der Grobmodus mehr oder weniger unterschiedlich ausgebildet [23].

In einer Radonatmosphäre existiert eine Mischung aus gasförmigem Radon und Radon-Folgeprodukten, die an Aerosolpartikel gebunden oder nicht gebunden sind. Aber nicht alle gebildeten Folgeprodukte sind im Luftvolumen vorhanden. Aufgrund der Partikelabscheidung und -haftung wird ein Teil davon auf anderen Oberflächen, wie Wänden, Böden oder dem möglichen Inventar am Ort (z. B. im Innenraum) abgelagert. Dieser Teil der Radioaktivität wird nicht eingeatmet und trägt daher nicht zu den Strahlungseffekten bei. Der Radon-Gleichgewichtsfaktor drückt die Störung des Gleichgewichts zwischen Radon und seinen kurzlebigen Folgeprodukten aus (Definition siehe 7.1). Messungen in Innenräumen haben gezeigt, dass der Gleichgewichtsfaktor innerhalb eines 95 %igen Konfidenzintervalls von 0,2 bis 0,7 um den Mittelwert von 0,4 variiert [24], [25].

6 Physikalische und chemische Eigenschaften von Radon und Radon-Folgeprodukten

6.1 Physikalische und chemische Eigenschaften

Als Edelgas ist Radon chemisch weitgehend inert. In Gegenwart von Fluor ist Radon bis 230 °C nicht flüchtig, was durch die Bildung eines Radonfluorids verursacht wird. Radon ist in Wasser und organischen Lösemiteln löslich [26], [27]. Obwohl bei Standardtemperatur und -druck farblos, strahlt Radon bei Abkühlung unter seinen Gefrierpunkt von -71 °C eine starke Radiolumineszenz aus, die bei sinkender Temperatur von gelb nach orange-rot übergeht [28], [29]. Eine ^{222}Rn -Aktivitätskonzentration von $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ entspricht einer

^{222}Rn -Konzentration von etwa $5 \cdot 10^7$ Atomen je Kubikmeter. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass ein Gas unter Standardbedingungen mehr als 10^{25} Atome je Kubikmeter enthält, ist es in allen Fällen, in denen Radon in der Umwelt vorhanden ist, ein Spurengas. Einige physikalische und chemische Eigenschaften von Radon und seinen Folgeprodukten sind in [Tabelle A.1](#) aufgeführt.

Radon wird leicht von Holzkohle, Kieselgel und ähnlichen adsorbierenden Substanzen aufgenommen. Radon kann daher effektiv aus einem Probenluftstrom entfernt werden, indem es auf Aktivkohle gesammelt wird, die auf die Temperatur von festem Kohlendioxid ($-78,5\text{ °C}$) gekühlt wird. Radon wird aus Aktivkohle durch Erhitzen auf 350 °C desorbiert [30].

6.2 Löslichkeit von Radon in Flüssigkeiten

Durch die Diffusion findet an der Schnittstelle zwischen einem Gas und einer Flüssigkeit ein Austausch von Gasmolekülen zwischen Flüssigkeit und Gasvolumen statt. Die Übertragung in die Flüssigkeit ist proportional zum Partialdruck des Gases. Der Austritt aus der Flüssigkeit ist proportional zur Konzentration des gelösten Gases in der Flüssigkeit. Bei der Sättigungskonzentration hat sich ein dynamisches Gleichgewicht eingestellt. Die Löslichkeit ist abhängig von der Temperatur der Flüssigkeit. Wenn die Temperatur steigt, sinkt die Löslichkeit [31], [32].

In der Literatur wird die Löslichkeit von Radon in einer Flüssigkeit oft durch den Ostwald-Koeffizienten beschrieben. Der Ostwald-Koeffizient ist definiert als das Volumen eines bei einer bestimmten Temperatur und einem bestimmten Druck gelösten Gases, geteilt durch das Volumen des Lösemittels bei gleicher Temperatur und gleichem Druck [33]. Da Radon ein Spurengas ist, dessen gelöste Fraktion das Volumen des Lösemittels nicht verändert, kann der Ostwald-Koeffizient L bei einer gegebenen Temperatur aus dem Verhältnis der Radon-Aktivitätskonzentrationen berechnet werden:

$$L = \frac{C_{\text{Rn,liquid}}}{C_{\text{Rn}}} \quad (1)$$

wobei der Parameter $C_{\text{Rn,liquid}}$ die Aktivitätskonzentration von in der Flüssigkeit gelöstem Radon und C_{Rn} die Aktivitätskonzentration von Radon in der Luft bezeichnet.

Wenn das Lösemittel Wasser ist, kann die Abhängigkeit des Ostwald-Koeffizienten L von der Wassertemperatur in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ausgedrückt werden [33]:

$$L = 0,105 + 0,403 \cdot \exp(-0,0502 \cdot T_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (2)$$

Die Ostwald-Koeffizienten für verschiedene organische Lösemittel sind in [Tabelle A.5](#) angegeben. Die Messung von Radon in Wasser mit den Methoden der Emanometrie, Gammaskpektrometrie und Flüssigszintillationszählung wird in den Normen der Reihe ISO 13164 beschrieben [33], [34], [35], [36].

6.3 Radiologische Eigenschaften und radioaktives Gleichgewicht

In [Tabelle A.2](#) und [Tabelle A.3](#) sind die Daten für die natürlichen Zerfallsketten von ^{238}U und ^{232}Th ab ^{226}Ra bzw. ^{224}Ra angegeben [37]. Die Tabellen enthalten nur die Daten, die für die Radonmessung relevant sind.

Die Folgeprodukte, die sich aus dem Zerfall von ^{222}Rn oder ^{220}Rn ergeben, sind selbst radioaktiv. Durch sequentiellen Zerfall entstehen die Folgeprodukte der jeweils nächsten Generation, bis die stabilen Bleiisotope die Zerfallsreihen schließlich beenden. In einer radioaktiven Zerfallsreihe verändert sich die Aktivität A_i des i -ten Nuklids durch Zerfall und Produktion. Die Aktivität $A_i(t)$ zum Zeitpunkt t ist die Differenz aus der Produktionsrate, ausgedrückt durch $q_i(t)$ und der Zerfallsrate, ausgedrückt durch $\lambda_i A_i(t)$,

$$\frac{dA_i(t)}{dt} = q_i(t) - \lambda_i A_i(t) \quad (3)$$