



Bundesamt
für Strahlenschutz

Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz

Ermittlung von charakteristischen Expositionsbedingungen bei Radon an Arbeitsplätzen in Innenräumen

Vorhaben 3620S12380

IAF-Radioökologie GmbH

Dr. H. Schulz
Dr. C. Kunze
S. Düsing
M. Merkel
K. Weinholdt
Prof. Dr. A. Wiedensohler

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

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

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

Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: ePost@bfs.de

De-Mail: epost@bfs.de-mail.de

www.bfs.de

BfS-RESFOR-227/24

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:

urn:nbn:de:0221-2024101847251

Salzgitter, Oktober 2024

Ermittlung von charakteristischen Expositionsbedingungen bei Radon an Arbeitsplätzen in Innenräumen

Abschlussbericht

Auftraggeber: Bundesamt für Strahlenschutz
Köpenicker Allee 120-130
10318 Berlin

Projektname: Ermittlung von charakteristischen Expositionsbedingungen
bei Radon an Arbeitsplätzen in Innenräumen

FKZ: 3620S12380

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

Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V.
Permoserstraße 15
04318 Leipzig

Autoren: Dr. H. Schulz, Dr. C. Kunze (IAF)
S. Düsing, M. Merkel, K. Weinholdt, Prof. Dr. A. Wiedensohler
(TROPOS)

Review: R. Baumert (IAF)

Radeberg, den 31.12.2022



Dr. rer. nat. habil. Hartmut Schulz

Geschäftsführer

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

Geschäftsführer:
Dr. rer. nat. habil. Hartmut Schulz
Dr. rer. nat. Christian Kunze
Dipl.-Ing. (BA) René Baumert
Handelsregister: HRB 9185
Amtsgericht Dresden

Bankverbindung:
HypoVereinsbank Dresden
IBAN: DE92 8502 0086 5360 1794 29
SWIFT (BIC): HYVEDEMM496

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung der wesentlichen Inhalte des Ergebnisberichtes	6
1 Einleitung	9
1.1 Zielstellung des Vorhabens	9
1.2 Vorgaben des Strahlenschutzrechts	10
2 Identifizierung geeigneter Arbeitsfelder und Arbeitsplätze	12
2.1 Anforderungen an die Arbeitsfelder und Arbeitsplätze im Vorhaben.....	12
2.2 Klassifizierung von Arbeitsfeldern	13
2.2.1 Arbeitsfelder, in denen Materialien mit erhöhter spezifischer Aktivität von Ra-226 gehandhabt werden	13
2.2.2 Arbeitsplätze in sonstigen Arbeitsfeldern	14
2.2.3 Klassifikation der Berufe der Agentur für Arbeit.....	15
2.2.4 Begründung des Strahlenschutzgesetzes	15
2.2.5 Studien des BfS.....	16
2.2.6 Vorgehensweise bei der Identifizierung der für das Vorhaben geeigneten Arbeitsplätze.....	17
2.3 Experimentierraum zur Vorbereitung	20
2.4 Zur Weiterführung der Untersuchungen nach Beendigung der Messungen im Rahmen des Forschungsvorhabens	21
3 Methodik der Messungen	24
3.1 Messung der Aktivitätskonzentration von Radon und Radonfolgeprodukten.....	24
3.2 Messung der Aerosolkonzentration am Arbeitsplatz	26
3.3 Messung weiterer relevanter physikalischer Größen	28
3.4 Aufzeichnung der Bedingungen an den Arbeitsplätzen	29
4 Ergebnisse der Messungen	30
4.1 Überblick über die wichtigsten Messgrößen	30
4.2 Auswertung der aus den Messergebnissen folgenden zeitunabhängigen Mittel- und Medianwerte sowie ihrer Korrelationen für den Gesamtmesszeitraum.....	30
4.2.1 Überblick über die wichtigsten Messgrößen.....	30
4.2.2 Radonfolgeproduktkonzentrationen (RFP) in Abhängigkeit von der Gesamtoberfläche der Partikel in der Raumluft	35
4.2.3 Radonfolgeproduktkonzentrationen (RFP) und Gesamtoberflächenkonzentration als Funktion des Gleichgewichtsfaktors.....	38
4.3 Grafische Darstellung von Korrelationen relevanter Systemvariablen.....	42
4.4 Schlussfolgerungen aus den Messergebnissen.....	49
4.5 Zusammenfassendes Zwischenfazit zu den Ergebnissen der 19 Detailmessungen an den ausgewählten Arbeitsplätzen.....	49

5	Dosisabschätzung für die ausgewählten Standorte.....	52
5.1	Angewendete Modelle für die Dosisabschätzung	52
5.2	Ergebnisse der Dosisberechnungen nach Strahlenschutzverordnung	53
5.2.1	Ergebnisse für den Gesamtmesszeitraum	53
5.2.2	Ergebnisse für den Arbeitszeitraum von 8 bis 17 Uhr	57
5.3	Fazit der Dosisberechnungen nach Strahlenschutzverordnung	59
6	Vergleich der Messergebnisse im Vorhaben mit Ergebnissen aus der Literatur	61
6.1	Ergebnisse der Recherche von Literatur nach Veröffentlichung der ICRP 137	61
6.2	Vergleich der Ergebnisse mit den Annahmen der ICRP 137	65
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	67
8	Literaturverzeichnis.....	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überblick über die Anzahl und Zeiträume die 19 Detailmessungen im Rahmen der 2 Messkampagnen 2021 und 2022	17
Tabelle 2:	Zuordnung der Arbeitsplätze zum Klassifikationssystem KldB der Bundesagentur für Arbeit.....	19
Tabelle 3:	Überblick zum Radon-Messtechnikeinsatz	24
Tabelle 4:	Nachweisgrenzen und Messbereiche der eingesetzten Radon-Messtechnikeinsatz	24
Tabelle 5:	Überblick zum weiteren Messtechnikeinsatz.....	29
Tabelle 6:	Messbereiche und Messtoleranzen des Messgerätes Almemo	29
Tabelle 7:	Überblick über die Mittelwerte bzw. Median von statistischen Kennzahlen der 19 Detailmessungen im Rahmen der Messkampagnen 2021 und 2022 ..	32

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zeitlicher Verlauf der Radonkonzentrationen im Messraum für den Radon-Komplextest im Rahmen des Forschungsvorhabens	21
Abbildung 2:	Messanordnung verschiedener Messgeräte für Radon, Radonfolgeprodukte und weitere Parameter.....	25
Abbildung 3:	Schematischer Aufbau des Aerosolmesssystems T-MPSS	27
Abbildung 4:	Einsatz der Aerosol-Messtechnik	28
Abbildung 5:	Zusammenstellung der berechneten mittleren Systemgrößen für die 19 Messpunkte rechte Achse Median	33
Abbildung 6:	Wie Abbildung 5, jedoch sind die gemittelten Größen g, F und f einzeln zusammen mit dem Median der Gesamtoberflächen S	34
Abbildung 7:	Überblick über die Schwankungsbreiten der Mittelwerte der Gleichgewichtsfaktoren sowie den angelagerten und nicht angelagerten RFP der Messkampagnen 2021 und 2022.....	35

Abbildung 8: Das Verhältnis der mittleren Aktivitätskonzentrationen $g=u/a$ von unangelagerten (freien) zu den angelagerten Radonfolgeprodukten als Funktion der Gesamtoberfläche S der Teilchen in der Raumluft (Medianwert), gemessen in $[\mu\text{m}^2 \text{cm}^{-3}]$. (Die eingezeichnete Kurve soll den tentativen Verlauf des Zusammenhanges von $g=u/a$ und der Gesamtoberflächen S verdeutlichen.).....	36
Abbildung 9: Wie Abbildung 8, jedoch für das Verhältnis der mittleren Aktivitätskonzentrationen von f (Die eingezeichnete Kurve soll den tentativen Verlauf des Zusammenhanges von $f=u/(u+a)$ und der Gesamtoberflächen S verdeutlichen.).....	37
Abbildung 10: Wie Abbildung 8, jedoch für das Verhältnis der mittleren Aktivitätskonzentrationen von $1-f$ (Die eingezeichnete Kurve soll den tentativen Verlauf des Zusammenhanges von $a/(u+a)=1-f$ und der Gesamtoberflächen S verdeutlichen.).....	38
Abbildung 11: Das Verhältnis der mittleren Aktivitätskonzentrationen $g=u/a$ von unangelagerten (freien) zu den angelagerten Radonfolgeprodukten als Funktion des Gleichgewichtsfaktors $F= (u+a)/\text{CR}_n$	39
Abbildung 12: Wie Abbildung 11, jedoch für das Verhältnis der mittleren Aktivitätskonzentrationen $f=u/(u+a)$ von unangelagerten (freien) zur Summe aus angelagerten und unangelagerten (freien) Radonfolgeprodukten	40
Abbildung 13: Gleichgewichtsfaktor $F= (\text{angelagerte} + \text{unangelagerte})/\text{CR}_n$ als Funktion der Gesamtoberflächen S der Aerosole	41
Abbildung 14: Das Verhältnis $g=u/a$, der Gleichgewichtsfaktor F sowie die gemessenen Radonkonzentrationen (rechte Ordinate) für den Raum R1 als Funktion der Gesamtoberfläche der Partikel (Aerosole).....	42
Abbildung 15: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R2	43
Abbildung 16: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R3	43
Abbildung 17: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R4	44
Abbildung 18: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R5	44
Abbildung 19: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R6	45
Abbildung 20: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R7	45
Abbildung 21: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R2_2	46
Abbildung 22: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R4_2	46
Abbildung 23: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R8	47
Abbildung 24: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R9	47
Abbildung 25: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R10	48
Abbildung 26: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R11.....	48
Abbildung 27: Ergebnisse der Berechnung der EEC in Abhängigkeit von der mittleren Radonkonzentration und den Gleichgewichtsfaktoren, die für die 19 Arbeitsplätze bestimmt wurden. Oberes Bild: gesamter Bereich der Mittelwerte; unteres Bild: nur für $\langle \text{CR}_n \rangle \leq .1000 \text{ Bq/m}^3$	54

Abbildung 28: Ergebnisse der Dosisberechnungen für unterschiedliche Varianten der EEC in Abhängigkeit von der mittleren Radonkonzentrationen, die für die Arbeitsplätze bestimmt wurden. Die Expositionszeit wurde einheitlich auf 500 Stunden gesetzt. Oberes Bild: gesamter Bereich der Mittelwerte; unteres Bild: nur für die Mittelwerte $\langle CR_n \rangle \leq 1000 \text{ Bq/m}^3$	55
Abbildung 29: Berechnete mittlere Radonkonzentrationen für die Kernarbeitszeit von 8 - 17 Uhr von Montag bis Freitag und die übrige Messzeit in Abhängigkeit von der über den Gesamtmesszeitraum berechneten mittleren Radonkonzentration für die Räume R1 – R7	57
Abbildung 30: Wie Abbildung 29, jedoch für die jeweiligen Gleichgewichtsfaktoren F	58
Abbildung 31: Wie Abbildung 30, jedoch für die jeweilige Dosisberechnung	59
Abbildung 32: F und fp (eigene graphische Darstellung von Tabelle 5 in [55])	62
Abbildung 33: Unangelagerter Anteil fp der Radonfolgeprodukte aufgetragen über der Teilchenzahlkonzentration der Aerosole (Figure 4 aus [58])	63
Abbildung 34: Unangelagerter Anteil fp der Radonfolgeprodukte aufgetragen über dem Gleichgewichtsfaktor (Figure 6 aus [58]).....	64
Abbildung 35: Vergleich der Messwerte und nach [2] berechneten Werte für fp in Abhängigkeit von der Teilchenzahldichte, Beispiel Arbeitsplatz R1	66
Abbildung 36: Vergleich der Messwerte und nach [2] berechneten Werte für fp in Abhängigkeit von der Teilchenzahldichte, Beispiel Arbeitsplatz R2.....	66
Abbildung 37: Abhängigkeit der in Gl. (10) eingeführten Größe $24 \cdot f + 3,9 \cdot (1-f)$ von dem an den Arbeitsplätzen bestimmten Gleichgewichtsfaktoren	71

Anlagenverzeichnis (alle Anlagen in elektronischer Form)

Anlage 1	Messergebnisse der 1. Messkampagnen (2021)
Anlage 2	Messergebnisse der 2. Messkampagnen (2022)
Anlage 3	Zusätzliche Messergebnisse (Luftfeuchte, Temperatur, CO₂, Differenzdrücke, Wetterdaten)

Zusammenfassung der wesentlichen Inhalte des Ergebnisberichtes

Ziel des Vorhabens ist es, die in den biokinetisch-dosimetrischen Modellen zu Grunde gelegten Annahmen zu angelagerten und nichtangelagerte Radonfolgeprodukte bei der Exposition an ausgewählten Arbeitsplätzen zu verifizieren.

Das Vorhaben ist in die folgenden Arbeitspakete gegliedert:

- AP 1: Klassifikation und Auswahl von Arbeitsplätzen
- AP 2: Messung der Expositionsbedingungen an Arbeitsplätzen
 - Aktivitätskonzentration von Radon
 - Radonfolgeprodukte: angelagert und unangelagert
 - Messungen der Aerosolkonzentration 5...800 nm
- AP 3: Auswertung der Messungen und Vergleich mit ICRP 137 und Anlage 18 Teil B Nr. 3 StrlSchV

Im Vorhaben wurden an Arbeitsplätzen, welche nicht in Anlage 8 StrlSchG genannt sind, der zeitliche Verlauf der Aktivitätskonzentration von Radon, seinen angelagerten und nichtangelagerten Folgeprodukten sowie die Partikelanzahl- und Oberflächenkonzentration von Aerosolen im Partikelgrößenbereich zwischen ca. 5 nm und 800 nm über einen Messzeitraum von mindestens einer Woche bestimmt. Parallel dazu wurden Umgebungsparameter und sonstige Bedingungen wie Lüftung der Arbeitsplätze aufgezeichnet.

Die im Vorhaben ausgewählten Arbeitsplätze umfassen die folgenden Tätigkeits- bzw. Industriezweige:

- Verkauf, Handel, Veranstaltungen: Lager, Ausstellungsräume, Büros,
- Produktionsbetriebe (Chemieindustrie): Produktionshalle,
- Produktionsbetriebe (Maschinenbau): Maschinenfabrik,
- Produktionsbetriebe (Metallbearbeitung): Werkstatt,
- Produktionsbetriebe (Papier- und Verpackungstechnik): Labor Kartonagenfabrik,
- Gesundheit, Medizin, Pflege: Büro, Patientenaufnahme und Behandlungsräume,
- Archivwesen, Dokumentation: Archivräume,
- Produktionsbetriebe (Kosmetik/Pharma): Reinraum, Lager und
- Erziehung, Ausbildung, Schule: Werkenraum, Hausmeisterraum.

Zusätzlich wurden in einem Modellraum Voruntersuchungen zur Vorbereitung und Abstimmung der Messtechnik durchgeführt.

Die Arbeitsplatzmessungen wurden in zwei Messkampagnen in den Zeiträumen 02.06.2021 bis 11.11.2022 und 20.04.2022 bis 16.06.2022 durchgeführt. Die Messdauer pro Arbeitsplatz betrug 7 bis 21 Tage, insgesamt wurden ca. 4000 Messstunden realisiert.

Die umfangreiche Datenmenge und die hohe Zahl von Messräumen und Messbedingungen erlauben aus Sicht des Auftragnehmers erstmals statistisch belastbare Aussagen zu Expositionsbedingungen an Arbeitsplätzen.

Im Ergebnis wurde festgestellt, dass praktisch keine Arbeitsplätze mit material- bzw. prozessbedingt erhöhten Radon-Aktivitätskonzentrationen existieren, sondern dass erhöhte Radon-Aktivitätskonzentrationen sowie die Konzentration von Aerosolen, angelagerten und nicht angelagerten Radonfolgeprodukten fast ausschließlich durch das Eindringen radonhaltiger Luft und das Lüftungsverhalten (Öffnen von Türen und Fenstern, aktive Lüftungsanlagen) und im Einzelfall durch staubbildende Arbeitsgänge bestimmt werden.

Arbeitsplätze unterscheiden sich deshalb unter dem Aspekt der Expositionsbedingungen bezüglich Radon und Radonfolgeprodukten **nicht** bezüglich des Industriezweiges, der Berufsbereiche, Berufsgruppen, Tätigkeit, sondern vor allem anhand ihrer Lage und Belüftung im Gebäude.

Die Auswertung der Zeitreihen und die Korrelation der verschiedenen Messgrößen lassen die folgenden Schlussfolgerungen zu:

- Die Gleichgewichtsfaktoren bei allen Messungen waren stark zeitabhängig. Die Zeitreihen der gemessenen Parameter an Arbeitsplätzen unterscheiden sich damit deutlich vom zeitlichen Verhalten der Parameter in Wohnräumen.
- Aerosolzusammensetzung der Raumluft variiert stark in Abhängigkeit von Lüftungssituation und der Staubbelastung.
- Die Variationsbreite des Gleichgewichtsfaktors kann bis zu 50% um den Mittelwert betragen. Im Vergleich der einzelnen Arbeitsplätze untereinander wurde ein großer Wertebereich der gemittelten Gleichgewichtsfaktoren zwischen ca. 0,1 und 0,8 ermittelt.
- Die Partikeloberfläche pro Luftvolumen ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) ist als Bezugsgröße physikalisch plausibler als die oft betrachtete Teilchenzahlkonzentrationen ($1/\text{cm}^3$). Die entscheidende Größe für die Konzentration der angelagerten Radonfolgeprodukte sind die mittleren Gesamtoberflächen der Aerosole $S(5\text{nm} - 800\text{nm})$ in der Raumluft. Sie können innerhalb einer Messperiode im Bereich von 20 bis $600 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ variieren.
- Im Vorhaben wurde eine negative Korrelation zwischen dem unangelagertem Anteil der Radonfolgeprodukte f_p und dem Gleichgewichtsfaktor F nachgewiesen. Dies bestätigt frühere Ergebnisse, die in der ICRP Veröffentlichung Nr. 137 berichtet wurden.
- Es ergeben sich bei der statistischen Auswertung der Messungen neue und bisher nicht identifizierte Korrelationen zwischen den Messgrößen, die ein neues Licht auf die Annahmen der ICRP Publication 137 zur Dosisberechnung bei Radon werfen.
- Die dosimetrische Bewertung des angelagerten und unangelagerten Anteils der Radonfolgeprodukte unterscheidet sich erheblich, wie der um einen Faktor von etwa 6 höhere Dosisfaktor für unangelagerte Radonfolgeprodukte, verglichen mit angelagerten Radonfolgeprodukten in Tabelle A.12 der ICRP 137 zeigt.

- Die Messung des angelagerten bzw. unangelagerten Anteils der Radonfolgeprodukte an allen Arbeitsplätzen für eine verbesserte Dosisabschätzung ist jedoch nicht praktikabel. Stattdessen kann ggf. ein funktionaler Zusammenhang zwischen f_p und dem in der Praxis einfacher zu messenden Gleichgewichtsfaktor F zugrunde gelegt werden, um aus F auf f_p zu schließen. Dieser Zusammenhang muss jedoch in weiterführenden Untersuchungen noch belastbarer herausgearbeitet werden.
- Ein Vergleich zwischen der entsprechend den Vorgaben zur Dosisberechnung in Anlage 18 Teil B Nr. 3 StrlSchV hat eine überraschend gute Übereinstimmung zwischen der Annahme eines festen Gleichgewichtsfaktors von 0,4 und der mittleren Radon-Aktivitätskonzentration einerseits und einer Integration des zeitaufgelöst gemessenen Größen Radon-Aktivitätskonzentration und Gleichgewichtsfaktor andererseits ergeben.

1 Einleitung

1.1 Zielstellung des Vorhabens

Zur dosimetrischen Bewertung der Exposition durch die Inhalation von Radon und kurzlebigen Radonzerfallsprodukten¹ an Arbeitsplätzen in Innenräumen sind nach gegenwärtiger Rechtslage die Konversionsfaktoren nach Anlage 18 Teil B Nr. 3 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV [1]) zu verwenden. Gleichwohl wurden durch die ICRP in der Publikation 137 [2] aus dem Jahr 2017 Dosiskonversionsfaktoren veröffentlicht, die im Vergleich zu den bisher verwendeten Faktoren zu einer Verdopplung bzw. Vervierfachung der effektiven Dosis führen würden und unter anderem von der Strahlenschutzkommission kontrovers diskutiert werden.

Entsprechend der Leistungsbeschreibung des BfS [3] verfolgt das im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) bearbeitete Forschungsvorhaben das Ziel,

„die Datenbasis über die Expositionsbedingungen bei Radon an Arbeitsplätzen in Innenräumen in Deutschland zu verbessern und die in den biokinetisch-dosimetrischen Modellen zu Grunde gelegten Annahmen für die ausgewählten Arbeitsplätze zu verifizieren. Im Ergebnis des Projektes sollen belastbare Daten über charakteristische Expositionsbedingungen bei Radon an Arbeitsplätzen zur Verfügung stehen.“

Zur Erreichung dieser Zielstellung sind Expositionsbedingungen bezüglich Radon und Radon-Zerfallsprodukten an Arbeitsplätzen in Innenräumen in Deutschland zu untersuchen. Begleitend zur Messung der radiologischen Messgrößen sind die Konzentration und Größenverteilung der Aerosolpartikel am jeweiligen Arbeitsplatz zu bestimmen.

Bei der Bearbeitung des Vorhabens ist zu beachten, dass Arbeitsplätze nach Anlage 8 StrlSchG [4] sowie Arbeitsplätze, bei denen sich der Arbeitnehmer an mehreren oder an ständig wechselnden Arbeitsorten aufhält, gemäß der Leistungsbeschreibung von den Untersuchungen auszuschließen sind.

Die Bearbeitung ist entsprechend der Zielstellung in separate, aufeinander aufbauende Arbeitspakete gegliedert:

- AP 1: Klassifikation und Auswahl von Arbeitsplätzen,
- AP 2: Messung der Expositionsbedingungen an Arbeitsplätzen,
- AP 3: Auswertung der Messungen.

Der vorliegende Bericht fasst nach einer Übersicht über die rechtlichen Rahmenbedingungen (Abschnitt 1.2) zunächst die Ergebnisse der Arbeitspakete 1 und 2 zusammen (Abschnitte 2 bis 4). In Abschnitt 6 werden die Ergebnisse der Messungen mit den Annahmen der ICRP 137 sowie der seit der Veröffentlichung der ICRP 137 erschienenen Fachliteratur verglichen.

Abschnitt 7 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse des Vorhabens im Hinblick auf die von ICRP publizierten Dosiskonversionsfaktoren sowie der Konversionsfaktoren der Anlage 18 Teil B Nr. 3 StrlSchV. Darüber hinaus werden Empfehlungen für weitere Untersuchungen gegeben.

¹ Im Bericht wird zur besseren Lesbarkeit der geläufige Begriff Radonfolgeprodukte bzw. RFP verwendet.

1.2 Vorgaben des Strahlenschutzrechts

Mit der Verabschiedung des neuen Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG) [4] und der novellierten Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) [1] gelten seit dem 31.12.2018 erweiterte Regelungen bezüglich des Radonschutzes (§§ 121-132 StrlSchG, §§ 153-158 StrlSchV). Für Aufenthaltsräume und Arbeitsplätze in Innenräumen wurde ein Referenzwert von 300 Bq/m³ als Jahresmittelwert der Radon-Aktivitätskonzentration festgelegt.

Um eine bundeseinheitliche Qualität der Radon-Messungen an Arbeitsplätzen sicherzustellen, bedürfen Anbieter von Messungen einer Anerkennung gemäß § 155 Strahlenschutzverordnung [1] durch das BfS. Die Anerkennung bestätigt, dass der Anbieter geeignete Geräte zur Messung der Radon-Aktivitätskonzentration an Arbeitsplätzen im Sinne der Strahlenschutzgesetzgebung bereitstellt und die Vorgaben zu ihrem Einsatz den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen. Die IAF-Radioökologie GmbH ist als anerkannte Radonmessstelle durch das BfS ausgewiesen [5].

Der § 128 (1) StrlSchG [4] verlangt von einem für einen Arbeitsplatz Verantwortlichen, unverzüglich Maßnahmen zur Reduzierung zu ergreifen, wenn die Rn-222-Aktivitätskonzentration in der Luft den Referenzwert von 300 Bq/m³ überschreitet.

Bei der Messung der Radon-Aktivitätskonzentration werden üblicherweise Festkörper-Kernspurdetektoren über einen Zeitraum von 12 Monaten am Messort exponiert. Es können bei Erfordernis auch mehrere aufeinanderfolgende, kürzere Messdauern realisiert werden. Dabei sind die Vorgaben in der ISO 11665-8, Abschnitt 5.5 zu beachten.

Die Messung mit Radon-Monitoren muss einen Zeitraum von 12 Monaten repräsentativ abbilden. Nach § 155 (1) StrlSchV [1] kann eine Überschreitung des Referenzwertes von 300 Bq/m³ auch auf der Grundlage einer kürzeren Messzeit als 12 Monate festgestellt werden, wenn auf Grund einer Abschätzung der über das Jahr gemittelten Radon-222-Aktivitätskonzentration davon auszugehen ist, dass der Referenzwert überschritten wird.

Die Vorgehensweisen im Hinblick auf eine belastbare Prognose der Radonsituation wurden von der IAF-Radioökologie GmbH unter anderem in zwei Forschungsvorhaben des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) [6, 7] und in Projekten im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) für Schulen und öffentliche Gebäude [8, 9] detailliert untersucht und die Belastbarkeit der Untersuchungsergebnisse von Kurzzeitmessungen bestätigt. Hierbei spielt eine besondere Rolle, dass das Systemverhalten des zu untersuchenden Objekts hinsichtlich des Radontransports erfassbar ist.

Gegenüber integrierenden Messungen der Radonexposition mit Festkörper-Kernspurdetektoren (KSD) bieten Messungen des Zeitverlaufs der Radonkonzentration mit elektronischen Instrumenten den Vorteil, dass erkannt werden kann, unter welchen Arbeitsbedingungen (z.B. Tageszeiten, Lüftung, ausgeführte Arbeiten) die höchsten Radonkonzentrationen zu erwarten sind, um somit auch gleichzeitig Maßnahmen zur Reduktion erhöhter Radonkonzentrationen ableiten zu können.

In gewerblich genutzten Gebäuden unterliegt die Radon-Aktivitätskonzentration aufgrund typischer Nutzungsszenarien erfahrungsgemäß einem Wochenrhythmus. Deshalb geben

Sieben-Tages-Messungen (inklusive Wochenende) die Radonsituation ausreichend genau wieder. Sind im Sinne der StrlSchV [1] Langzeitmessungen durchzuführen, so können diese in der Praxis nur mit Festkörper-Kernspurdetektoren realisiert werden, was eine Bewertung der Radonsituation auf über ein Jahr verschieben würde, wobei aber zwischenzeitlich keine Maßnahmen zu einer Reduktion erhöhter Radonkonzentrationen eingeleitet werden können.

2 Identifizierung geeigneter Arbeitsfelder und Arbeitsplätze

2.1 Anforderungen an die Arbeitsfelder und Arbeitsplätze im Vorhaben

Entsprechend den Anforderungen der Leistungsbeschreibung des Vorhabens [3] ist zur zweckmäßigen Auswahl der Arbeitsplätze eine begründbare Wahrscheinlichkeit nachzuweisen, dass eine höhere Radon-Aktivitätskonzentration in der Luft am Arbeitsplatz zu erwarten ist. Hierfür muss mindestens eine der folgenden Bedingungen erfüllt sein:

- Freisetzung von Radon aus im jeweiligen Arbeitsfeld gehandhabten Materialien oder
- Erhöhte Radonaktivitätskonzentration in Innenräumen durch das Eindringen von Radon in das Gebäude aus dem Boden.

Den Ausführungen in Abschnitt 4.2 des Abschlussberichtes eines F&E-Vorhabens des BfS von 2018 [13] folgend, lassen sich die folgenden Gruppen von Arbeitsplätzen mit signifikant erhöhter Radonexposition außerhalb der StrlSchV bilden:

- Arbeitsplätze mit einer erhöhten Radonaktivitätskonzentration aufgrund der gehandhabten Materialien
 - Arbeitsplätze mit Materialien (Rohstoffen, Rückständen, Zwischen- und Endprodukten) mit erhöhten spezifischen Ra-226-Aktivitäten,
 - Arbeitsplätze in Anlagen der Wassergewinnung und -aufbereitung außerhalb StrlSchV,
- Arbeitsplätze mit einer erhöhten Radonaktivitätskonzentration aufgrund des Eindringens von Bodenluft über erdberührende Wände, Mediendurchführungen bzw. aus Reservoirien wie Leitungsnetzen und Hohlräumen
 - Arbeitsplätze in Räumen ohne befestigte Böden,
 - Arbeitsplätze in unterirdischen Räumen bzw. in Räumen mit Erdberührung,
 - Arbeitsplätze mit vorgeschriebener Lüftungsanlage,
 - Arbeitsplätze in historischen Gebäuden.

Die im Rahmen des Vorhabens betrachteten Arbeitsfelder sollen entsprechend der Leistungsbeschreibung

- typisch für das Spektrum der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in Deutschland sein,
- jeweils Arbeitsplätze mit einer relevanten Anzahl von Beschäftigten umfassen und
- phänomenologische Merkmale besitzen, die die Vermutung zulassen, dass sich die charakteristischen Expositionsbedingungen zwischen den ausgewählten Arbeitsfeldern unterscheiden.

Die Arbeitsplätze innerhalb eines Arbeitsfeldes sind durch die jeweils unterschiedlichen ausgeübten Arbeitsvorgänge und die jeweilige Aufenthaltszeit der Beschäftigten gekennzeichnet. Innerhalb eines für das Vorhaben ausgewählten Arbeitsfeldes sind jeweils drei Arbeitsplätze festzulegen, an denen Messungen der Aktivitätskonzentration von Radon und Radonfolgeprodukten sowie Aerosolen durchzuführen sind.

Unterscheidungsmerkmale der Arbeitsplätze innerhalb eines Arbeitsfeldes sind im Folgenden zusammengestellt:

- Ursache erhöhter Radonkonzentrationen (Freisetzung aus Materialien mit einer erhöhten Ra-226-Aktivitätskonzentration, Eindringen aus dem Boden, Eindringen aus anderen Gebäudeteilen, Tunneln, Kabel- oder Leitungskanälen)
- Physische Belastung der Beschäftigten am Arbeitsplatz (sitzend, leichte, mittlere, schwere Belastung),
- Umgang mit anderen gesundheitsgefährdenden Stoffen (insbesondere Schadstoffe in der Luft wie Quecksilber oder phenolhaltige Dämpfe, die ein Arbeiten unter besonderen Anforderungen an die Luftführung erforderlich machen (Abzug, Belüftung/Bewetterung, kontinuierliche Messung bzw. Überwachung der Luftgeschwindigkeit an Arbeitsplatz),
- Stetige Beschäftigung am Arbeitsplatz oder wechselnde Einsatzorte der Beschäftigten,
- Gleichbleibende oder wechselnde Handhabung gleicher oder vergleichbarer Stoffe bzw. Tätigkeiten,
- Starke oder geringe Staubbildung.

Im Folgenden werden verschiedene Ansätze einer Klassifikation von Arbeitsfeldern und Arbeitsplätzen gegenübergestellt und auf dieser Grundlage ein Vorschlag für die weitere Vorgehensweise bei der Identifizierung von Arbeitsplätzen abgeleitet, an denen im Rahmen des Vorhabens Messungen der Aktivitätskonzentration von Radon und Radonfolgeprodukten sowie Aerosolen durchgeführt werden.

2.2 Klassifizierung von Arbeitsfeldern

2.2.1 Arbeitsfelder, in denen Materialien mit erhöhter spezifischer Aktivität von Ra-226 gehandhabt werden

Eine erste Orientierung für die Identifizierung relevanter Arbeitsfelder, in denen erhöhte Aktivitätskonzentrationen durch die gehandhabten Materialien bedingt sind, kann die Anlage 3 zum StrlSchG („Tätigkeitsfelder nach § 55 Absatz 1“) bilden:

- Verwendung von Thorium und Uran zu chemisch-präparativen Zwecken,
- Gewinnung, Verwendung und Verarbeitung von Pyrochlorerzen,
- Verwendung und Verarbeitung von Schlacke aus der Verhüttung von Kupferschiefererzen,
- Aufarbeitung von Niob- und Tantalserzen,
- Handhabung, insbesondere bei Wartungs- oder Reinigungstätigkeiten, von Schlämmen und Ablagerungen bei der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas sowie in der Tiefengeothermie,
- Verarbeitung zirkonhaltiger Stoffe bei der Herstellung feuerfester Werkstoffe,
- Wartung von Klinkeröfen in der Zementproduktion und Heizkesseln in Kohlekraftwerken,
- Lagerung überwachungsbedürftiger Rückstände und Entfernung von Kontaminationen von Grundstücken nach § 64 StrlSchG.

Auf der Grundlage der Erfahrungen des Auftragnehmers sowie im Ergebnis einer ergänzenden Literaturrecherche von Quellen der IAEA und HERCA [10, 11], der deutschen [12, 13], europäischen [14, 15] und nordamerikanischen Literatur [16, 17] wurden Arbeitsfelder mit potentiell erhöhter Radonaktivitätskonzentration identifiziert, welche aus einer erhöhten Freisetzung von Radon aus den gehandhabten Materialien resultiert:

- Natursteinverarbeitung, insbesondere von Granit, in Steinmetzwerkstätten [17,18],
- Wasserbehandlung außerhalb der Arbeitsfelder in Anlage 8 StrlSchG, beispielsweise Zwischenlagerhallen für Rückstände der Flutungswasserbehandlung der Wismut GmbH [19],
- Kraftwerke und andere Verbrennungsanlagen mit Lagerungsbunkern für Aschen mit erhöhter spezifischer Aktivität von Ra-226 [10],
- Tiefen-Geothermie [12],
- Museen mit Gesteinssammlungen (u.a. Erze mit radioaktiven Mineralen) [13].

An Arbeitsplätzen in diesen Arbeitsfeldern liegt jedoch nicht zwingend, sondern nur unter bestimmten Bedingungen eine erhöhte Radonaktivitätskonzentration in der Luft vor, und zwar insbesondere bei geringer Luftwechselzahl und einer signifikanten Freisetzung von Radon aus den gehandhabten Materialien.

In der Erfahrung des Auftragnehmers sind diese Bedingungen nur in sehr wenigen Arbeitsfeldern und innerhalb der Arbeitsfelder nur an sehr wenigen Arbeitsplätzen erfüllt. Diese Arbeitsplätze entsprechen somit nicht der Anforderung der Leistungsbeschreibung, Arbeitsplätze mit einer für den Vollzug der Strahlenschutzgesetzgebung relevanten Anzahl von Beschäftigten zu erfassen.

2.2.2 Arbeitsplätze in sonstigen Arbeitsfeldern

Arbeitsplätze mit potentiell erhöhter Radonaktivitätskonzentration aufgrund des Eindringens von Radon aus dem Boden (bzw. aus Reservoirren wie Leitungsnetzen und Hohlräumen) können keinem bestimmten Arbeitsfeld zugeordnet werden, sondern sind in allen Arbeitsfeldern anzutreffen.

Dementsprechend ist die Zahl dieser Arbeitsplätze deutlich größer als die Zahl der Arbeitsplätze der in Abschnitt 2.2.1 zusammengestellten Arbeitsfelder. Im Ergebnis der Literaturrecherche wurden hierzu die folgenden Arbeitsfelder identifiziert:

- Bauwesen, v.a. Radonsanierung in Kellern [16],
- Telekommunikation (Betrieb und Wartung von Leitungstunneln) [15],
- Abwasserentsorgung, Kanalsysteme bzw. -schächte ohne ausreichende Belüftung [20],
- Getränkeindustrie (Weinkeller, Getränkelager) [21],
- Tunnelbau (Straßen-, Eisenbahn- und U-Bahn-Tunnel) [14],
- Rechenzentren mit Nutzung von untertägigen Bunkern und aufgelassenen untertägigen Bergwerken [22],
- Energieerzeugung mit untertägigen Generatorhallen, z.B. in Staumauern [11],
- Landwirtschaft, Gartenbau mit Räumen ohne befestigte Böden, Gewächshäuser, Stallungen u.ä. [13],

- Museums- und Archivwesen: Kellerräumen, Kirchen, Klöster, Schlösser und Burgen [13],
- Landesverteidigung, militärische Bunker [23, 24].

Darüber hinaus sind auch Arbeitsplätze in vielen anderen Arbeitsfeldern vorhanden, die zunächst nicht vordergründig mit erhöhten Radonkonzentrationen in Verbindung gebracht werden, in denen aber aufgrund des Eindringens von Radon aus dem Boden, aus Heizungs- oder Kabeltunneln, Verbindungsschächten u. ä. deutlich erhöhte Radonkonzentration vorhanden sein können.

2.2.3 Klassifikation der Berufe der Agentur für Arbeit

Im Sinne der Zielstellung des Vorhabens soll die Anzahl der dem Arbeitsfeld jeweils zugeordneten Arbeitsplätze einschließlich der dort Beschäftigten den administrativen Vollzug strahlenschutzrechtlicher Festlegungen gestatten [25].

Eine in [13] betrachtete Möglichkeit der Klassifizierung der Arbeitsfelder und Arbeitsplätze beruht auf der Klassifikation der Berufe (KIdB) der Bundesagentur für Arbeit [26]. Für jede der fünf Gliederungsebenen wurden zahlenmäßige Angaben der Beschäftigten gemacht, was grundsätzlich eine Einschätzung über die Relevanz im Rahmen des Vollzugs erlauben würde.

Die den Berufen zuordenbaren Arbeitsplätze besitzen jedoch keinen eindeutigen Bezug zu Materialien mit erhöhter natürlicher Radioaktivität und damit einer potentiell erhöhten Radonaktivitätskonzentration. Es kann sich beispielsweise um Büroarbeitsplätze oder Arbeitsplätze im Freien handeln. Die Expositionsbedingungen bezüglich Radon hängen vom einzelnen Arbeitsplatz und von der genauen Tätigkeit, Aufenthaltszeiten etc. ab, nicht vom Beruf.

Es ist deshalb zu hinterfragen, ob diese Methode der Klassifizierung auf der Basis der KIdB für das hier bearbeitete Vorhaben zielführend ist, da es auf allgemein definierten Berufen und nicht auf konkreten Arbeitsplätzen beruht.

2.2.4 Begründung des Strahlenschutzgesetzes

Eine Abschätzung der Größenordnung der Anzahl von Arbeitsplätzen mit potentiell erhöhter Radonaktivitätskonzentration aufgrund des Eindringens von Radon aus dem Boden ermöglicht die Begründung des StrlSchG zu §127 [27]. Dort wird für Radonvorsorgegebiete eine Zahl von 488.000 Arbeitsplätzen im Keller- und Erdgeschoss abgeschätzt, davon 341.000 Arbeitsplätze zusätzlich zu den Arbeitsplätzen in Arbeitsfeldern entsprechend Anlage 8 StrlSchG.

In der Begründung des StrlSchG zu §127 [27] ist im Gegensatz zur Abschätzung der Zahl von Arbeitsplätzen, die durch das Eindringen von Radon aus dem Boden in Innenräume potentiell erhöhte Radonkonzentrationen aufweisen, keine Abschätzung der Zahl von Arbeitsplätzen in Innenräumen mit einem ursächlichen Zusammenhang der Radonaktivitätskonzentration mit einer erhöhten spezifischen Aktivität der gehandhabten Materialien enthalten.

Allerdings wird in der Begründung des StrlSchG [27] zu §§ 55 und 59 von ca. 400 Betrieben ausgegangen, in denen Expositionsabschätzungen an Arbeitsplätzen in einem der in Anlage 3 genannten Tätigkeitsfelder erforderlich sind. Dabei wird von einer mittleren Anzahl von sechs betroffenen Beschäftigten je Betrieb ausgegangen. Daraus ergibt sich eine im unteren vierstelligen Bereich liegende Zahl von „Arbeitsplätzen mit Exposition durch natürlich vorkommende Radioaktivität“. Diese Zahl lässt zwar keinen direkten Rückschluss auf

Arbeitsplätze zu, an denen signifikant erhöhte Radonaktivitätskonzentrationen in der Atemluft vorliegen, liefert aber einen Anhaltspunkt dafür, dass die Zahl der potenziell betroffenen Arbeitsplätze um mehrere Größenordnungen unterhalb der Zahl von Arbeitsplätzen liegt, welche nur durch ihren Arbeitsort (Keller bzw. Erdgeschoss mit erhöhten Radonkonzentration an aus dem Boden) gekennzeichnet sind.

2.2.5 Studien des BfS

Einen Anhaltspunkt für die zahlenmäßige Abschätzung von Arbeitsplätzen mit möglicherweise erhöhten Radonaktivitätskonzentrationen aufgrund erhöhter spezifischer Aktivitäten von Ra-226 in den gehandhabten Materialien liefert Anlage 3 StrlSchG. Die in der Studie [12] durchgeführte Abschätzung der Arbeitsplätze, für die eine Strahlenexposition nach § 55 StrlSchG zu prüfen ist (einschließlich der Arbeitsplätze, an denen Radon zu einer signifikanten Exposition führt), ergab etwa 900 bis 1000 Arbeitsplätze.

Dieser Wert ist um mehrere Größenordnungen kleiner als die Zahl der Arbeitsplätze mit potentiell erhöhter Radonaktivitätskonzentration aufgrund des Eindringens von Radon aus dem Boden.

In [13] wurden Arbeitsplätze bzw. Arbeitsstätten benannt. Bei diesen spielt „eine mehr oder weniger große unmittelbare Erdberührung des Raumes bzw. seine Lage unter der Erdoberfläche, eine geringe Luftwechselrate und/oder das Vorhandensein von Wasserflächen, über die Radon in die Raumluft abgegeben werden kann, eine Rolle“. Hierzu stellten die Autoren von [13] fest, dass „in den meisten der genannten Beispiele die Zahl der Arbeitsplätze deutschlandweit gering ist. In Einzelfällen mag eine gezielte Betrachtung sinnvoll sein.“ Konkrete Zahlenangaben werden in [13] jedoch nicht gemacht.

2.2.6 Vorgehensweise bei der Identifizierung der für das Vorhaben geeigneten Arbeitsplätze

Zusammenfassend ist der Ansatz der Klassifizierung anhand der KldB [26] bzw. von Arbeitsfeldern entsprechend Anlage 3 StrlSchG nicht zielführend für die Identifizierung von Arbeitsplätzen, an denen Messungen der Radonaktivitätskonzentration sowie der Aerosolkonzentration durchgeführt werden sollten.

Demgegenüber ist es erfolgversprechender, eine Auswahl von Arbeitsplätzen anhand der im Einzelfall vorliegenden Informationen vorzunehmen, an denen aufgrund der Handhabung von Stoffen mit erhöhten spezifischen Radiumaktivitäten auch eine deutlich erhöhte Radonkonzentration vorliegt bzw. aufgrund der Lage des Arbeitsplatzes erhöhte Radonkonzentrationen zu erwarten sind und an denen die weiteren Anforderungen der Leistungsbeschreibung (v.a. Konstanz der Umgebungs- und Arbeitsbedingungen) erfüllt sind.

Allerdings sind erhöhte Radonkonzentrationen aufgrund der Handhabung von NORM in der Praxis erfahrungsgemäß kaum anzutreffen, so dass Arbeitsplätze mit einer signifikanten Radonexposition vor allem durch das Eindringen von Radon aus dem Baugrund bzw. angrenzenden Tunneln, Medienkanälen oder aus anderen Gebäuden charakterisiert sind.

Ein wichtiger Gesichtspunkt für die Entscheidung darüber, die im vorliegenden Bericht dargestellten Messungen durchzuführen zu können, war die Bereitschaft der Eigentümer, gewisse Einschränkungen von 2 bis 3 Wochen in den täglichen Arbeitsabläufen bzw. auch an den Wochenenden zum Aufrechterhalten des Messregimes zuzulassen, die auch bei weitestgehender Anpassung des Auftragnehmers an die Anforderungen der Eigentümer nicht vollständig zu vermeiden waren.

Auf diesen Grundlagen wurden im Verlauf der Bearbeitung die als Messorte geeigneten Arbeitsplätze identifiziert und mit dem Auftraggeber abgestimmt. Eine Übersicht über alle Arbeitsplätze und die jeweiligen Messzeiträume ist in Tabelle 1 gegeben. Den Arbeitsplätzen wurden in Tabelle 2 die jeweiligen Arbeitsfelder entsprechend der Systematik der KldB [26] zugeordnet.

Tabelle 1: Überblick über die Anzahl und Zeiträume die 19 Detailmessungen im Rahmen der 2 Messkampagnen 2021 und 2022

lfd. Nr.	Raumnummer	Zeitraum	Messdauer (Tage)	Bemerkung	Arbeitsfeld und Arbeitsplatz (siehe Tabelle 2)
1	R1	2.6 - 18.6.2021	16	Auswertung Gesamtmesszeitraum	Verkauf, Handel, Veranstaltungsdienstleistungen: Verkaufs- und Ausstellungsraum für Veranstaltungen, Ostthüringen
2	R2	18.6. - 9.7.2021	21	Auswertung Gesamtmesszeitraum	Verkauf, Handel, Veranstaltungsdienstleistungen: Lager und Reparatur für Veranstaltungsartikel und Geräte, Ostthüringen

3	R3	9.7. - 30.7.2021	21	Auswertung Gesamtmesszeit- raum	Produktionsbetriebe (Chemieindustrie): Produktionshalle, Mittelsachsen
4	R3_1	9.7. - 19.7.2021	10	Auswertung der ca. 3-wöchigen Messungen nach den ersten 10 Mes- stagen	s.o. Ergänzende Messungen aufgrund Veränderung des Arbeitsplatzes
5	R3_2	19.7. - 30.7.2021	11	Auswertung der ca. 3-wöchigen Mes- sungen nach den nachfolgenden 11 Tagen	s.o. Ergänzende Messungen aufgrund Veränderung des Arbeitsplatzes
6	R4	9.9. - 29.9.2021	20	Auswertung Gesamtmesszeit- raum	Archivwesen, Dokumentation: Archiv Krankenhaus, Erzgebirge
7	R5	29.9 - 18.10.2021	19	Auswertung Gesamtmesszeit- raum	Produktionsbetriebe (Maschinenbau): Maschinenfabrik, Ostthüringen
8	R5_1	29.9 - 8.10.2021	9	Auswertung der ca. 3-wöchigen Mes- sungen nach den ersten 9 Messtagen	s.o. Ergänzende Messungen aufgrund Veränderung des Arbeitsplatzes
9	R5_2	8.10 - 18.10.2021	10	Auswertung der ca. 3-wöchigen Mes- sungen nach den nachfolgenden 10 Tagen	s.o. Ergänzende Messungen aufgrund Veränderung des Arbeitsplatzes
10	R6	18.10. - 29.10.2021	11	Auswertung Gesamtmesszeit- raum	Erziehung, Ausbildung, Schule: Werkenraum einer Schule, Ostsachsen
11	R7	29.10. - 11.11.2021	13	Auswertung Gesamtmesszeit- raum	Erziehung, Ausbildung, Schule: Hausmeisterraum einer Schule, Ostsachsen
12	R2_2	20.4. - 27.4.2022	7	Wiederholungs- messung in R2 nach ca. 9 Monaten	Siehe Raum 2, ergänzende Messungen aufgrund Verän- derung des Arbeitsplatzes
13	R4_2	27.4. - 4.5.2022	7	Wiederholungs- messung in R2 nach ca. 9 Monaten	Siehe Raum 4, ergänzende Messungen aufgrund Verän- derung des Arbeitsplatzes
14	R8	4.5. - 11.5.2022	7	Auswertung Gesamtmesszeit- raum	Gesundheit, Medizin, Pflege: Pflegedienst, Büro, Aufnahme und Behandlung, Erzgebirge

15	R9	11.5.- 18.5.2022	7	Auswertung Gesamtmesszeit- raum	Produktionsbetriebe (Metallbearbeitung) Werkstatt Metallgewerbe, Erzgebirge
16	R10	18.5. - 25.5.2022	7	Auswertung Gesamtmesszeit- raum	Produktionsbetriebe (Papier- und Verpackungs- technik): Labor einer Recycling- Kartonagenfabrik, Erzgebirge
17	R10_1	18.5. - 21.5.2022	3,5	Auswertung der ca. 7-tägigen Messungen nach den ersten 3,5 Messtagen	s.o. Ergänzende Messungen aufgrund Veränderung des Arbeitsplatzes
18	R10_2	21.5. - 25.5.2022	3,5	Auswertung der ca. 7-tägigen Messungen nach den ersten 3,5 Messtagen	s.o. Ergänzende Messungen aufgrund Veränderung des Arbeitsplatzes
19	R11	3.6. - 16.6.2022	13	Auswertung Gesamtmesszeit- raum	Produktionsbetriebe (Kosmetik/Pharma): Reinraum, Lager, Erzgebirge

Tabelle 2: Zuordnung der Arbeitsplätze zum Klassifikationssystem KIdB der Bundesagentur für Arbeit

Arbeitsfeld	Beispielhafte Zuordnung KIdB	Arbeitsplätze für die Messungen
Gesundheit, Medizin, Pflege	811-814	Krankenhauskomplex Sachsen, Ergotherapie
		Krankenhauskomplex Sachsen, Teeküche oder Umkleide
		Krankenhauskomplex Sachsen, Heizzentrale oder Heizungskanal
Verkauf, Handel, Veranstaltungen-dienstleistungen	621, 624, 634	Büros angrenzend am Versuchsraum Ronneburg
		Versuchsraum Ronneburg
		Hausmeisterräume im Gebäude des Versuchsraumes Ronneburg
Erziehung, Ausbildung, Schule	831, 841, 843	Kita, Gruppenraum
		Kita, Büro Leiterin
		Kita, Turnraum
Produktionsbetriebe (Maschinenbau, Chemieindustrie)	251, 413	Maschinenbau, Produktionshalle
		Maschinenbau, Büro
		Maschinenbau, Elt-Lager

Archivwesen, Dokumentation	733	Landesarchiv, Archivraum
		Landesarchiv, Bibliothek
		Landesarchiv, Büro

Den Eigentümern der Räume wurde Diskretion zugesagt, so dass die Räume in Tabelle 1 und Tabelle 2 ohne Ortsbeziehung gekennzeichnet sind. Dies ist auch unter dem Gesichtspunkt zu sehen, dass in etwa der Hälfte der Räume der Referenzwert von 300 Bq/m³ [4] unter den gegenwärtig herrschenden Lüftungs- und Arbeitsbedingungen nicht eingehalten werden konnte. Für die Projektarbeit war es jedoch auch von Vorteil, Räume mit erhöhten mittleren Radonkonzentrationen untersuchen zu können.

2.3 Experimentierraum zur Vorbereitung

Im Vorfeld der Messungen wurden in einem als Lagerhalle bzw. Werkstatt eines Klein-gewerbes im Veranstaltungsmanagement genutzten großen Raum in Ronneburg (Radon-Vorsorgegebiet im Freistaat Thüringen) innerhalb eines Gewerbegebäudes Messgeräte für Radon und Radonfolgeprodukte sowie für die Aerosolkonzentrations-bestimmung über einen Zeitraum von ca. 3 bis 4 Wochen im Rahmen eines komplexen Tests betrieben. In den ausgewählten Räumen liegen Radonkonzentrationen von bis ca. 1000 Bq/m³ vor (s. Abbildung 1).

Ziel der geplanten vorbereitenden Messungen war es, das Zusammenspiel aller Messgeräte zu testen und Grundlagen für eine effiziente Auswertung der Messergebnisse für die sich daran anschließenden komplexen Messaufgaben zu gewinnen. Während der Messungen sind tägliche Kontrollen und insgesamt drei Mal (jeweils nach einer Woche) ein komplettes Auslesen der Daten und eine Auswertung der Ergebnisse vorgesehen.

Je nach Witterungslage und Lüftungssituation waren teilweise starke Variationen der Radonkonzentrationen zu beobachten, so dass der Gewerberaum sich als gut geeignet herausstellte, um entsprechende Vorversuche problemangepasst durchzuführen.

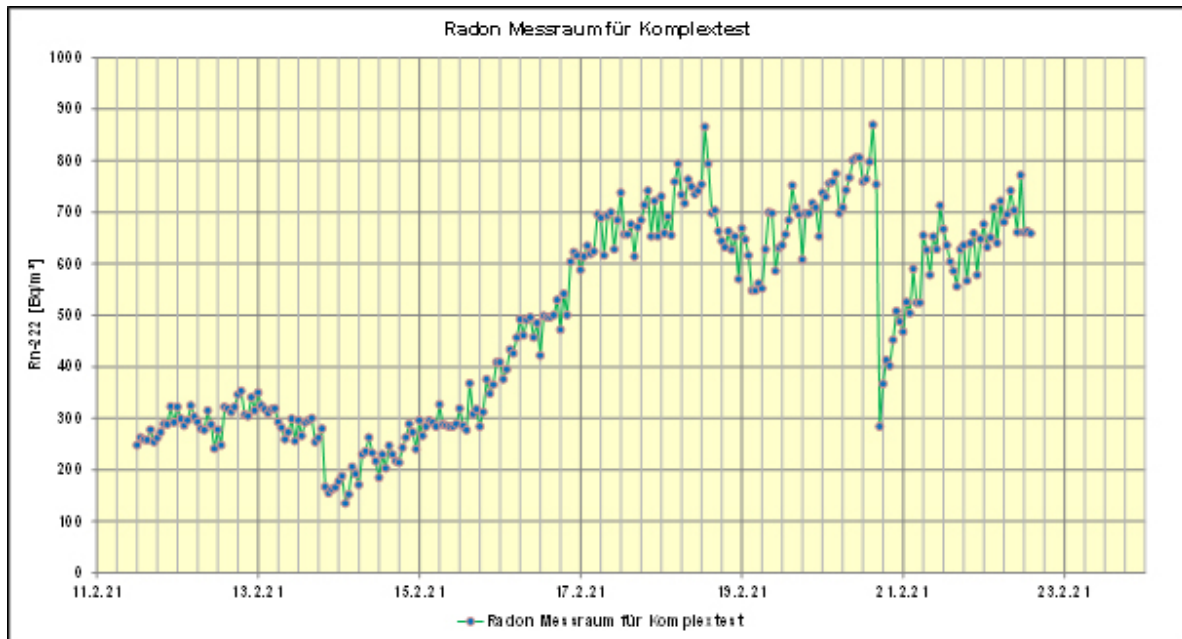


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf der Radonkonzentrationen im Messraum für den Radon-Komplextest im Rahmen des Forschungsvorhabens

2.4 Zur Weiterführung der Untersuchungen nach Beendigung der Messungen im Rahmen des Forschungsvorhabens

Im Vorfeld der Umsetzung des Untersuchungsprogramms im Rahmen des Forschungsvorhabens ist eine Vielzahl von Arbeitsplätzen inspiziert worden, die für die Erreichung des Forschungsziels als geeignet erschienen. Dazu war erforderlich, eine Vielzahl von Kurzzeitmessungen über eine Zeitdauer von ca. 1 bis 2 Wochen durchzuführen, um ausreichend genau abzuschätzen zu können, ob der jeweilige Arbeitsplatz für die im Forschungsvorhaben definierten Aufgaben geeignet ist. Außer der zu quantifizierenden Radonsituation spielten auch die örtlichen Platzverhältnisse eine wichtige Rolle. Wie in Kapitel 3 dargestellt, musste für die vielen einzusetzenden Messgeräte ausreichend Stellplatz vorhanden sein, überdies durften die Messgeräte den Arbeitsablauf nicht behindern. In Übereinstimmung mit den Eigentümern wurden schließlich vorrangig nur solche Arbeitsplätze ausgesucht, die die vorgenannten Bedingungen erfüllten und bei denen große tageszeitliche Variationen der Radonkonzentrationen auftraten.

Des Weiteren ist anzumerken, dass für die Sicherstellung einer bundeseinheitlichen Qualität der Radonmessungen am Arbeitsplatz, die Anbieter solcher Messungen als anerkannte Stelle gemäß §155 Strahlenschutzverordnung [1] anerkannt sein müssen. Die Anerkennung ist eine Voraussetzung dafür, dass die Messergebnisse von der zuständigen Landesbehörde, die den Arbeitsschutz überwacht, akzeptiert werden können. Sie bestätigt, dass der Anbieter geeignete Geräte zur Messung der Radon-Aktivitätskonzentration an Arbeitsplätzen im Sinne der Strahlenschutzgesetzgebung einsetzen und auswerten kann. Die IAF-Radioökologie GmbH ist als anerkannte Radonmessstelle durch das BfS ausgewiesen [28].

Der §128 (1) StrlSchG [4] verlangt von einem für einen Arbeitsplatz Verantwortlichen,

unverzüglich Maßnahmen zur Reduzierung zu ergreifen, wenn die Rn-222-Aktivitätskonzentration in der Luft den Referenzwert von 300 Bq/m³ überschreitet. Zur Feststellung der Überschreitung werden Festkörper-Kernspurdetektoren (KSD) über einen Zeitraum von 12 Monaten am Messort exponiert. Es können bei Erfordernis auch mehrere aufeinanderfolgende, kürzere Messdauern realisiert werden.

Die Messung mit Radon-Monitoren muss einen Zeitraum von 12 Monaten repräsentativ abbilden, wobei von Messzeiträumen bis zu 4 Wochen auszugehen ist. Die Vorgehensweisen im Hinblick auf eine belastbare Prognose der Radonsituation wurden von der IAF-Radioökologie GmbH u. a. in zwei Forschungsvorhaben des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) [29, 30] und in Projekten für Schulen und öffentliche Gebäude [31, 32] detailliert untersucht und die Belastbarkeit der Untersuchungsergebnisse bestätigt. Hierbei spielt eine besondere Rolle, dass das Systemverhalten des zu untersuchenden Objekts hinsichtlich des Radontransports erfassbar ist.

Nach §155 (1) StrlSchV [1] kann eine Überschreitung des Referenzwertes von 300 Bq/m³ auch auf der Grundlage einer kürzeren Messzeit als 12 Monate festgestellt werden, wenn auf Grund einer Abschätzung der über das Jahr gemittelten Radon-222-Aktivitätskonzentration davon auszugehen ist, dass der Referenzwert überschritten wird. Dies ist bei den meisten Arbeitsplätzen, die im Rahmen des Forschungsprojekts ausgewählt wurden, der Fall. Die mittels zeitauflösenden Radon-Monitoren realisierten Messungen über kürzere Messzeiten bieten gegenüber den Messungen mit Festkörper-Kernspurdetektoren den großen Vorteil, dass erkannt werden kann, zu welchen Tageszeiten die höchsten Radonkonzentrationen zu erwarten sind. Daraus folgen in der Regel auch gleichzeitig Hinweise darauf, welche Maßnahmen zur Reduktion erhöhter Radonkonzentrationen zu ergreifen sind.

Die Radonkonzentrationsentwicklungen an Arbeitsplätzen unterliegen aufgrund typischer Nutzungsszenarien erfahrungsgemäß einem bestimmten Tages- und Wochenrhythmus. Deshalb sind bereits 7-Tagesmessungen (inklusive Wochenende) geeignet, die Radonsituation ausreichend genau zu beschreiben. Sind im Sinne der StrlSchV [1] aus formalen Gründen Langzeitmessungen erforderlich, so können diese nur mit Festkörper-Kernspurdetektoren realisiert werden, was eine Bewertung der Radonsituation auf über ein Jahr verschoben würde, wobei aber zwischenzeitlich keine Maßnahmen zu einer Reduktion erhöhter Radonkonzentrationen eingeleitet werden können.

Hierbei ist auch zu beachten, dass die Messungen der Radon-222-Aktivitätskonzentration nach §127 Absatz 1 und §128 Absatz 2 StrlSchG [4] nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik über eine Gesamtdauer von zwölf Monaten durchzuführen sind, wobei die Messorte so auszuwählen sind, dass sie repräsentativ für die Radon-222-Aktivitätskonzentration an dem zu untersuchenden Arbeitsplatz sind. Das bedeutet, dass z.B. eine Messung über ein Jahr nicht als repräsentativ angesehen werden kann, wenn z.B. große Unterschiede in den Radon-222-Aktivitätskonzentration tagsüber im Vergleich zu nachts oder zu arbeitsfreien Wochenenden bestehen. Die zeitauflösenden Messungen über 1 - 2 Wochen sind deshalb prädestiniert, hinreichend genau auszuloten, ob der ausgewählte Messort repräsentativ im Sinne von §127 Absatz 1 und §128 Absatz 2 des StrlSchG gewählt worden ist.

Ein Messzeitraum von ca. 1 bis 2 Wochen ist nach Erfahrungen des Auftragnehmers und der Auswertung von mehr als 10.000 zeitaufgelösten Einzelmessungen ausreichend, um belastbar einschätzen zu können, ob in den untersuchten Räumen von einer erhöhten Radonkonzentration auszugehen ist.

Im Ergebnis der Vorabmessungsergebnisse haben die Eigentümer zunächst auf eine zusätzliche Langzeitmesskampagne von 12 Monaten mit KSD verzichtet, da aufgrund der bereits vorliegenden zeitaufgelösten Messergebnisse über einen Zeitraum von 1 bis 2 Wochen entsprechende Maßnahmen zur Reduzierung der Radonkonzentrationen getroffen wurden. Eine Gegenüberstellung der im Rahmen des Forschungsvorhabens erzielten Messergebnisse zu den im Verlauf der Zeit sich verändernden Expositionssituationen im Ergebnis von Sanierungsmaßnahmen, wurde deshalb nicht als sinnvoll erachtet.

Es wurde vielmehr als zielführend angesehen, dass erst entsprechende Langzeitmessungen in Angriff genommen werden sollten, wenn zeitaufgelöste Kurzzeitmessungen über 1 bis 2 Wochen den Erfolg der geplanten Sanierungsmaßnahmen belegt haben.

3 Methodik der Messungen

3.1 Messung der Aktivitätskonzentration von Radon und Radonfolgeprodukten

Es wurden insgesamt 7 Radon- und Radonfolgeproduktmessgeräte, eingesetzt, um neben dem übergreifenden Ziel der Qualitätssicherung einen Überblick über die Güte der Messergebnisse zu erhalten und um Erkenntnisse darüber zu gewinnen, ob eine Anschlusskalibrierung für einige Messgeräte eventuell erforderlich ist. Die Messanordnung ist in Abbildung 2 gezeigt. Zusätzlich wurden Parameter zur Charakterisierung der Innenraumbedingungen messtechnisch erfasst. Ein Überblick zum Radon-Messtechnikeinsatz ist der Tabelle 2 und Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 3: Überblick zum Radon-Messtechnikeinsatz

Gerät	Rn-222	Rn-222 FP				Messintervall	Messort
		gesamt	angel.	frei	clusterd		
Alphaguard	x					1h	Innenraum
Alpha-PM		x				1h	Innenraum
EQF 3220	x	x	x	x	x	1h	Innenraum
EGF 3120	x	x	x	x		2h	Innenraum
WLM-Plus		x				1h	Innenraum
RDM-Plus		x				1h	Innenraum
BWLM-Plus		x				1h	Innenraum

Tabelle 4: Nachweisgrenzen und Messbereiche der eingesetzten Radon-Messtechnikeinsatz

Gerät	Parameter	NWG (60 /120 min)	Messbereich	Einheit
Alphaguard	Rn-222		2 bis 2E+06 Bq/m ³	Bq/m ³
Alpha-PM	Rn-ZP	ca. 0,3	1 bis 1E+06 Bq/m ³ -EEC	Bq/m ³ -EEC
EQF 3220	Rn-222-fast	ca. 6	1 bis 1E+06 Bq/m ³	Bq/m ³
	Rn-ZP		1 bis 1E+06 Bq/m ³ -EEC frei/angelagert	Bq/m ³ -EEC
EQF 3120	Rn-222	ca. 5	5 bis 10E+06 Bq/m ³	Bq/m ³
	Rn-ZP		1 bis 0,7E+06 Bq/m ³ -EEC	Bq/m ³ -EEC
WLM-Plus	Rn-ZP	ca. 1	0,5 - 20.000 Bq/m ³ -EEC	Bq/m ³ -EEC
RDM-Plus	Rn-ZP	ca. 1	0,5 - 20.000 Bq/m ³ -EEC	Bq/m ³ -EEC
BWLM-Plus	Rn-ZP	ca. 1	0,5 - 20.000 Bq/m ³ -EEC	Bq/m ³ -EEC



Abbildung 2: Messanordnung verschiedener Messgeräte für Radon, Radonfolgeprodukte und weitere Parameter

3.2 Messung der Aerosolkonzentration am Arbeitsplatz

Für die Bestimmung der Aerosolkonzentration an den ausgewählten Arbeitsplätzen, wird das Aerosol mit Hilfe eines vom TROPOS (home made) entworfenen Partikelgrößenspektrometers, genannt T-MPSS (**T**win **M**obility **P**article **S**ize **S**pectrometer), in einem Scanbereich von 5 bis 800 nm und einer zeitlichen Auflösung von 5 min betrieben. Das Gerät wird in regelmäßigen Abständen kalibriert und unterliegt den Qualitätsstandards wie in [33] beschrieben.

Schematisch ist das vom TROPOS entwickelte T-MPSS wie folgt aufgebaut (siehe auch Abbildung 3): Bestehend aus zwei unabhängig betriebenen Partikelgrößenspektrometern, welche im Kern aus einem DMA (**D**ifferential **M**obility **A**nalyzer) und einem CPC (**C**ondensation **P**artikel **C**ounter) der Firma TSI bestehen, wird das am Arbeitsplatz enthaltene Aerosol hinsichtlich seiner elektrischen Mobilität in definierte Größenklassen eingeordnet und dann mit einer bekannten Mehrfachladungsverteilung [34, 35] in eine Partikelanzahlkonzentration umgerechnet. Darüber hinaus werden zusätzliche interne Korrekturen, welche aufgrund des physikalischen Messprinzips (Diffusionsverluste durch Leitungslängen, Flusskorrektur, CPC Effizienzkurven) auftreten, berücksichtigt und eingerechnet. Die Genauigkeit des T-MPSS, bezogen auf die Partikelgrößenverteilung im Scanbereich von 20 bis 500 nm, liegt nach Vorgaben des WCCAP in +/-10% zu einem am WCCAP betriebenen Referenz-Größenspektrometers. Durch die hohe Auflösung der Aerosolpartikel bezüglich Zeit und Teilchengröße ist es möglich, Partikelgrößenverteilungen ($dN/d\log D_p$, [cm^{-3}]) für verschiedene Zeiträume, Totalkonzentrationen (N , [cm^{-3}]) oder Oberflächenkonzentration (S , [$\mu\text{m}^2 \text{cm}^{-3}$]), welche möglicherweise Rückschlüsse auf Anlagerungen von Radonverfallsprodukten erlauben, am Arbeitsplatz zu berechnen bzw. bestimmen.

S und N im Bereich $D_{p,1}$ bis $D_{p,2}$ (untere bzw. obere Grenze des Messbereiches) werden nicht direkt gemessen. Es sind abgeleitete Größen aus der Anzahlgrößenverteilung $\frac{dN}{d \log(D_p)}(D_p)$

$$N(D_{p,1} - D_{p,2}) = \int_{D_{p,1}}^{D_{p,2}} \frac{dN}{d \log(D_p)}(D_p) dD_p$$

$$S(D_{p,1} - D_{p,2}) = \pi \int_{D_{p,1}}^{D_{p,2}} D_p^2 \frac{dN}{d \log(D_p)}(D_p) dD_p$$

und liegen damit in einer zeitlichen Auflösung von 5 min vor. Messbereiche sind mit den Messbereichen der genutzten CPC und der Anzahl der Größenklassen der Partikelanzahlgrößenverteilung herleitbar. Pro Größenklasse können die CPC ohne in Koinzidenzbereiche zu kommen (0 bis 10000 cm^{-3}) Partikel detektieren. Mit den 46 Größenklassen also maximal 460000 cm^{-3} . Unter der Annahme von maximal 10000 Partikeln pro Größenklasse ergibt sich so eine theoretisch maximale Oberflächenkonzentration von $\sim 100000 \mu\text{m}^2 \text{ cm}^{-3}$. Die jedoch in der Realität niemals auftritt, da es vor allem in den größeren Größenklassen nie zu solch hohen natürlichen Konzentrationen kommt.

An Hand der gemessenen Aerosolpartikelgrößenverteilungen können verschiedene weitere Größen, wie integrierte Totalkonzentration (N , [cm^{-3}]) und integrierte

Oberflächenkonzentration (S , [$\mu\text{m}^2 \text{cm}^{-3}$]) ermittelt werden und ermöglichen so möglicherweise Rückschlüsse auf angelagerte Radonabbauprodukte.

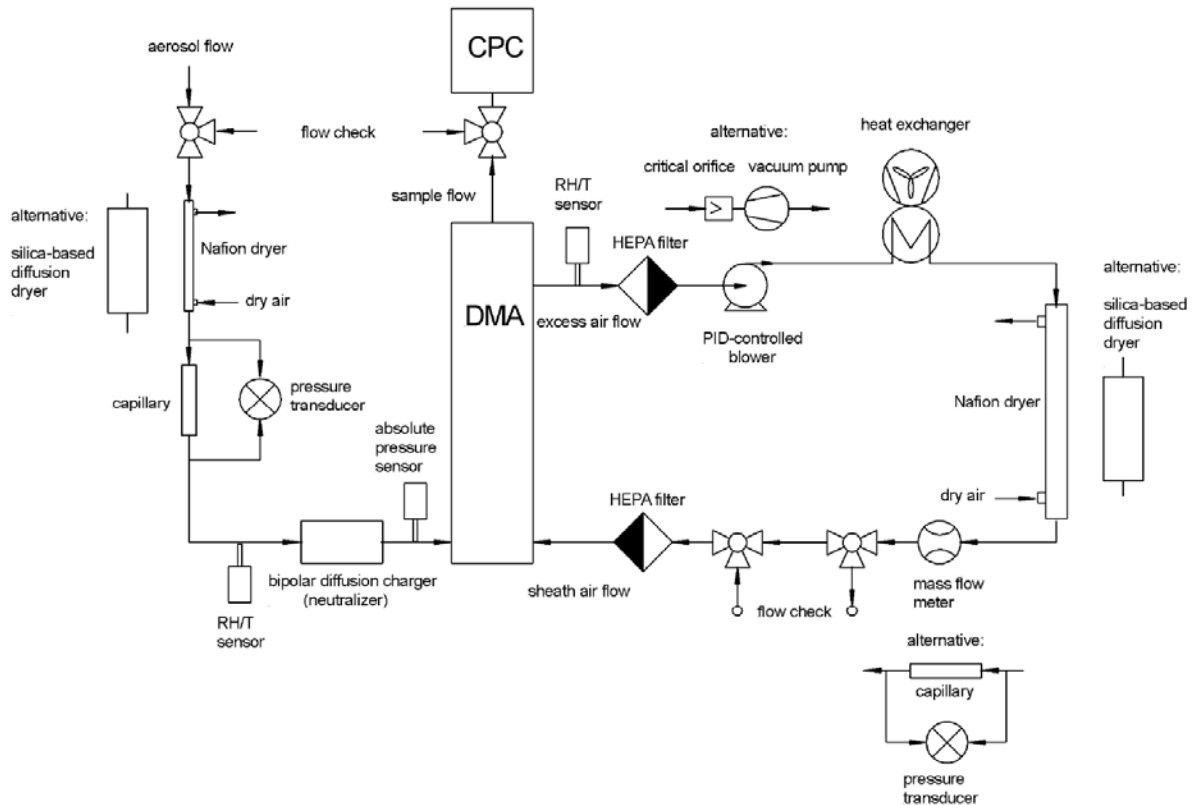


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Aerosolmesssystems T-MPSS

In Abbildung 4 ist die für die Arbeitsplatzmessungen eingesetzte Aerosol-Messtechnik gezeigt. An den Messstandorten befindet sich ein T-MPSS, mit 2 DMA und 2 CPC um den detektierbaren Größenbereich zu erhöhen.



Abbildung 4: Einsatz der Aerosol-Messtechnik

Nach erfolgreicher Umsetzung des Gerätes an einen neuen Arbeitsplatz wird das T-MPSS auf seine Funktionsweise überprüft und nötige Kalibrierungen vor Ort durchgeführt. Dazu gehören unter anderem Fluss-, Hochspannungs- und Nullluftprüfung. Zusätzlich ermöglicht ein Remotezugriff die ständige Überwachung der Messungen, welche in der Regel völlig autonom ablaufen. Der dem Arbeitsplatz entnommene Gesamtaerosolfluss im T-MPSS beträgt 2 l/min und wird mit Hilfe einer definierten Ansaugleitung, in einem Abstand von ca. einem Meter zu den zusätzlich im Projekt betriebenen wissenschaftlichen Geräten, platziert. Dabei wird darauf geachtet, dass die relative Feuchte von 40% nicht überschritten wird, um ungewolltes hygroskopisches Anwachsen der Aerosolpartikel zu vermeiden. Das T-MPSS ist mit zahlreichen Sensoren, z. B. interne Flusskontrolle, Feuchte-, Temperatur- und Drucksensoren ausgestattet, welche kontinuierlich während der Messungen aufgezeichnet werden.

3.3 Messung weiterer relevanter physikalischer Größen

Ergänzend zum T-MPSS ist ein CO₂-Sensor der Firma Vaisala, welcher sich in der Nähe der Ansaugleitung befindet, in die Messungen eingebunden. Dies soll unterstützend Informationen über das Lüftungsverhalten am Arbeitsplatz liefern. Da ein Austausch der „Luftmassen“ wie auch Aktivitäten durch Mitarbeiten am Arbeitsplatz mit der Veränderung der CO₂-Konzentration korrelieren. Der Messbereich beträgt 0 bis 30.000 ppm, mit einer Genauigkeit von ± 40 ppm CO₂ (0 – 3000 ppm), $\pm 2\%$ (3000 – 10000 ppm) und $\pm 3.5\%$ (bis 30000 ppm) und wird im 1-Minutenmittel aufgezeichnet. Näheres findet sich im Gerätehandbuch der Sonde [36].

In der Tabelle 5 und Tabelle 6 sind die weiteren Messgeräte der physikalischen Parameter zusammengestellt.

Tabelle 5: Überblick zum weiteren Messtechnikeinsatz

Gerät	Temp.	rel. Luftfeuchte	Luftdruck	CO ₂	Nieder-schlag	Messintervall	Messort
Almemo	x	x	x	x		10 s	Innenraum
DWD	x	x	x		X	1 h	Nächstgelegene Wetterstation

Tabelle 6: Messbereiche und Messtoleranzen des Messgerätes Almemo

Parameter	Genauigkeit	Messbereich	Einheit
CO ₂	±(100 ppm +5 % vom Messwert)	0 bis 10.000 ppm	ppm
Relative Luftfeuchtigkeit	±2,0 % r.F. im Bereich 10 ... 90 % r.F.	5...98 % r.F	% rel. Feucht
Temperatur	typ. ±0,2 K bei 5 ... 60 °C	-20...+80 °C	°C
Luftdruck	0,05 % v. Endwert, d.h. 0,6 mBar; 60 Pa	0,8 bis 1,2 bar absolut	bar

Des Weiteren wurden für die Wetteraufzeichnungen immer die entsprechenden Daten (z. B. Niederschlagsmenge, Luftfeuchte, Temperatur etc.), die von der nächstgelegenen Wetterstation des DWD zur Verfügung stehen, in die Untersuchungszeiträume eingearbeitet.

3.4 Aufzeichnung der Bedingungen an den Arbeitsplätzen

Zur besseren Interpretation der Messergebnisse beinhaltet das in Abschnitt 3.2 beschriebene Aerosolmesssystem T-MPSS ein digitales Logbuch, welches den Beschäftigten am Arbeitsplatz ermöglicht, ihre Aktivitäten zeitgenau zu dokumentieren. Die Erfassung erfolgt über den Laptop des T-MPSS. Zu den erfassten Parametern gehörten unter anderem das Lüften, Betreten und die Veränderungen der Umgebungsbedingungen am Arbeitsplatz. Diese aktivitätsbezogene Dokumentation durch Mitarbeiter ermöglicht eine zusätzliche Genauigkeit bei der Filterung der Datensätze und ist eine hilfreiche Ergänzung bei der Interpretation von Veränderungen am Arbeitsplatz basierend auf der von IAF gemessenen Temperatur, Feuchte, Differenzdruck sowie der CO₂-Konzentration.

Zunächst erfolgte bei der weiteren Datenauswertung ein Bezug auf das Logbuch. Im Anschluss daran, insbesondere bei Unstimmigkeiten und /oder bei fehlenden Einträgen, wurden weitere Parameter einbezogen (Differenzdruck, Feuchte und Temperatur). Eine abschließende Beurteilung erfolgte in den weiteren Arbeitsschritten.

4 Ergebnisse der Messungen

4.1 Überblick über die wichtigsten Messgrößen

Die zeitaufgelösten Messergebnisse werden ausführlich in der Anlage 1 (1. Messperiode) und Anlage 2 (2. Messperiode) dargelegt. Sie beziehen sich hauptsächlich auf die nachfolgenden Kenngrößen:

- Aktivitätskonzentration von Radon (Rn-222),
- Aktivitätskonzentration der angelagerten und unangelagerten Radonfolgeprodukte (RFP),
- Gleichgewichtsfaktoren F,
- Partikel- (Aerosol-) Größenverteilungen von 5 nm bis 800 nm, in der Raumluft,
- Oberflächenverteilungen S der Partikel in der Raumluft,
- Raum- und Außentemperatur,
- Differenzdrücke,
- Luftfeuchte (innen und außen),
- Wetterdaten und
- CO₂-Konzentration in den Räumen.

4.2 Auswertung der aus den Messergebnissen folgenden zeitunabhängigen Mittel- und Medianwerte sowie ihrer Korrelationen für den Gesamtmesszeitraum

4.2.1 Überblick über die wichtigsten Messgrößen

Der Gleichgewichtsfaktor F ist eine wichtige systemrelevante Größe und beschreibt das Verhältnis der potenziellen Alpha-Energiekonzentration der kurzlebigen Radon-Folgeprodukte in einem vorgegebenen Luftvolumen zu derjenigen potenziellen Alpha-Energiekonzentration, die sich ergeben würde, wenn das im betrachteten Volumen vorliegende Radon im radioaktiven Gleichgewicht mit seinen Folgeprodukten ist.

$$F = \frac{C_{eq}}{C_{Rn}} \quad (1)$$

Die Gleichgewichtsäquivalentkonzentrationen der angelagerten bzw. der freien (unangelagerten) Radonfolgeprodukte (Equilibrium Equivalent Concentration, EEC) sind durch

$$C_{eq}^j = 0,106 * C_{Po-218}^j + 0,516 * C_{Pb-214}^j + 0,379 * C_{Bi-214}^j \quad (2)$$

definiert, wobei der Index j jeweils angelagerte bzw. unangelagerte Radonfolgeprodukte beschreibt.

Für Innenräume gilt $1 \text{ Bq/m}^3 \text{ EEC} = 2,5 \text{ Bq/m}^3 \text{ Rn-222}$, es wird dabei ein Gleichgewichtsfaktor von $F = 0,4$ angenommen. Typische Gleichgewichtsfaktoren F in Häusern liegen im Bereich 0,2 bis 0,6 (s. z. B. [37]).

Ausgewertet wurde in den einzelnen Messkampagnen neben den gleichgewichtsäquivalenten Radonkonzentrationen (EEC) und Gleichgewichtsfaktoren F auch die

Aktivitätsverhältnisse der unangelagerten Radonfolgeprodukte zur Summe der angelagerten plus unangelagerten (freien) RFP.

$$f = u / (u + a) = \text{unangelagerte RFP} / (\text{angelagerte RFP} + \text{unangelagerte RFP}) \quad (3)$$

der angelagerten Radonfolgeprodukte zur Summe der angelagerten plus unangelagerten RFP

$$1 - f = a / (u + a) = \text{unangelagerte RFP} / (\text{angelagerte RFP} + \text{unangelagerte RFP}) \quad (4)$$

sowie insbesondere das Aktivitätsverhältnis der unangelagerten (freien) Radonfolgeprodukte zur Summe der angelagerten plus unangelagerten RFP

$$g = u / a = \text{unangelagerte RFP} / \text{angelagerte RFP} \quad (5)$$

Die Ergebnisse aller Messungen im Rahmen des Forschungsvorhabens sind in Bezug auf die berechneten Mittelwerte der relevanten Messgrößen in Tabelle 7 zusammengestellt, wobei die Aufzählung der Messorte in zeitlicher Abfolge der Messungen erfolgte (s. Tabelle 1). Eine grafische Übersicht über die jeweils abgeleiteten Mittelwerte liefern Abbildung 5 und Abbildung 6.

Tabelle 7: Überblick über die Mittelwerte bzw. Median von statistischen Kennzahlen der 19 Detailmessungen im Rahmen der Messkampagnen 2021 und 2022

lfd. Nr.	Raumnummer	F	f	g	1-f	Radonkonzentration [Bq/m ³]	S(5nm - 800nm) [µm ² /cm ³ (Median)]	CO ₂ -Konzentration [ppm]
1	R1	0,50	0,10	0,12	0,90	324,9	235,6	463,0
2	R2	0,26	0,14	0,16	0,86	368,0	119,7	420,7
3	R3	0,22	0,24	0,33	0,76	164,8	83,2	450,3
4	R3_1	0,24	0,22	0,28	0,78	122,0	80,1	443,6
5	R3_2	0,21	0,26	0,36	0,74	198,4	87,4	450,3
6	R4	0,17	0,55	1,47	0,45	464,8	26,3	476,4
7	R5	0,71	0,25	0,38	0,75	169,0	299,4	474,3
8	R5_1	0,70	0,13	0,15	0,87	108,5	339,8	468,1
9	R5_2	0,73	0,35	0,59	0,65	222,3	270,2	479,9
10	R6	0,19	0,38	0,71	0,62	145,1	131,9	517,9
11	R7	0,16				2737,7	185,3	1697,4
12	R2_2	0,40	0,20	0,26	0,80	294,6	96,7	468,4
13	R4_2	0,26	0,44	0,81	0,56	492,0	34,3	446,9
14	R8	0,35	0,23	0,30	0,78	4272,0	71,2	600,7
15	R9	0,45	0,22	0,30	0,78	144,7	148,8	484,7
16	R10	0,14	0,37	0,61	0,63	916,4	51,5	617,9
17	R10_1	0,18	0,33	0,53	0,67	911,1	75,8	678,5
18	R10_2	0,10	0,40	0,68	0,60	935,7	45,9	566,4
19	R11	0,82	0,25	0,34	0,75	362,4	81,3	366,7
	Mittelwerte	0,36	0,28	0,47	0,72	702,9	129,7	556,4

Definition der gleichgewichtsäquivalenten Radonkonzentrationen der unangelagerten und angelagerten RFP (s. Gl. (1) und Gl. (2):

$F = (\text{Aktivitätskonzentration } a \text{ der angelagerten und Aktivitätskonzentration } u \text{ der unangelagerten Radonfolgeprodukte}) / C_{Rn}$

$f = u / (u + a)$

$1 - f = a / (u + a)$

$g = u / a$

Die rechte Ordinate im oberen Teil der Abbildung 5 gibt die mittlere Radonkonzentration (arithmetischer Mittelwert) im Messzeitraum an, wobei die Radonkonzentrationen im Ergebnis der herrschenden Lüftungssituationen mehr oder minder stark beeinflusst werden. Der untere Teil der Abbildung 5 gibt in der rechten Ordinate den Medianwert der im Stundenmittel bestimmten Gesamtoberflächen $S(5\text{nm} - 800\text{nm})$ aller Partikel (Aerosole) in der Raumluft mit Durchmessern von 5 nm bis 800 nm, gemessen in $[\mu\text{m}^2/\text{cm}^3]$, an. Der Mittelwert aller 19 Detailmessungen beträgt $130\text{ m}^2/\text{cm}^3$ (Maximum: $400\text{ }\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, Minimum: $26,3\text{ }\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$).

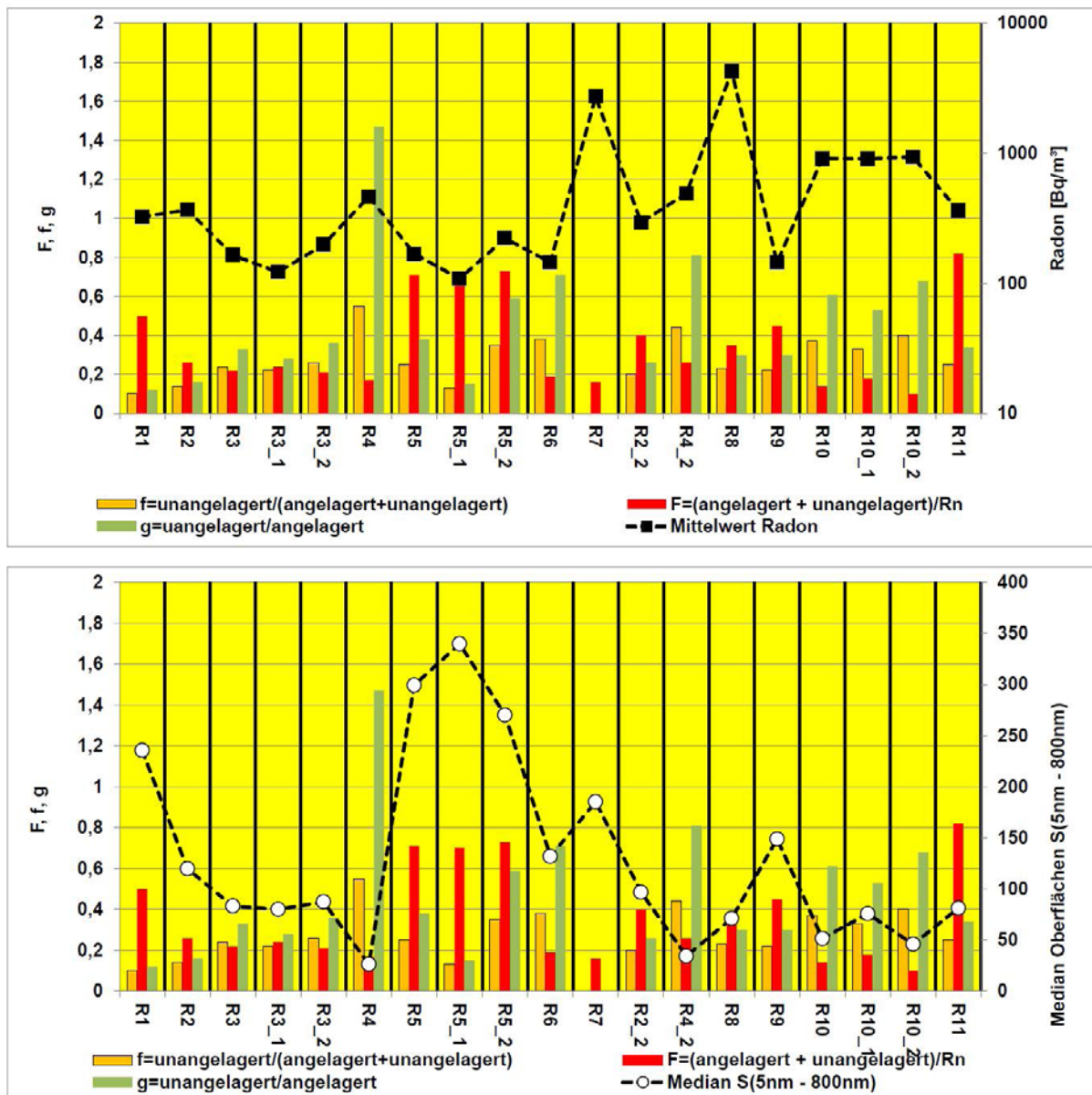


Abbildung 5: Zusammenstellung der berechneten mittleren Systemgrößen für die 19 Messpunkte. Rechte Achse: Median der Aerosoloberflächen

Definition von f, g, F, C_{Rn} siehe nach Tabelle 7

Rechte Ordinate: Radon c_{Rn} in Bq/m^3 bzw. Gesamtoberfläche der Aerosolpartikel S in $\mu m^2/cm^3$

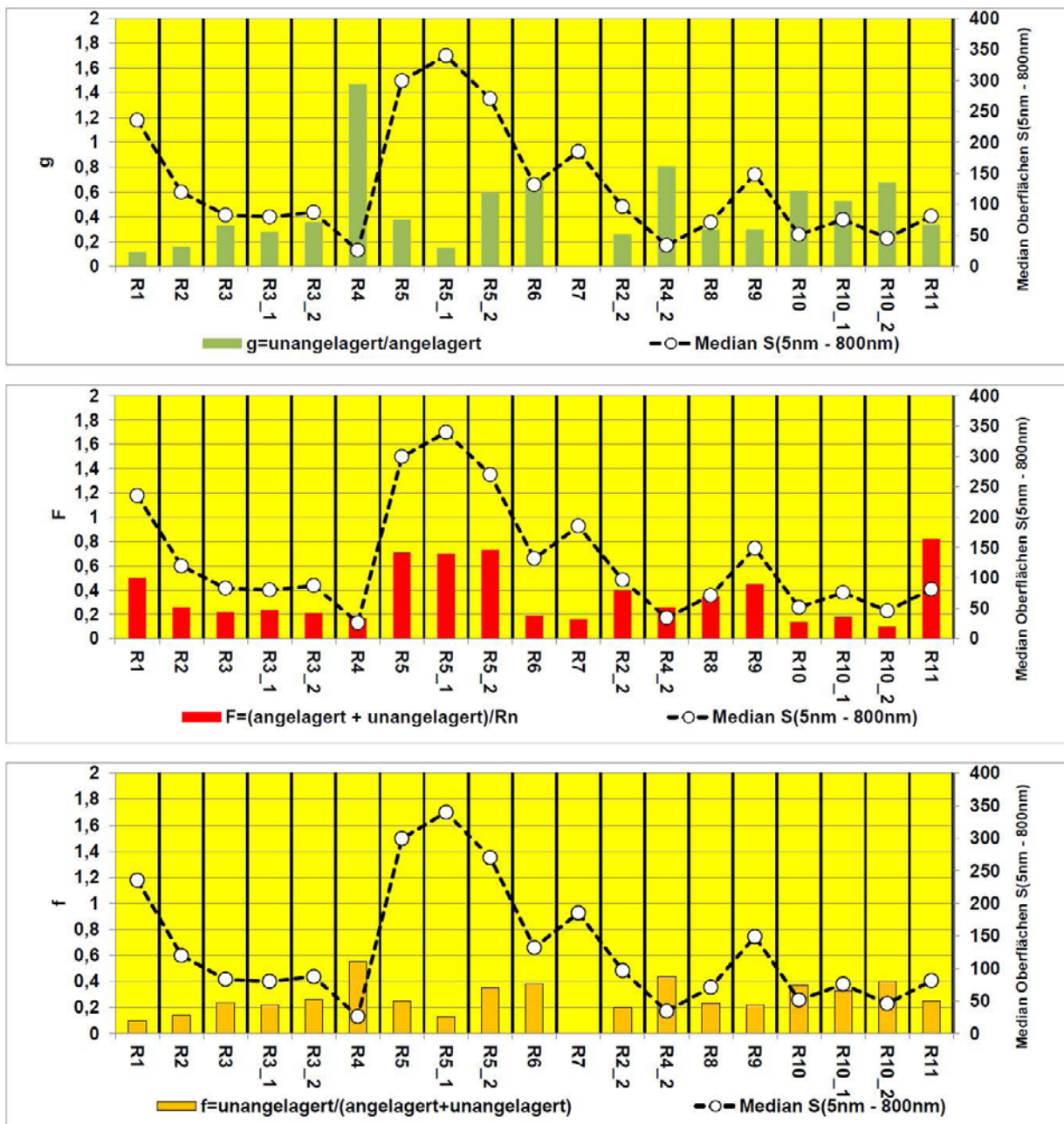


Abbildung 6: Wie Abbildung 5, jedoch sind die gemittelten Größen g, F und f einzeln mit dem Median der Gesamtoberflächen S dargestellt

Definition von f, g, F, C_{Rn} siehe nach Tabelle 7

Rechte Ordinate: Radon c_{Rn} in Bq/m^3 bzw. Gesamtoberfläche der Aerosolpartikel S in $\mu m^2/cm^3$

Einen Überblick über die Schwankungsbreite der Mittelwerte der Gleichgewichtsfaktoren F sowie den angelagerten und nicht angelagerten RFP liefern die Ergebnisse in der Abbildung 7. Es ist zu erkennen, dass die Gleichgewichtsfaktoren F und die Verhältnisse der unangelagerten zu den angelagerten Radonfolgeprodukten etwa um eine Größenordnung variieren. Auch die Medianwerte (s. Tabelle 7) variieren in diesem Größenbereich.

Diese vergleichsweise hohen Variationsbreiten sind eine direkte Folge der sich teils ständig ändernden Lüftungsbedingungen an den jeweiligen Arbeitsplätzen und belegen, dass eine ausreichend lange Messzeit an den Arbeitsplätzen erforderlich ist, um die Expositionen durch Radon und seine Folgeprodukte belastbar erfassen zu können.

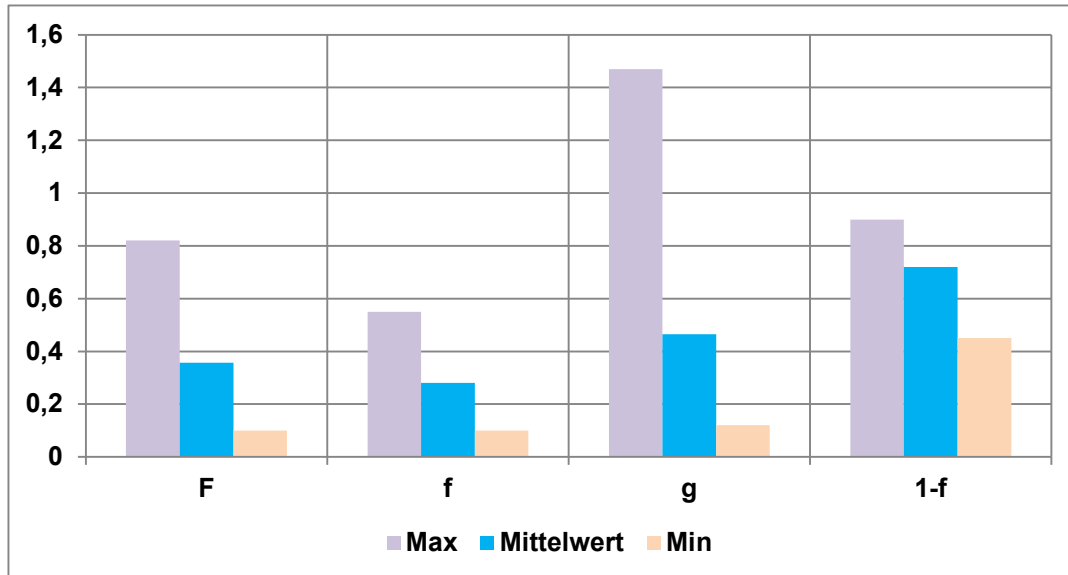


Abbildung 7: Überblick über die Schwankungsbreiten der Maxima, Minima und Mittelwerte der Gleichgewichtsfaktoren sowie den angelagerten und nicht angelagerten RFP der Messkampagnen 2021 und 2022

Definition von f , g , F , C_{Rn} siehe nach Tabelle 7

4.2.2 Radonfolgeproduktkonzentrationen (RFP) in Abhängigkeit von der Gesamtoberfläche der Partikel in der Raumluft

In der Abbildung 8 ist das Verhältnis der Mittelwerte $g=u/a$ (siehe Gleichung 5) von unangelagerten (freien) zu den angelagerten Radonfolgeprodukten als Funktion der Gesamtoberfläche S der Teilchen in der Raumluft, gemessen in $[\mu\text{m}^2/\text{cm}^3]$, dargestellt. Als eine Tendenz zeichnet sich ab, dass unangelagerte (freie) Teilchen in der Raumluft dominieren, wenn die Gesamtoberfläche aller Teilchen zu geringeren Werten strebt. Eine solche Korrelation ist nach Ansicht des Auftragnehmers auch zu erwarten.

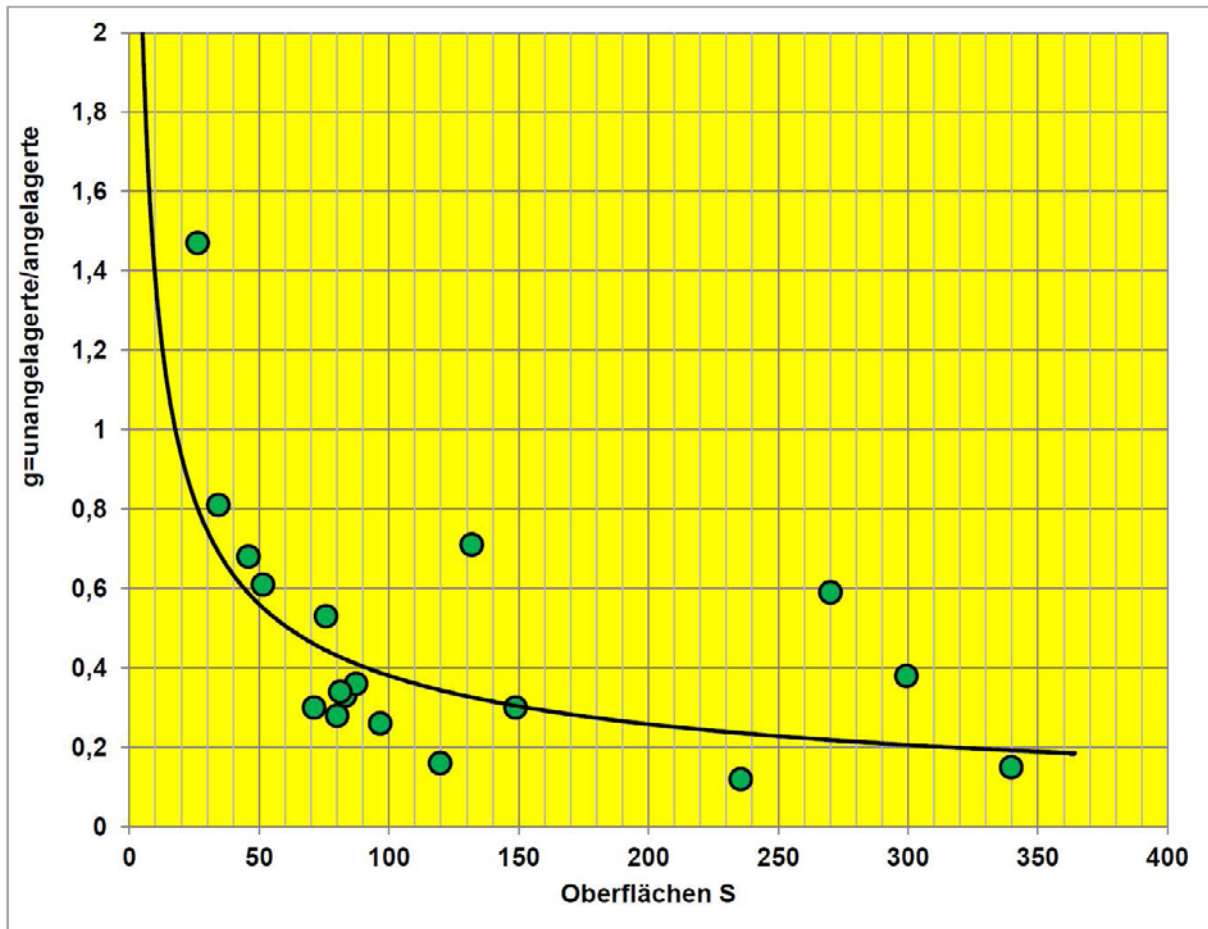


Abbildung 8: Das Verhältnis $g=u/a$ der mittleren Aktivitätskonzentrationen von unangelagerten (freien) zu den angelagerten Radonfolgeprodukten als Funktion der Gesamtoberfläche S der Teilchen in der Raumluft (Medianwert), gemessen in $[\mu\text{m}^2 \text{cm}^{-3}]$. (Die eingezeichnete Kurve soll den tentativen Verlauf des Zusammenhanges von $g=u/a$ und der Gesamtoberflächen S verdeutlichen.)

Eine vergleichbare Tendenz wie in Abbildung 8 dargestellt zeigen auch die Ergebnisse in der Abbildung 9, in der das Verhältnis $f=u/(u+a)$ (siehe Gleichung 4) von unangelagerten (freien) zu den angelagerten und unangelagerten Radonfolgeprodukten als Funktion der Gesamtoberfläche S der Teilchen in der Raumluft (Medianwert) aufgetragen ist. Der deutliche Anstieg der Größe f bei geringer werden Gesamtoberflächen ist unverkennbar.

In der Abbildung 10 ist das Verhältnis der Mittelwerte $1-f=a/(u+a)$ von angelagerten (freien) zur Summe der angelagerten und unangelagerten (freien) Radonfolgeprodukten als Funktion der Gesamtoberfläche S der Teilchen in der Raumluft (Medianwert), gemessen in $[\mu\text{m}^2/\text{cm}^3]$, dargestellt. In dieser Darstellung ist unverkennbar, dass die gemittelten Größen $1-f=a/(u+a)$ zu einem Wert von 1 tendieren, wenn die Gesamtoberflächen S der Teilchen zu vergleichsweise großen Werten tendieren. Das bedeutet, dass in diesem Fall die an die Aerosole der Raumluft angelagerten RFP dominieren.

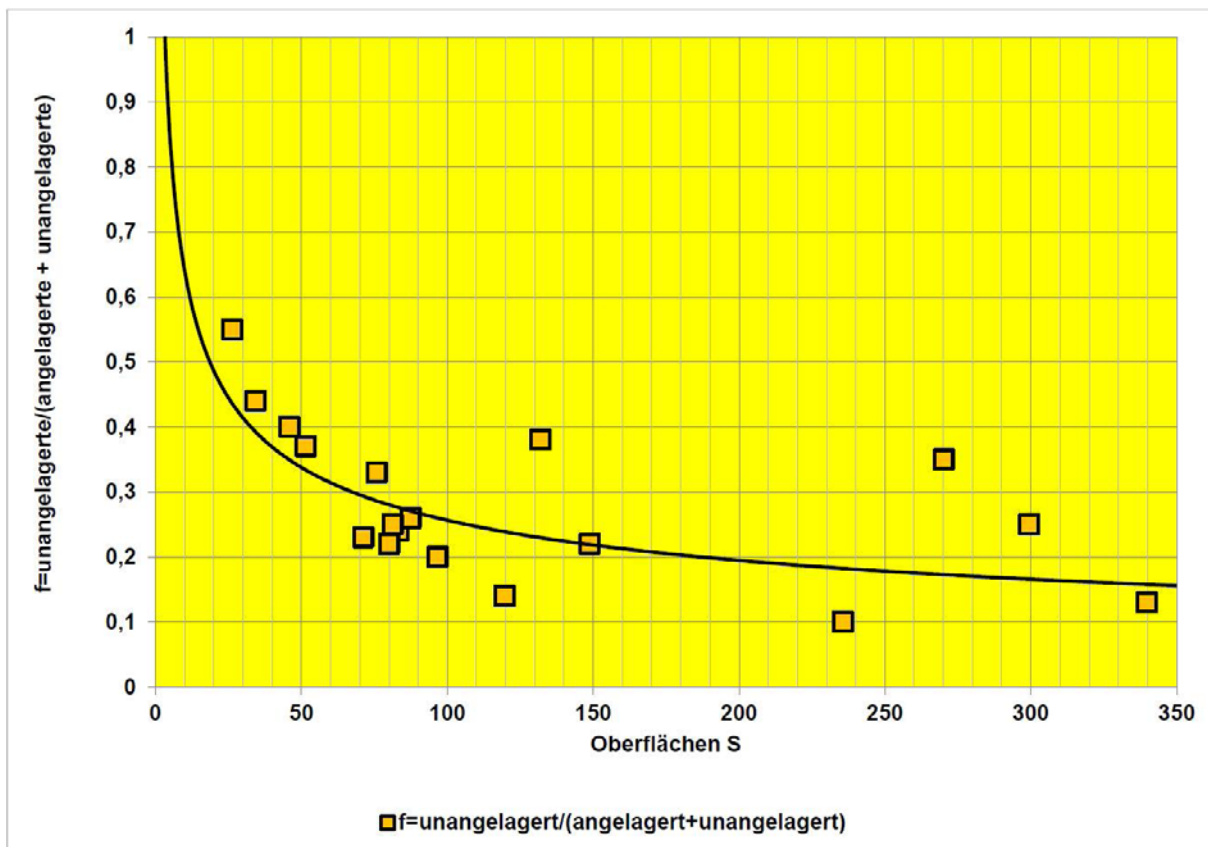


Abbildung 9: Wie Abbildung 8, jedoch für das Verhältnis f der mittleren Aktivitätskonzentrationen (Die eingezeichnete Kurve soll den tentativen Verlauf des Zusammenhanges von $f = u/(u + a)$ und der Gesamtoberflächen S verdeutlichen.)

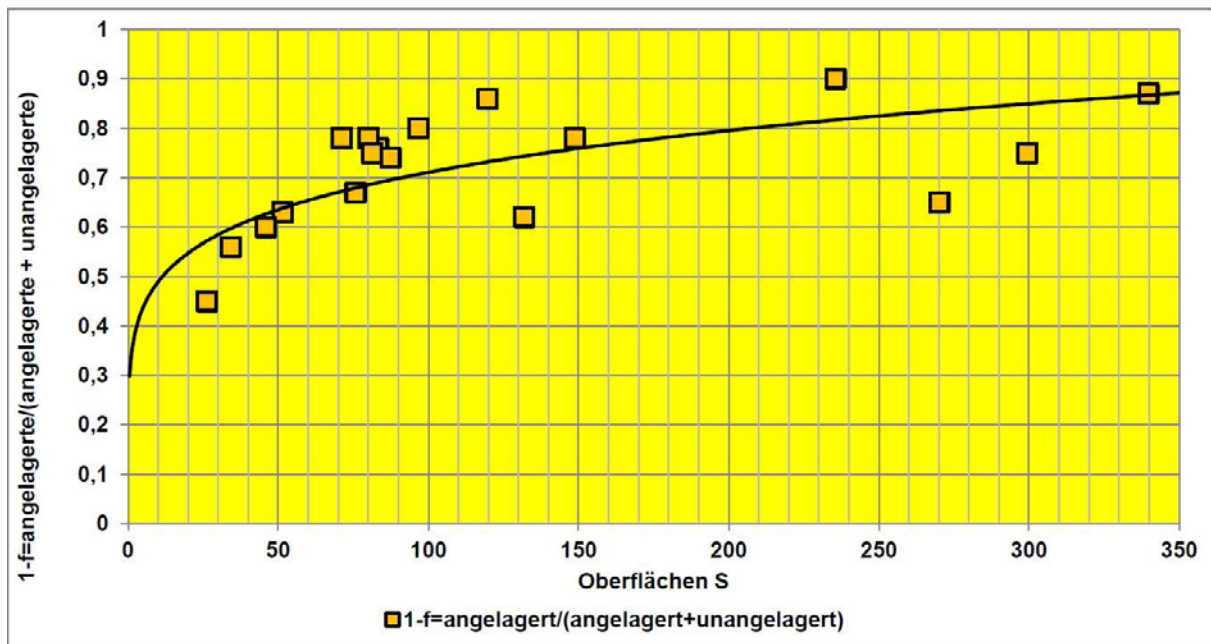


Abbildung 10: Wie Abbildung 8, jedoch für das Verhältnis 1-f der mittleren Aktivitätskonzentrationen von (Die eingezeichnete Kurve soll den tentativen Verlauf des Zusammenhanges von $a/(u + a)=1-f$ und der Gesamtoberflächen S verdeutlichen.)

4.2.3 Radonfolgeproduktkonzentrationen (RFP) und Gesamtoberflächenkonzentration als Funktion des Gleichgewichtsfaktors

In der Abbildung 11 ist das Verhältnis der Mittelwerte $g=u/a$ von unangelagerten (freien) zu den angelagerten Radonfolgeprodukten als Funktion des Gleichgewichtsfaktors dargestellt. Als eine Tendenz könnte sich abzeichnen, dass unangelagerte (freie) Teilchen in der Raumluft zu dominieren beginnen, wenn die Gleichgewichtsfaktoren zu geringeren Werten tendieren. Diese Vermutung kann jedoch aufgrund der Streuung der Messwerte nicht abschließend bestätigt werden. Dies bedeutet in Anbetracht der in der Abbildung 8 dargestellten Ergebnisse, dass tendenziell eher geringe Gleichgewichtsfaktoren zu erwarten sind, wenn die Gesamtoberflächen der Teilchen in der Raumluft gering sind. Dieser Zusammenhang wird am Ende dieses Abschnittes ausführlich diskutiert.

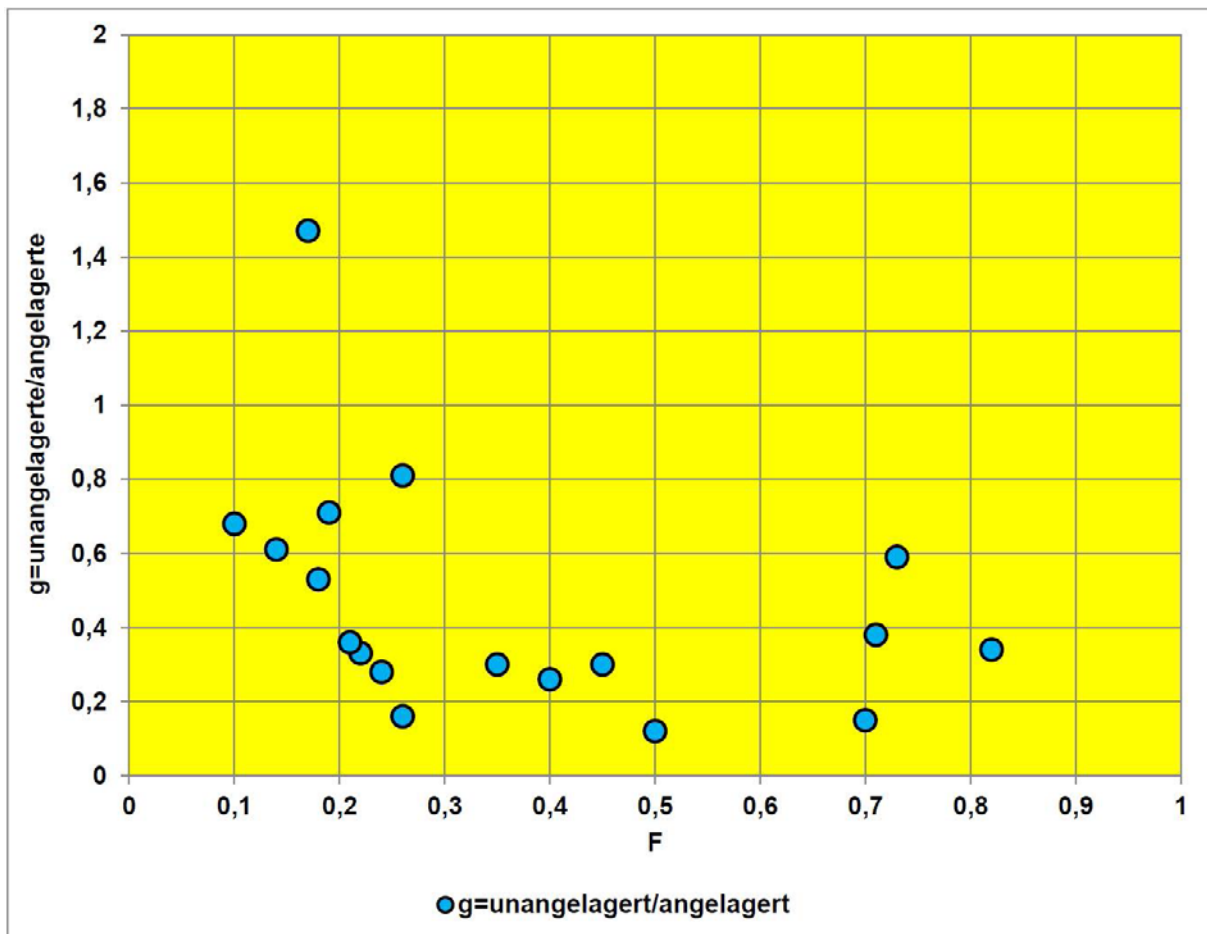


Abbildung 11: Das Verhältnis $g=u/a$ der mittleren Aktivitätskonzentrationen von unangelagerten (freien) zu den angelagerten Radonfolgeprodukten als Funktion des Gleichgewichtsfaktors $F = (u + a)/C_{Rn}$

Eine vergleichbare Tendenz, wie in Abbildung 11 dargestellt, zeigen auch die Ergebnisse in der Abbildung 12, in der das Verhältnis $f=u/(u + a)$ von unangelagerten (freien) zu den angelagerten und unangelagerten Radonfolgeprodukten als Funktion des Gleichgewichtsfaktors abgebildet ist. Dagegen suggerieren die Ergebnisse, dargestellt in der Abbildung 7, dass das Verhältnis der Mittelwerte $a/(u + a)$, d.h. Mittelwerte von angelagerten zur Summe aus angelagerten und unangelagerten (freien) Radonfolgeprodukten bei Werten von $> 0,45$ liegen und Werte bis 0,9 erreichen. Die Mittelwerte der Verhältnisse $f=u/(u + a)$ von unangelagerten (freien) zu den angelagerten und unangelagerten Radonfolgeprodukten variieren dagegen im Bereich von 0,1 bis 0,56. Die Darstellung in der Abbildung 7 liefert einen diesbezüglichen Überblick.

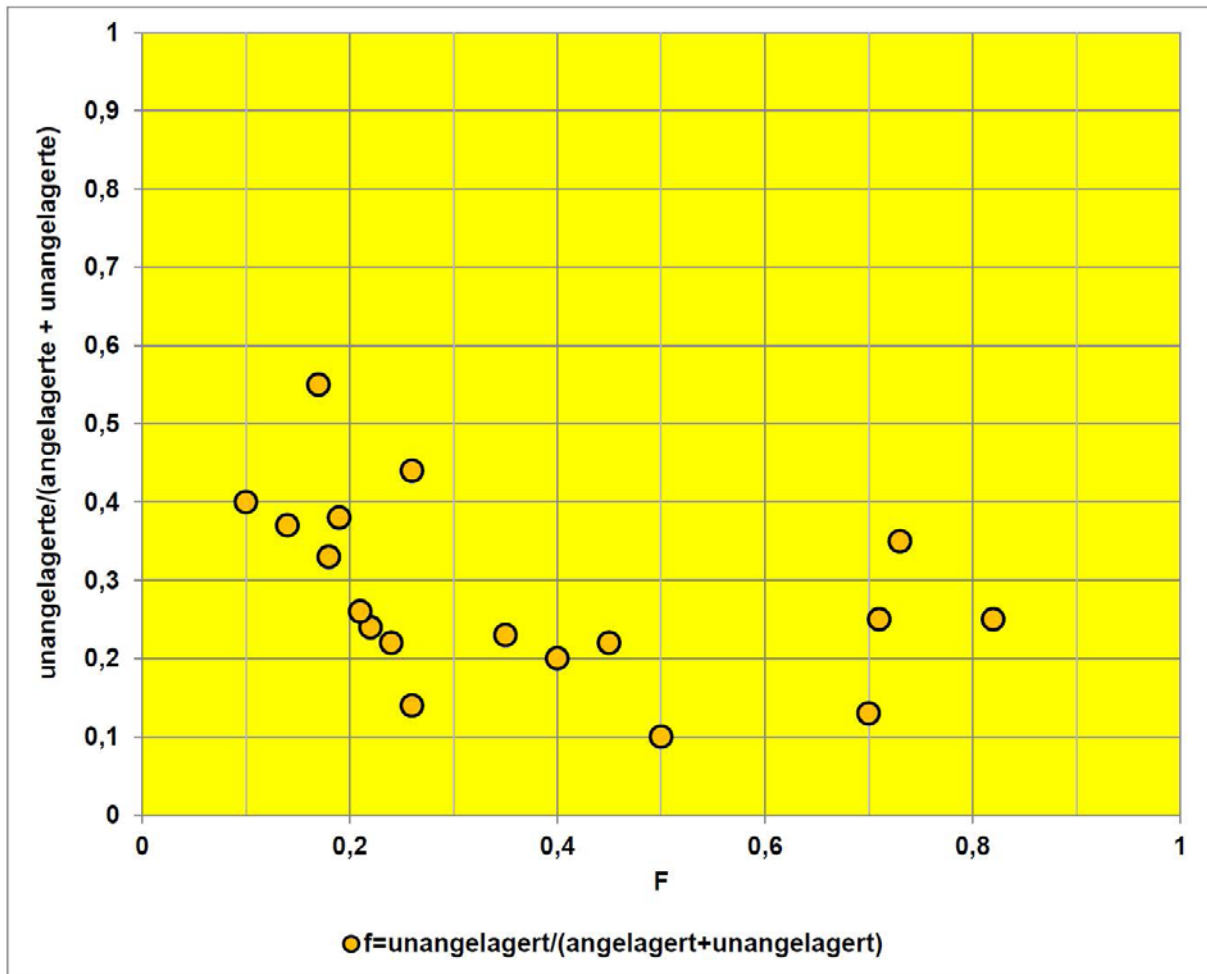


Abbildung 12: Wie Abbildung 11, jedoch für das Verhältnis $f = u / (u + a)$ der mittleren Aktivitätskonzentrationen von unangelagerten (freien) zur Summe aus angelagerten und unangelagerten (freien) Radonfolgeprodukten

Aus einem Vergleich der in den oben dargestellten Ergebnissen erkennbaren Muster kann geschlussfolgert werden, dass eine positive Korrelation zwischen den Gleichgewichtsfaktoren und den aus den Aerosolteilchendurchmessern berechneten Oberflächen S (5nm - 800nm) bestehen sollte. Diese Vermutung wird durch die in der Abbildung 13 dargestellten Ergebnisse anschaulich untersetzt.

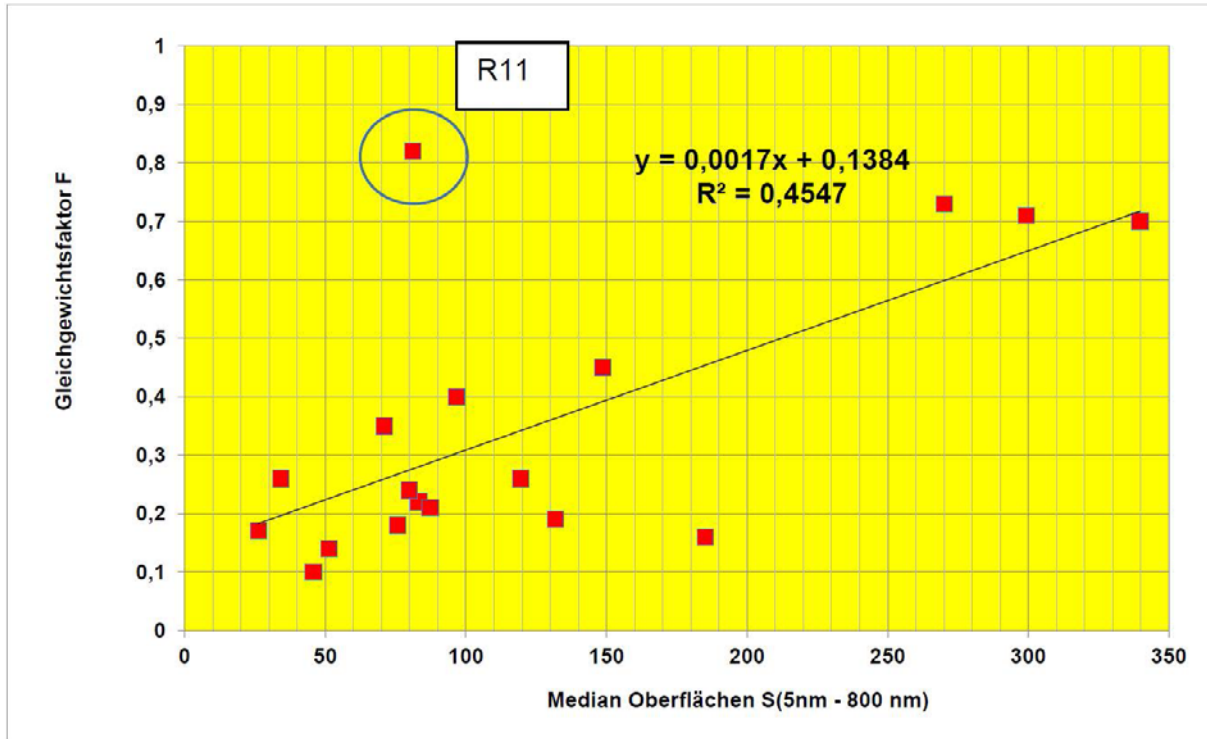


Abbildung 13: Gleichgewichtsfaktor $F = (\text{angelagerte} + \text{unangelagerte})/C_{Rn}$ als Funktion der Gesamtoberflächen S der Aerosole

Eine Ausnahme scheint jedoch die Messung im Raum R11 zu bilden. Diese Betriebshalle einer Kosmetikfabrik wurde neu errichtet und verfügt nicht über eine technische Lüftungsanlage. Trotz radongeschützter Bauweise (Einbau einer zunächst radondichten Folie unterhalb einer ca. 25 cm mächtigen Betongrundplatte) wurden Jahresmittelwerte deutlich höher größer als der Referenzwert von 300 Bq/m^3 gemessen. Es wird angenommen, dass die Radonfrachten massiv durch breite Dehnungsspalten in der Grundplatte in die Halle eindringen. Das sich zwischen der offenbar undichten Folie und der Unterseite der Grundplatte sammelnde Radon ist wahrscheinlich durch extrem hohe Aktivitätskonzentrationen im Bereich von über 100.000 Bq/m^3 charakterisiert und befindet sich weitestgehend im Gleichgewicht mit seinen Zerfallsprodukten. Auf diese Weise könnten die gemessenen Gleichgewichtswerte von $F=0,8$ erklärbar sein. Würden dagegen die Radonfrachten direkt aus dem Unterboden in die Halle eintreten, werden die Radonfolgeprodukte in dem porösen Bodensubstrat nahezu völlig abgestreift, so dass erst in der Halle die zeitliche Entwicklung der Radonfolgeprodukte von neuem beginnt.

Zusätzliche Messungen der Radon- und Radonfolgeproduktkonzentrationen mit nochmals überprüften Messgeräten vom 29.6.2022 bis 4.7.2022 haben den bei der ersten Messung im Raum R1 festgestellten Trend bestätigt und wiederum Gleichgewichtsfaktoren von etwa $F=0,8$ ergeben. Hierzu ist zu bemerken, dass selbst nach einer über mehrere Stunden anhaltenden Lüftung keine Absenkung des Gleichgewichtsfaktors zu beobachten war. Diese Beobachtung stützt die These, dass in die Halle radonhaltige Luft eindringt, in der sich das Radon im annähernden Gleichgewicht mit seinen Folgeprodukten befindet. Aus organisatorischen Gründen konnten jedoch bei diesen Zusatzmessungen keine Aerosolverteilungen bestimmt werden.

4.3 Grafische Darstellung von Korrelationen relevanter Systemvariablen

Zur Ergänzung der Ergebnisse der statistischen Analyse wird abschließend eine grafische Darstellung der Korrelation von Gleichgewichtsfaktor F , dem Verhältnis $g=u/a$ der unangelagerten (freien) zu den angelagerten RFP sowie den Radonaktivitätskonzentrationen mit dem zum gleichen Zeitpunkt berechnetem Gesamtoberflächen $S(5\text{nm} - 800\text{nm})$, gemessen in $[\mu\text{m}^2/\text{cm}^3]$, gegeben. Auf eine zusätzliche Beschreibung und Diskussion der dargestellten Ergebnisse wird verzichtet, da die gewählte Darstellung weitestgehend selbsterklärend ist und hauptsächlich dazu dienen soll, die anhand von berechneten Mittelwerten der relevanten Systemvariablen in den vorigen Abschnitten gezogenen Schlussfolgerungen kritisch bewerten zu können.

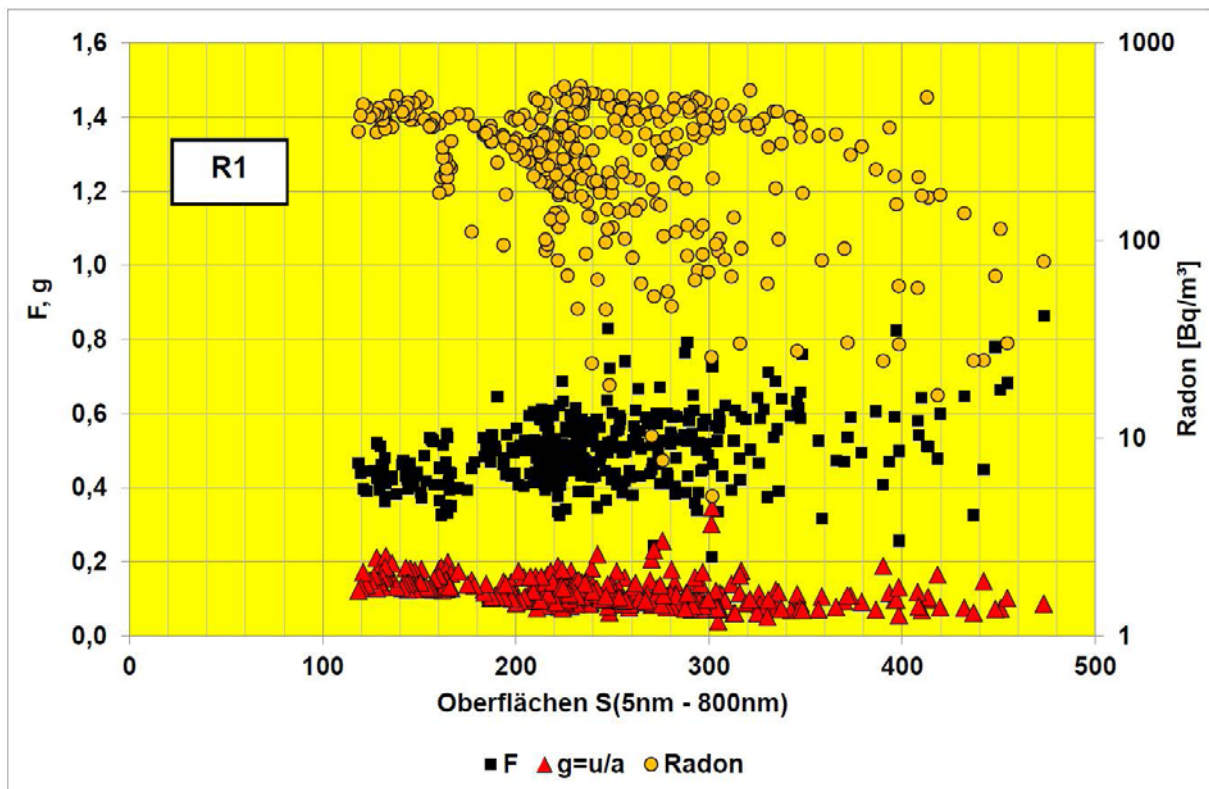


Abbildung 14: Das Verhältnis $g=u/a$, der Gleichgewichtsfaktor F sowie die gemessenen Radonkonzentrationen (rechte Ordinate) für den Raum R1 als Funktion der Gesamtoberfläche der Partikel (Aerosole)

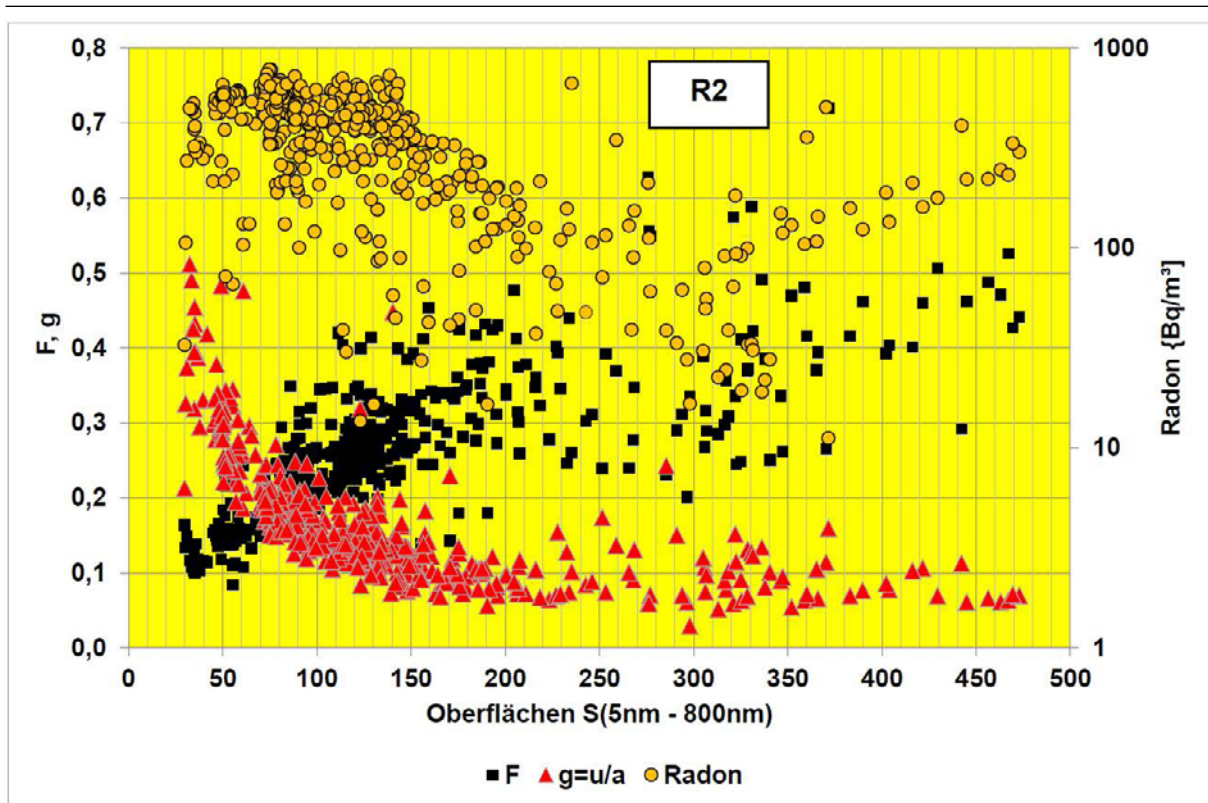


Abbildung 15: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R2

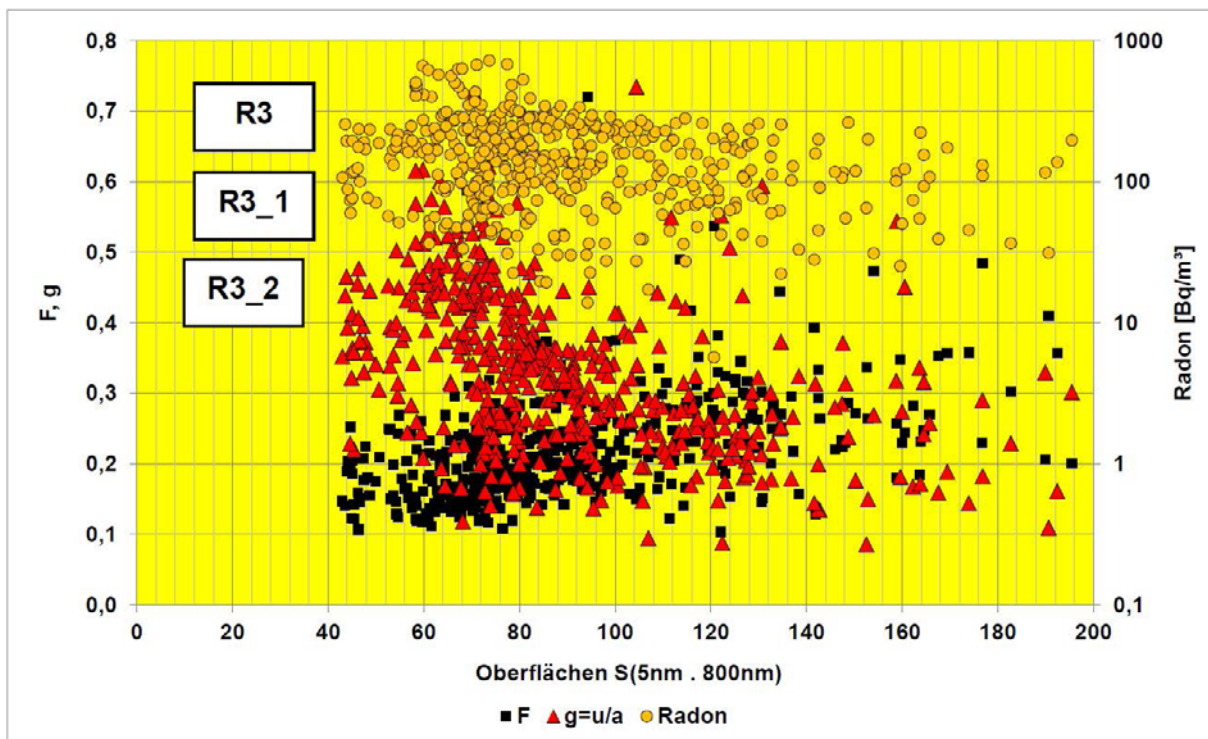


Abbildung 16: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R3

Kommentar: In dieser Grafik sind sowohl die Ergebnisse für den Gesamtmesszeitraum vom 9.7. - 30.7.2021 (21 Tage) als auch die aufgrund essentieller Modifikationen am Arbeitsplatz durchgeführten separaten Messungen vereinigt.

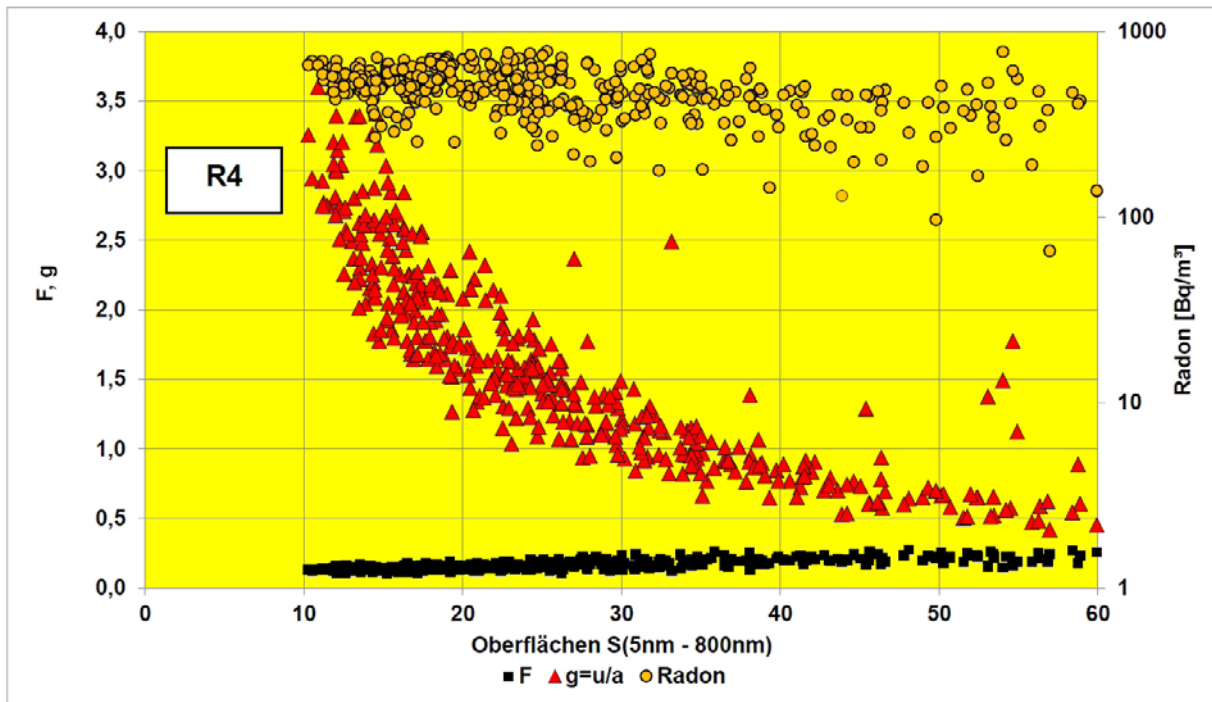


Abbildung 17: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R4

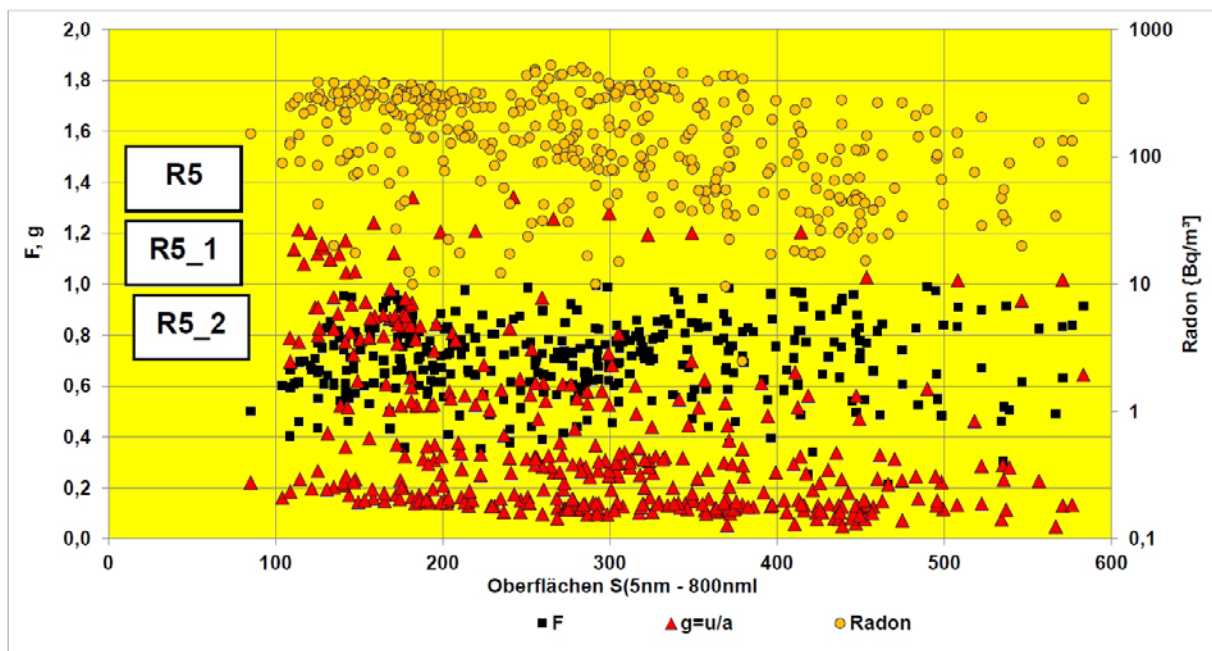


Abbildung 18: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R5

Kommentar: In dieser Grafik sind sowohl die Ergebnisse für den Gesamtmesszeitraum 29.9 - 18.10.2021 (19 Tage) als auch die aufgrund essentieller Modifikationen am Arbeitsplatz durchgeführten separaten Messungen vereinigt.

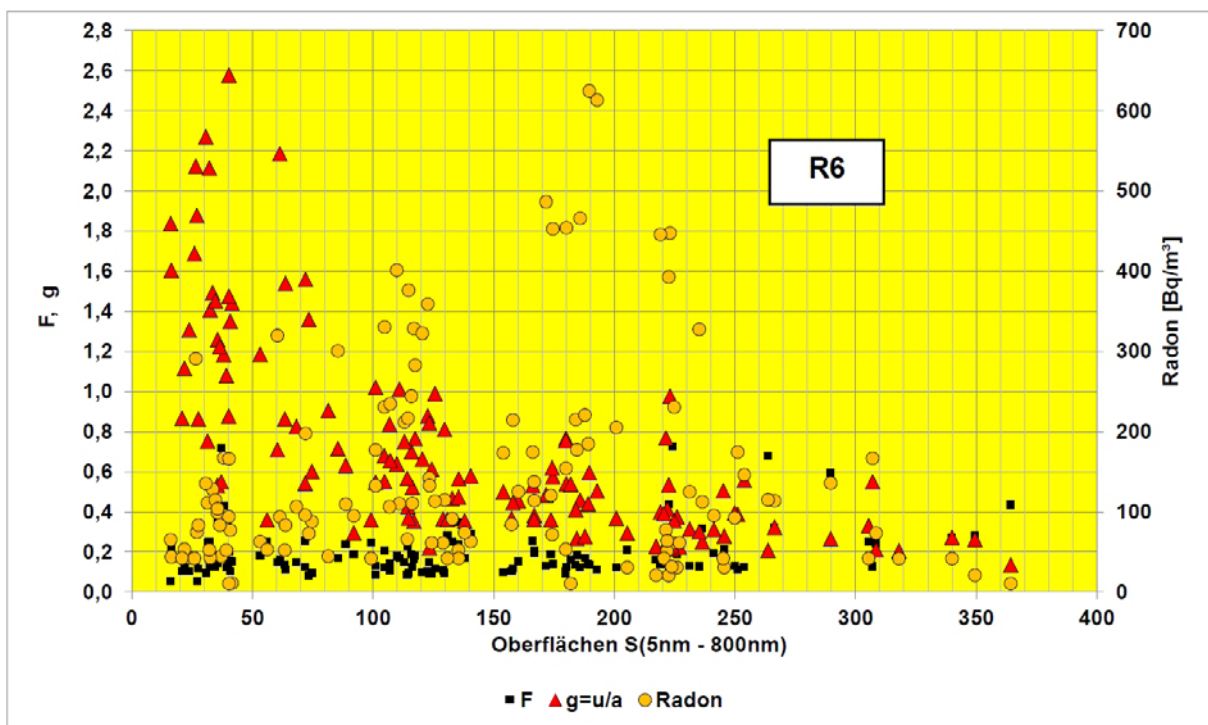


Abbildung 19: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R6

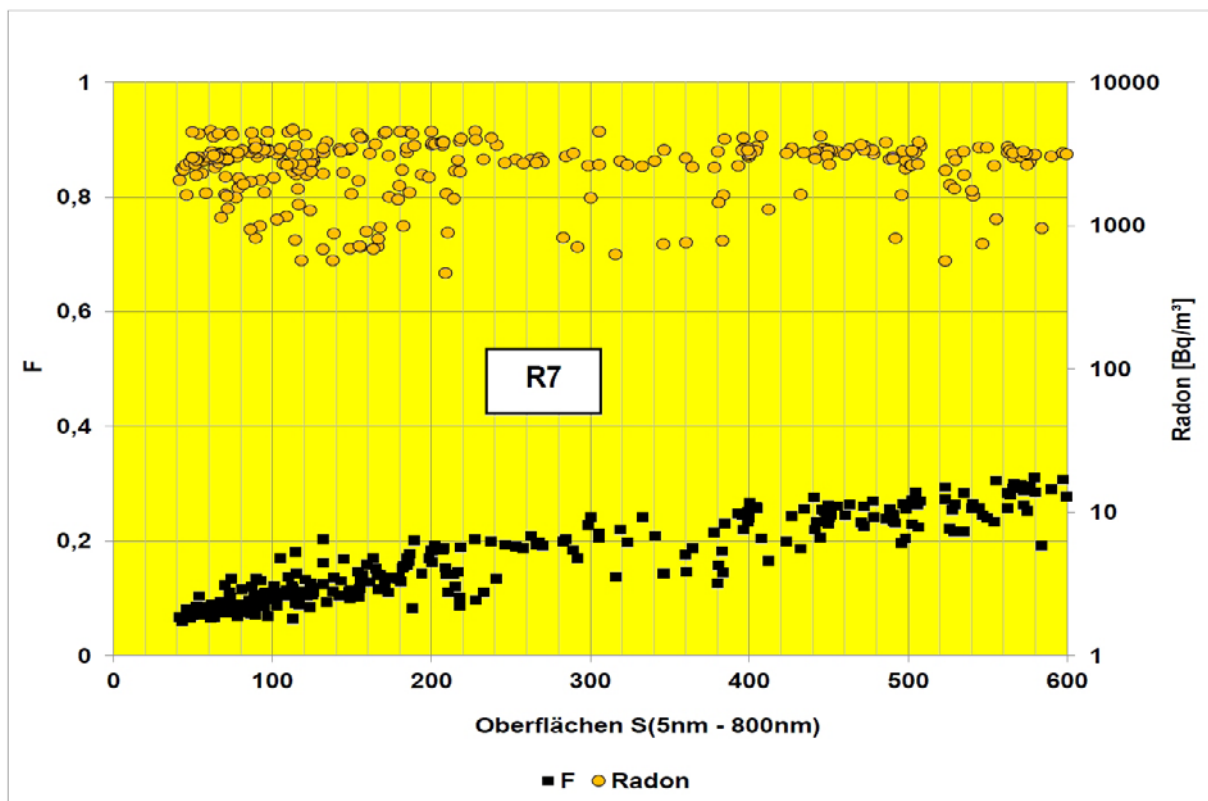


Abbildung 20: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R7

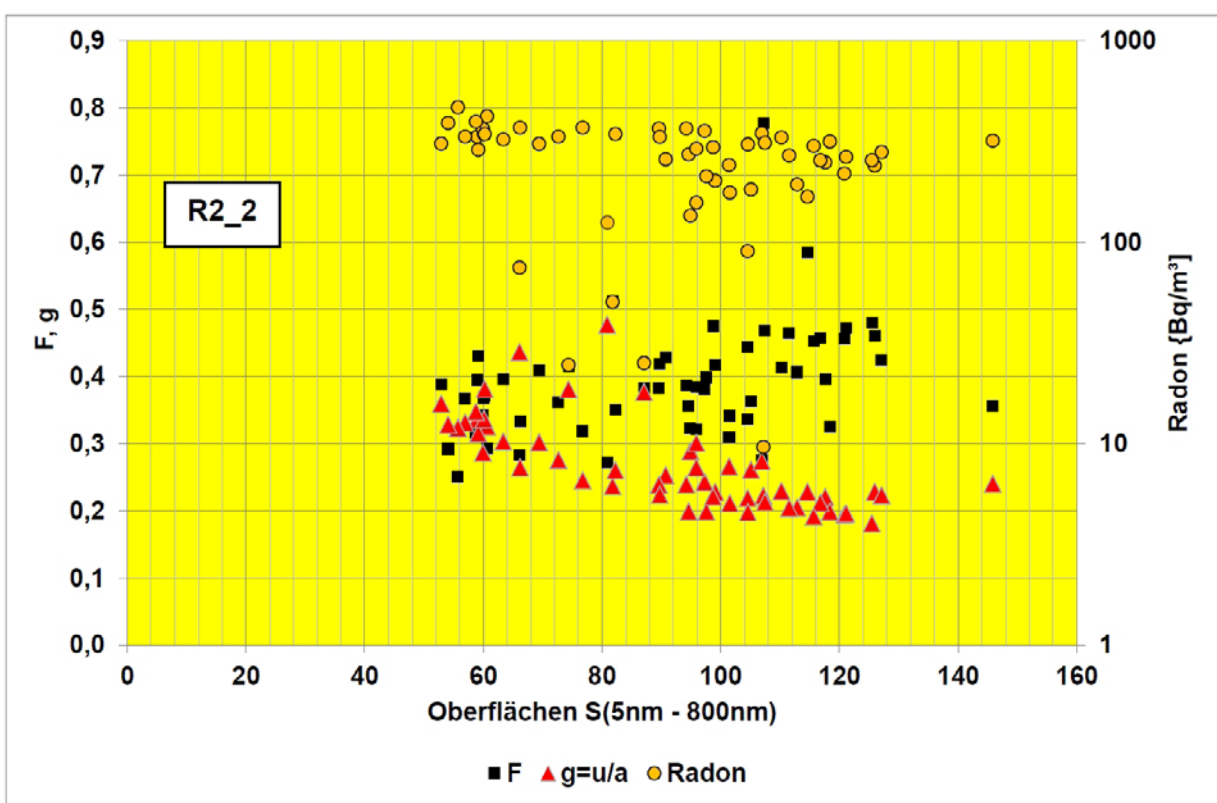


Abbildung 21: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R2_2

Kommentar: Aufgrund essentieller Modifikationen am Arbeitsplatz wurden die Messungen aus dem Jahre 2021 wiederholt.

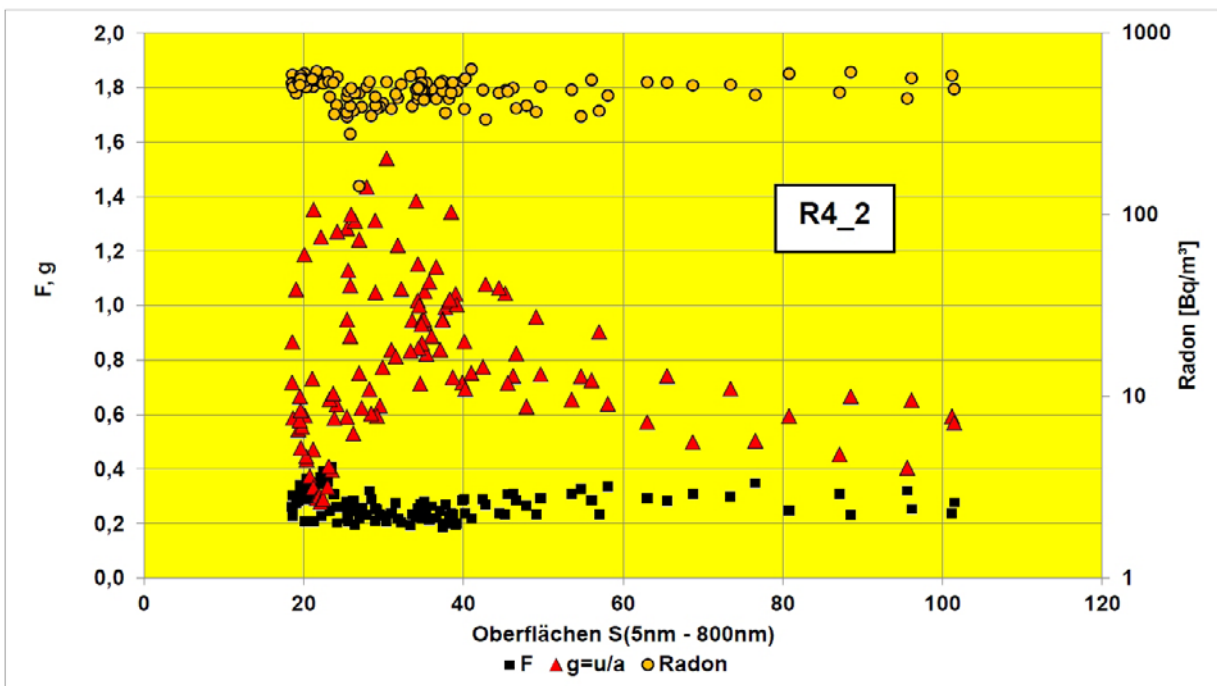


Abbildung 22: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R4_2

Kommentar: Aufgrund der Tatsache, dass in diesem Archivraum ein extrem hohes Verhältnis von unangelagerten (freien) zu angelagerten RFP in 2021 festgestellt wurde, sind 2022 erneut Messungen durchgeführt worden.

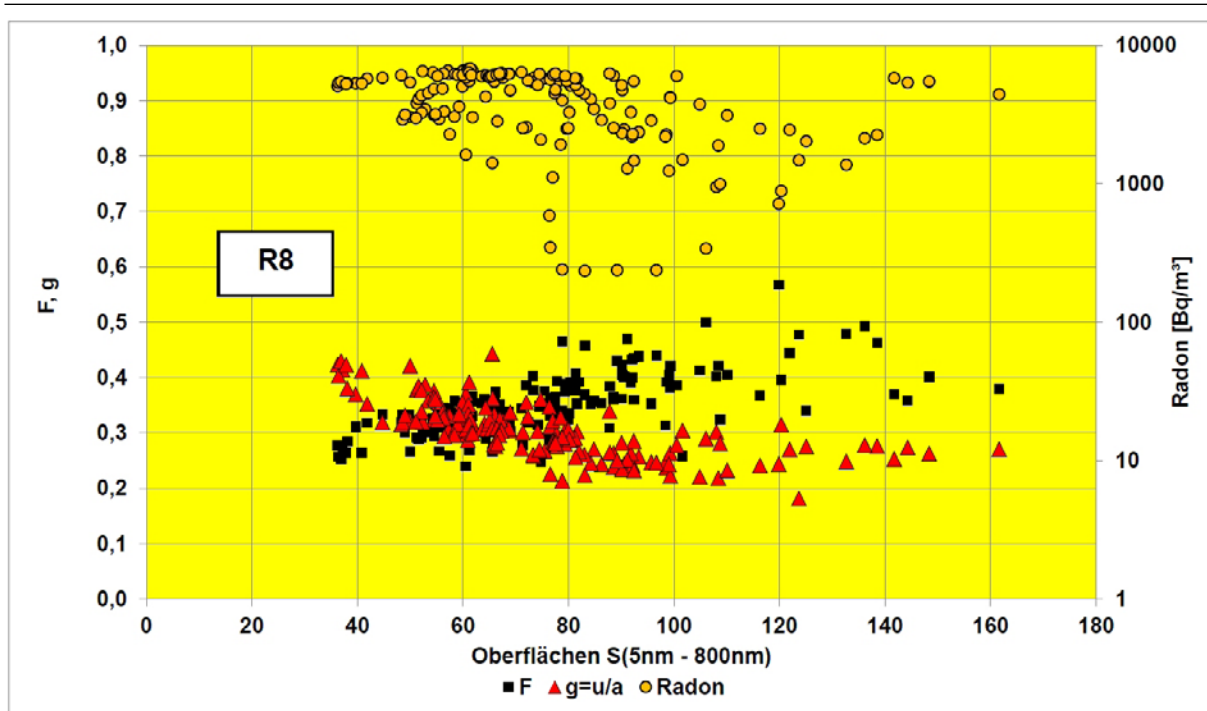


Abbildung 23: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R8

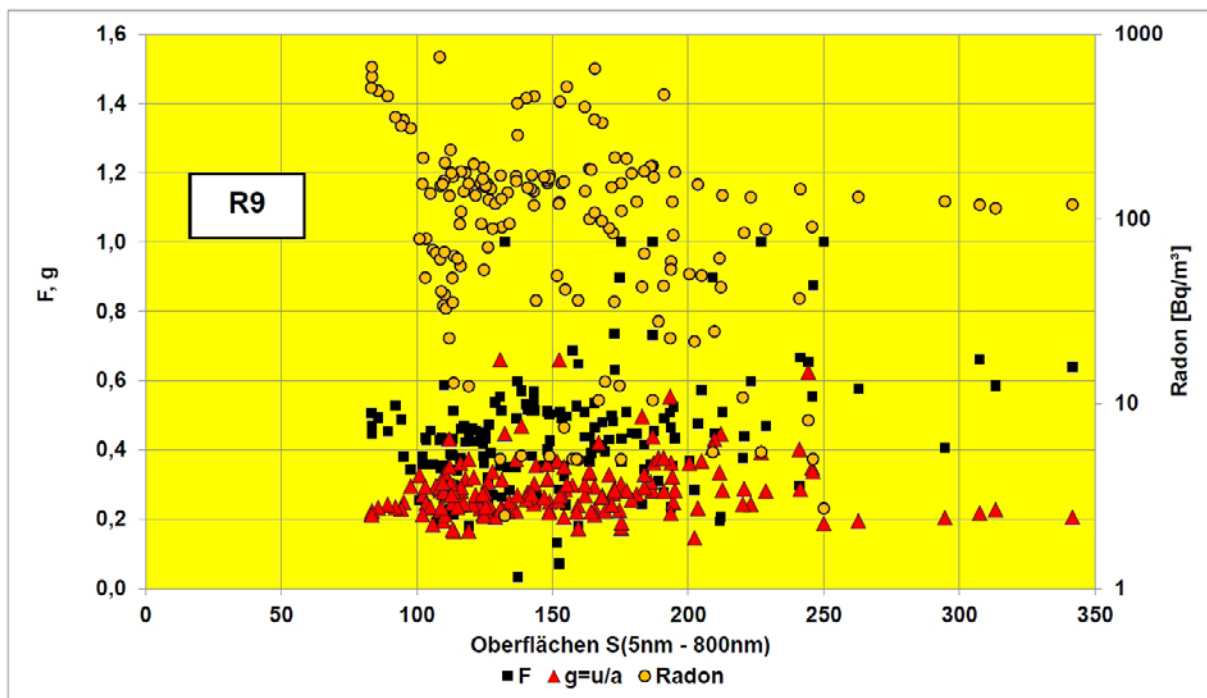


Abbildung 24: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R9

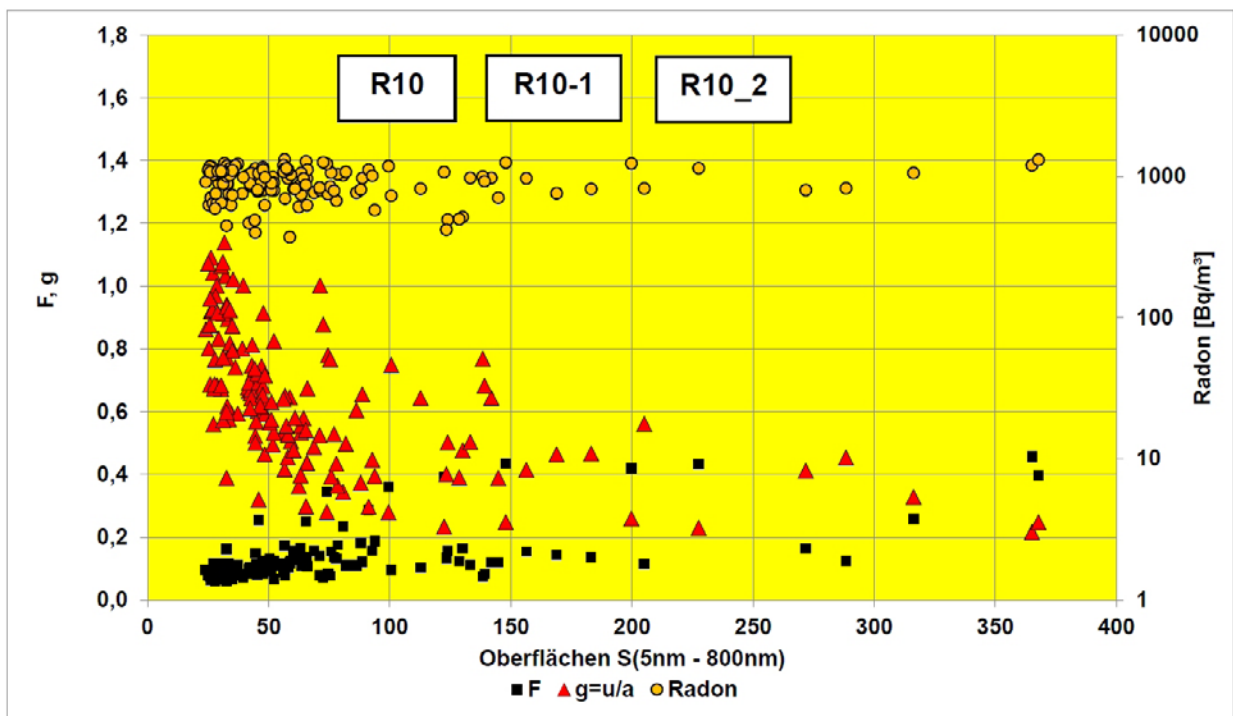


Abbildung 25: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R10

Kommentar: Aufgrund der Tatsache, dass in diesem Laborraum essentielle Veränderungen der Arbeitsvorgänge vorgenommen wurden, ist die Messzeit in zwei Teilarbeitszeiten aufgeteilt worden.

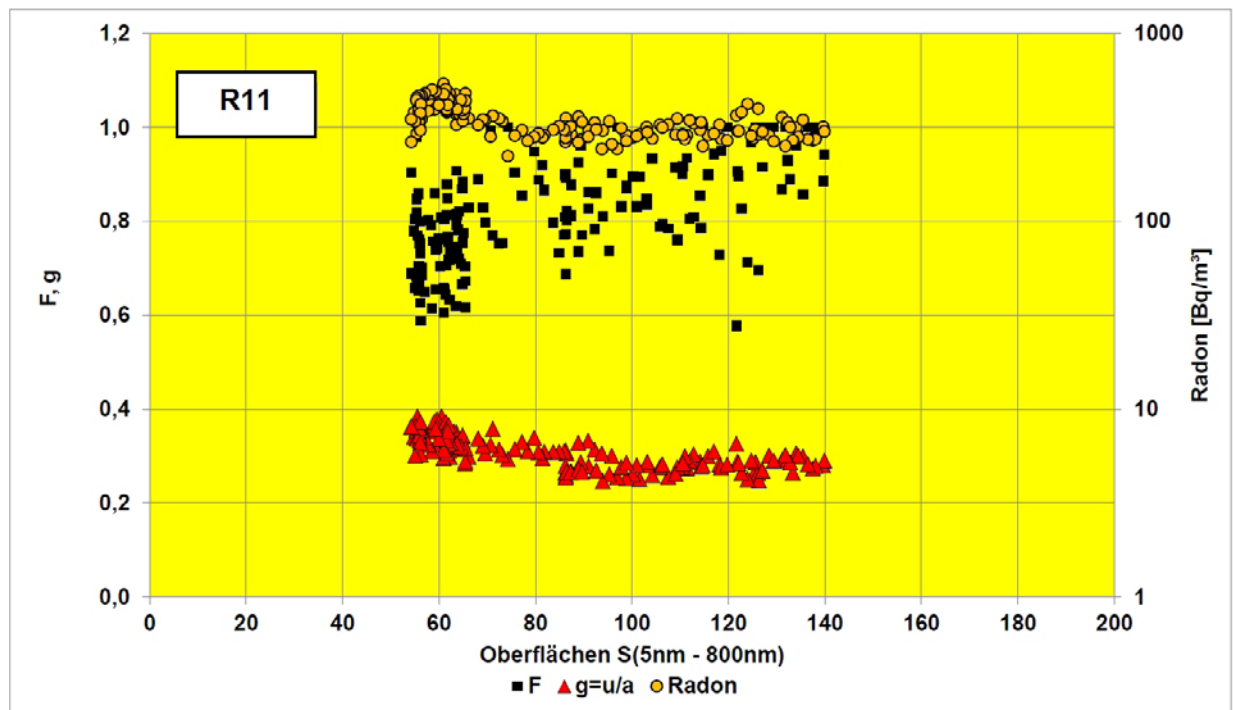


Abbildung 26: Wie Abbildung 14, jedoch für den Raum R11

4.4 Schlussfolgerungen aus den Messergebnissen

Aus den im Rahmen des Forschungsvorhabens erhaltenen Messergebnissen können folgende Feststellungen getroffen werden:

- Die aus den Radon- und Radonfolgeproduktmessungen abgeleiteten Gleichgewichtsfaktoren F sind den aus den Aerosolteilchendurchmessern berechneten Oberflächen $S(5\text{nm} - 800\text{nm})$ direkt proportional.
- Gleichgewichtsfaktoren von $F > 0,5$ sind eher dann zu erwarten, wenn in der Raumluft die aus den Aerosolteilchendurchmessern berechneten Oberflächen $S(5\text{nm} - 800\text{nm})$ vergleichsweise groß sind. In dem Fall werden die Oberflächen hauptsächlich durch Teilchen mit Aerosoldurchmessern von $> 100\text{ nm}$ gebildet.
- Umgekehrt sind vergleichsweise moderate bis geringe Gesamtoberflächen dann zu erwarten, wenn die Gleichgewichtsfaktoren gering sind. Hierbei spielt auch eine Rolle, ob die Räume ständig belüftet werden oder nicht, wobei der genaue Zusammenhang von der Qualität der Außenluft abhängt.
- Die Ergebnisse scheinen in der Tendenz darauf hinzudeuten, dass die Aktivitätskonzentrationen der unangelagerten RFP bei höheren Gleichgewichtsfaktoren F eher niedrig und bei geringeren Werten von F eher hoch sind.
- Tendenziell scheint die Summe der Gesamtoberflächen $S(5\text{nm} - 800\text{ nm})$ aller Partikel in der Raumluft mit Durchmessern von 5 nm bis 800 nm deutlich anzusteigen, je größer der Gleichgewichtsfaktor F ist.
- Die hier beschriebene Tendenz ist auf Grundlage allgemeinerer Überlegungen zu erwarten, jedoch reichen die bisher erhaltenen Ergebnisse nicht aus, dies zweifelsfrei zu belegen.

Die Ergebnisse, dargestellt in den Abbildungen 8, 9 und 13, fassen die aus Sicht des Auftragnehmers wichtigsten Messergebnisse der komplexen Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens zusammen:

- Das Verhältnis der Mittelwerte $g=u/a$ von unangelagerten zu angelagerten Radonfolgeprodukten ist umso größer, je kleiner die der Gesamtoberfläche S der Teilchen in der Raumluft (Medianwert) ist.
- Der Gleichgewichtsfaktor $F = (\text{angelagerte} + \text{unangelagerte})/\text{CRn}$ wächst mit der Größe der Gesamtoberflächen S der Aerosole in der Raumluft an.

4.5 Zusammenfassendes Zwischenfazit zu den Ergebnissen der 19 Detailmessungen an den ausgewählten Arbeitsplätzen

Aus den Ergebnissen der Messungen an den 19 Arbeitsplätzen ergibt sich noch kein einheitliches Bild hinsichtlich der Relevanz der angelagerten und unangelagerten (freien) Radonfolgeprodukte für die Berechnung der Körperdosis. Es stellt sich die Frage, ob trotz der unterschiedlichen Expositionsbedingungen an den Arbeitsplätzen die Körperdosis generell nach den Vorgaben in der Anlage 18 Teil B Ziff. 3 der StrlSchV [1] berechnet werden kann, bzw., wenn dies nicht der Fall ist, ob eine damit vergleichbare einheitliche Vorgehensweise mit anderen Umrechnungsfaktoren für einzelne Arbeitsplatzkategorien möglich ist, oder ob für jeden einzelnen Arbeitsplatz individuelle Expositionsmessungen durchzuführen sind.

Die mittleren Gleichgewichtsfaktoren für die untersuchten Räume variierten in einem relativ großen Bereich von $0,16 < F < 0,82$. Die Messungen dieses Vorhabens überdecken damit einen größeren Bereich des Gleichgewichtsfaktors als die meisten der vom Auftragnehmer ausgewerteten Studien und Veröffentlichungen.

Die Gleichgewichtsfaktoren variierten signifikant um den Mittelwert wegen der sich ständig ändernden Radonkonzentrationen, die wiederum vor allem durch das Lüftungsverhalten oder unterschiedliche Arbeitsvorgänge bedingt werden, wobei Variationsbreiten von bis zu 50% beobachtet wurden. Diese Änderungen wirken sich auch auf die Aerosolzusammensetzung der Raumluft aus.

Ein wichtiger Maßstab für die Bewertung und Prognose des Einflusses der Radonfolgeproduktkonzentrationen sind die mittleren Gesamtoberflächen $S(5\text{nm} - 800\text{nm})$ aller Partikel, die innerhalb einer Messperiode im Bereich von $20 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ bis $600 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ variieren können. Der Medianwert aller 19 durchgeführten Detailmessungen von mindestens einer Woche beträgt $130 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (Maximum: $400 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, Minimum: $26,3 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$).

Die Verwendung der Partikeloberflächen pro Luftvolumen ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) ist aus Sicht des Auftragnehmers physikalisch plausibler als die in den meisten Veröffentlichungen betrachtete Teilchenzahlkonzentrationen (N/cm^3).

Im Vergleich zu den hier betrachteten Arbeitsplätzen ist in Wohnräumen eher davon auszugehen, dass sich die Radon-Aktivitätskonzentrationen nur geringfügig innerhalb einer Stunde ändern. Auf die hohe Variabilität der Expositionsbedingungen an Arbeitsplätzen im Vergleich zu Wohnräumen wird auch in der neueren Literatur hingewiesen (z.B. [42, 47]). Für Wohnräume ist deshalb der Ansatz eines generell anzuwendenden konstanten Gleichgewichtsfaktors $F=0,4$ allgemein akzeptiert, während er auf Arbeitsplätze nur bedingt angewendet werden sollte. Darauf weisen auch andere neuere Studien hin, z.B. [38]. In [51] wird aufgrund von Messreihen generell von einem höheren Gleichgewichtsfaktor an Arbeitsplätzen im Vergleich zu Wohnräumen ausgegangen.

Im Vorhaben konnte nachgewiesen werden, dass die Summe der Gesamtoberflächen S aller Partikel (Aerosole) in der Raumluft mit Durchmessern von 5 nm bis 800 nm tendenziell deutlich ansteigt, je größer der gemessene Gleichgewichtsfaktor F ist. Dieser Zusammenhang ist auf Grundlage allgemeinerer Überlegungen zu erwarten. Gleichfalls weisen die bisher erzielten Ergebnisse darauf hin, dass die unangelagerten RFP gegenüber den angelagerten RFP dominieren, wenn die Gesamtoberflächen S maßgeblich durch die der kleinen Partikel (Aerosole) bestimmt werden. Für die dosimetrische Bewertung der Expositionen kann das von großer Bedeutung sein.

Dies gilt auch für die Radonkonzentrationen in einigen Räumen, in denen die arithmetischen Mittelwerte über dem Referenzwert von $300 \text{Bq}/\text{m}^3$ liegen. Eine Aussage darüber, ob die in diesen Räumen vorliegenden Nutzungs- und Expositionsbedingungen typisch für solche Arbeitsplätze sind, oder ob mit den in diesen Untersuchungen ausgewählten Beispielen zumindest die Variationsbreite an Arbeitsplätzen für eine dosimetrische Bewertung beschrieben werden kann, ist nach Ansicht des Auftragnehmers nach dem gegenwärtigen Untersuchungsstand nicht möglich. Bei den Räumen, in denen diese Messungen durchgeführt worden sind, handelt es sich um Räume mit Expositionsbedingungen, die auch an den Arbeitsplätzen nach § 127 Abs. 1 Nr. 2 StrlSchG [4] vorliegen können, welche jedoch in der Leistungsbeschreibung explizit ausgeschlossen waren. (Eine Ausnahme stellen nach [2] ggf. Arbeitsplätze in untertägigen Grubenbauen des Bergbaus dar, bei denen die Luftwechsel-

zahlen und Strömungsgeschwindigkeiten der Wetter um Größenordnungen höher sind als an den meisten anderen Arbeitsplätzen, so dass die im Vorhaben ermittelte negative Korrelation zwischen F und fp nicht mehr gelten könnte.)

Beispielhaft wird hier eine kurze Zusammenfassung der Messergebnisse für den Arbeitsplatz R1 (siehe Tabelle 1) gegeben, um die Situation in Hinblick auf eine problemangepasste Dosisberechnung zu verdeutlichen. Die Zeitreihen der Messungen sind in Anlage 1 zusammengestellt. Die Radonaktivitätskonzentrationen sinken infolge der nutzungsbedingten Änderungen der Luftwechselraten (z. B. durch Öffnung der Türen zum Betreten des Raums oder Öffnen der Fenster zur Außenluftzufuhr) in sehr kurzen Zeiträumen von maximal ca. 600 Bq/m³ auf Werte von 10 bis 20 Bq/m³ ab. Diese Handlungen führen praktisch zu einem vollständigen Austausch der Raumluft mit der Außenluft. Wegen der vergleichsweise hohen Radonquellstärke im Raum steigen innerhalb eines Tages bei eingeschränkten Luftwechselraten die Radonaktivitätskonzentrationen wieder auf das Ausgangsniveau von > 300 Bq/m³ an, das sich als ein Fließgleichgewicht aus Radoneintritts- und jeweils herrschenden Luftwechselrate ergibt. Die Zeitabstände dieser Ereignisse sind unterschiedlich (z.B. am Wochenende, nachts etc.).

Die Zufuhr von Außenluft ist nicht nur aus der teils rapiden Änderung der Radonaktivitätskonzentrationen, sondern auch an der Variation der Partikelzahlkonzentration (Anzahl/cm³) bzw. der Summe der Oberflächen der Partikel S(µm²/cm³) in der Raumluft mit der Zeit erkennbar. Dies bedeutet, dass kurzfristig die Partikelzahlen bzw. die Oberflächen in dem Zeitraum deutlich ansteigen, in dem die Radonaktivitätskonzentrationen schnell aufgrund der Lüftung absinken. In gleicher Weise wie die Radonaktivitätskonzentrationen ändern sich auch die Aktivitätskonzentrationen der RFP, der Anteil der angelagerten RFP ist in diesem Fall bestimmend für die Aktivitätskonzentrationswerte der RFP insgesamt. An anderen Arbeitsplätzen bzw. zu anderen Messzeiten kann die Situation auch dadurch geprägt sein, dass eher die unangelagerten RFP dominieren. Der Raum R4 ist dafür ein prägnantes Beispiel.

5 Dosisabschätzung für die ausgewählten Standorte

5.1 Angewendete Modelle für die Dosisabschätzung

Die Körperdosis durch Inhalation von Radon an Arbeitsplätzen in Innenräumen sollte nach Ziff. 3 der Anlage 18 Teil B zur StrlSchV [1] mit

$$H_{Rn} [mSv] = 3,2 \cdot 10^{-6} \cdot c_{Rn} \left[\frac{Bq}{m^3} \right] \cdot t_{exp} [h] \quad (6)$$

berechnet werden. Dabei wird ein Gleichgewichtsfaktor von $F=0,4$ zugrunde gelegt. Die über den Messzeitraum gemittelte Radonkonzentration ist c_{Rn} , und t_{exp} die Expositionszeit, gemessen in Stunden.

Nimmt man an, dass die Expositionsbedingungen, die bei der Ableitung des Umrechnungsfaktors für die die Berechnung der Körperdosis bei einem Gleichgewichtsfaktor 0,4 berücksichtigt worden sind, auch generell vorliegen, so lässt sich daraus die Beziehung

$$H_{Rn} [mSv] = 8,0 \cdot 10^{-6} \cdot F \cdot c_{Rn} \left[\frac{Bq}{m^3} \right] \cdot t_{exp} [h] \quad (7)$$

ableiten, nach der unter Berücksichtigung des für eine Expositionssituation geltenden mittleren Gleichgewichtsfaktors die Körperdosis für diese Situation berechnet werden kann. Werden sowohl die Radonkonzentrationen als auch die Gleichgewichtsfaktoren stündlich gemessen, so ergibt sich die effektive Dosis nach

$$H_{Rn} [mSv] = 8,0 \cdot 10^{-6} \cdot \langle F \cdot c_{Rn} \rangle \left[\frac{Bq}{m^3} \right] \cdot t_{exp} [h] \quad (8)$$

wobei das Produkt $\langle F \cdot c_{Rn} \rangle$ eine über den Gesamtmeszeitraum von t_{exp} Stunden gemittelte Größe ist, die gemäß Definition dem Mittelwert der angelagerten und nicht angelagerten (freien) RFP entspricht. Der letzte Ausdruck ist äquivalent zu

$$\bar{H}_{Rn} [mSv] = \sum_{i=1}^N 8 \cdot 10^{-6} \cdot F_i \cdot c_{i,Rn} \left[\frac{Bq}{m^3} \right] \quad (9)$$

wobei F_i und $c_{i,Rn}$ die im Stundenmittel gemessenen Werte des Gleichgewichtsfaktors und der Radonaktivitätskonzentration bezeichnen.

5.2 Ergebnisse der Dosisberechnungen nach Strahlenschutzverordnung

5.2.1 Ergebnisse für den Gesamtmesszeitraum

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse der Dosisberechnungen für den Gesamtmesszeitraum dargestellt und diskutiert. Dabei wird explizit nicht unterschieden zwischen einer angenommenen Kernarbeitszeit von 8 - 17 Uhr von Montag bis einschließlich Freitag und der restlichen Messzeit einschließlich Wochenende. Im folgen Kapitel 5.2.2 wird der Zeitraum der üblichen Arbeitszeit von 8 bis 17 Uhr betrachtet.

In der Abbildung 27 sind die Ergebnisse von Berechnungen der EEC aus der mittleren Radonkonzentration nach Kapitel 5.1 dargestellt. Die Gleichgewichtsfaktoren F wurden aus den Messwerten berechnet, die über den jeweiligen Messzeitraum gemittelt worden sind. Die Ergebnisse belegen, dass die in [1] angegebene Berechnung der EEC mit $0,4 \cdot C_{Rn}$ in der Mehrzahl der Fälle zu höheren Werten als die Berechnung mit den jeweils vorliegenden Gleichgewichtsfaktoren führt und deshalb als eine konservative Abschätzung betrachtet werden kann.

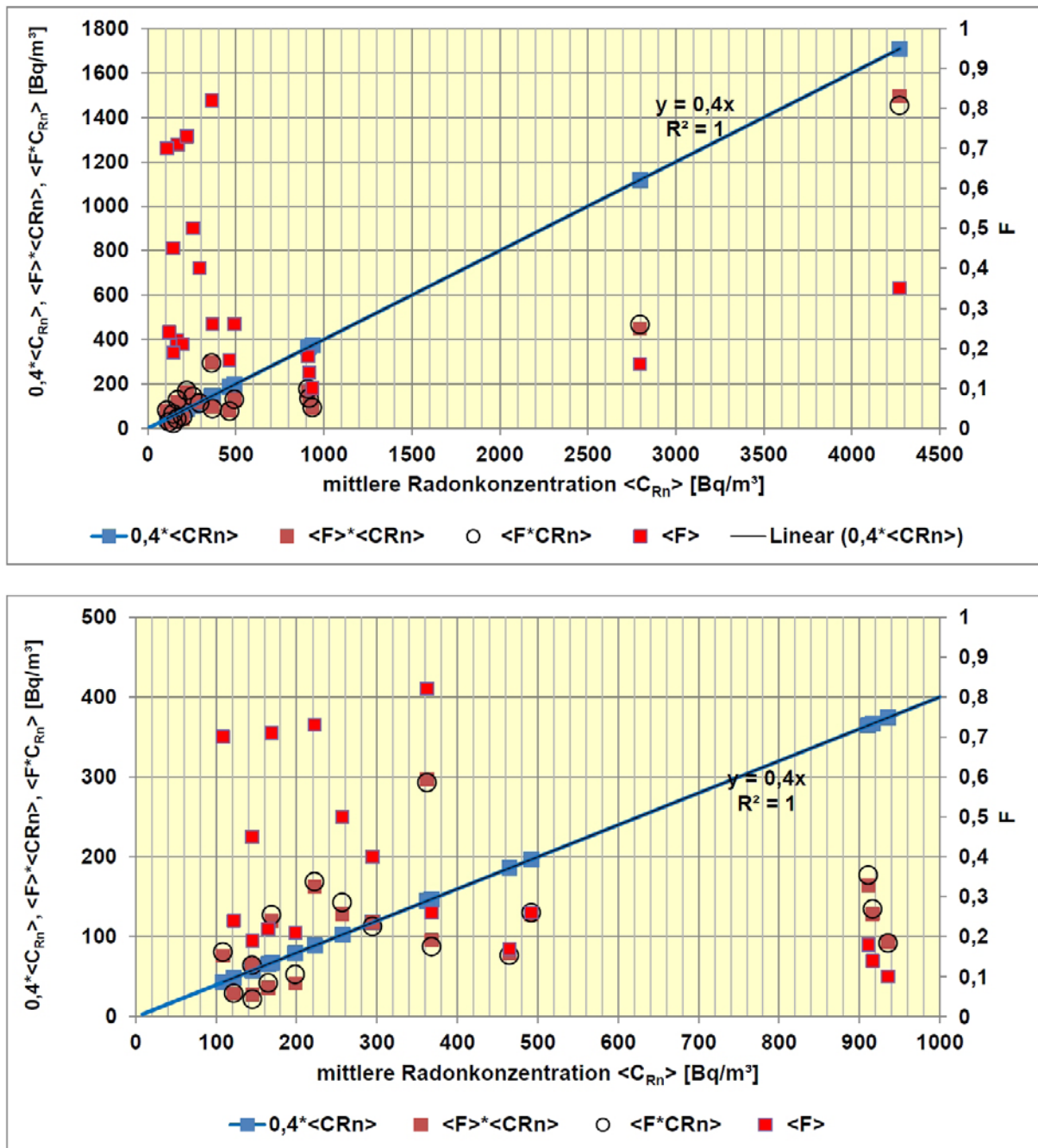


Abbildung 27: Ergebnisse der Berechnung der EEC in Abhängigkeit von der mittleren Radonkonzentration und den Gleichgewichtsfaktoren, die für die 19 Arbeitsplätze bestimmt wurden.
Oberes Bild: gesamter Bereich der Mittelwerte;
unteres Bild: nur für $\langle C_{Rn} \rangle \leq 1000 Bq/m^3$.

In der Abbildung 28 sind für die in der Abbildung 27 dargestellten Ergebnisse der unterschiedlich berechneten EEC-Werte die nach [4] ermittelten Werte der Körperdosis aufgetragen. Um die unterschiedlich langen Messungen an den 19 Arbeitsplätzen vergleichen zu können, wurde bei den Dosisberechnungen jeweils eine Arbeitszeit von 500 Stunden zugrunde gelegt.

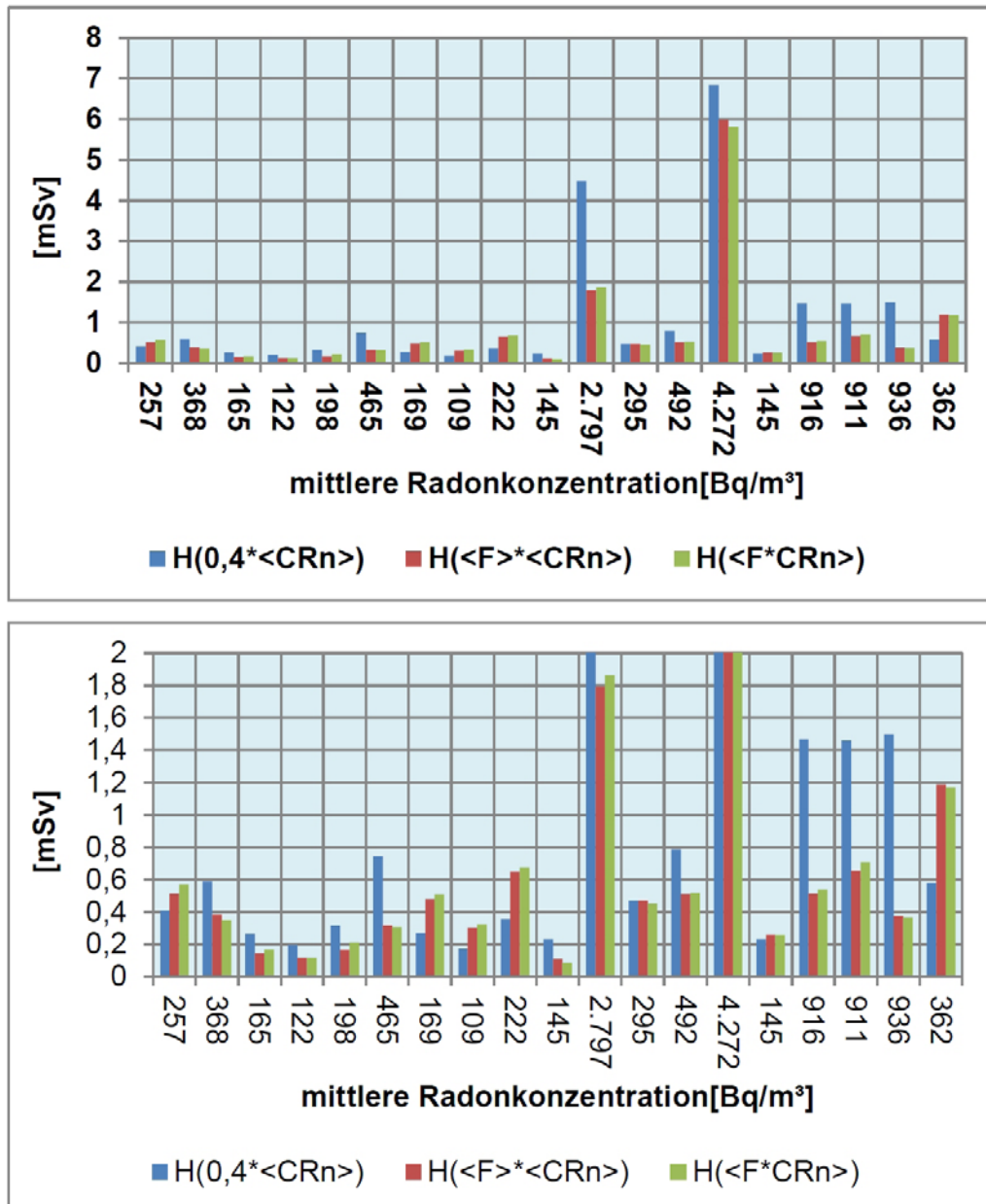


Abbildung 28: Ergebnisse der Dosisberechnungen für unterschiedliche Varianten der EEC in Abhängigkeit von der mittleren Radonkonzentrationen, die für die Arbeitsplätze bestimmt wurden. Die Expositionszeit wurde einheitlich auf 500 Stunden gesetzt.

Oberes Bild: gesamter Bereich der Mittelwerte;
unteres Bild: nur für die Mittelwerte $\langle C_{Rn} \rangle \leq 1000 \text{ Bq/m}^3$.

Es ist auch hier zu erkennen, dass an 13 der 19 Arbeitsplätze die in [1] angegebene Vorgehensweise der Berechnung der Körperdosis unter Berücksichtigung des Gleichgewichtsfaktors von $F=0,4$ zu einer Überschätzung der Körperdosis führt. Im Sinne der Grundsätze des Strahlenschutzes ist diese Vorgehensweise eine konservative Näherung. Das scheint vor allem für den Bereich der mittleren Radonkonzentrationen von $> 400 \text{ Bq/m}^3$ zu gelten, in dem die nach [1] berechneten Dosen immer größer als die Dosen sind, bei deren Berechnung explizit auf die jeweils vorliegende EEC zurückgegriffen wird. Der Grund hierfür ist nach den bisherigen Ergebnissen, dass bei vergleichsweise hohen Mittelwerten der Radonkonzentrationen auch oft einschneidende volatile Luftaustauschprozesse stattfinden. Das bedeutet, dass sich hohe Radonkonzentrationen auch wieder rasch abbauen und sich somit höhere Konzentrationen der EEC (die Summe von angelagerten und freien RZP) nicht längerfristig aufbauen können. So resultiert dann in diesen Expositionssituationen ein mittlerer Gleichgewichtsfaktor F , der teils deutlich geringer als $0,4$ ist.

5.2.2 Ergebnisse für den Arbeitszeitraum von 8 bis 17 Uhr

Für die Messkampagne 2021 (Räume R1 - R7) ist zur weiteren Untersetzung der obigen Dosisberechnung eine Differenzierung zwischen Arbeits- und Ruhezeiten durchgeführt worden, wobei eine Kernarbeitszeit von 8 bis 17 Uhr von Montag bis Freitag explizit betrachtet wurde. In der Abbildung 29 sind die entsprechenden mittleren Radonkonzentrationen für diese Messperiode den für die übrige Messzeit (nachts und Wochenende) in Abhängigkeit von der mittleren Radonkonzentration über den Gesamtzeitraum dargestellt.

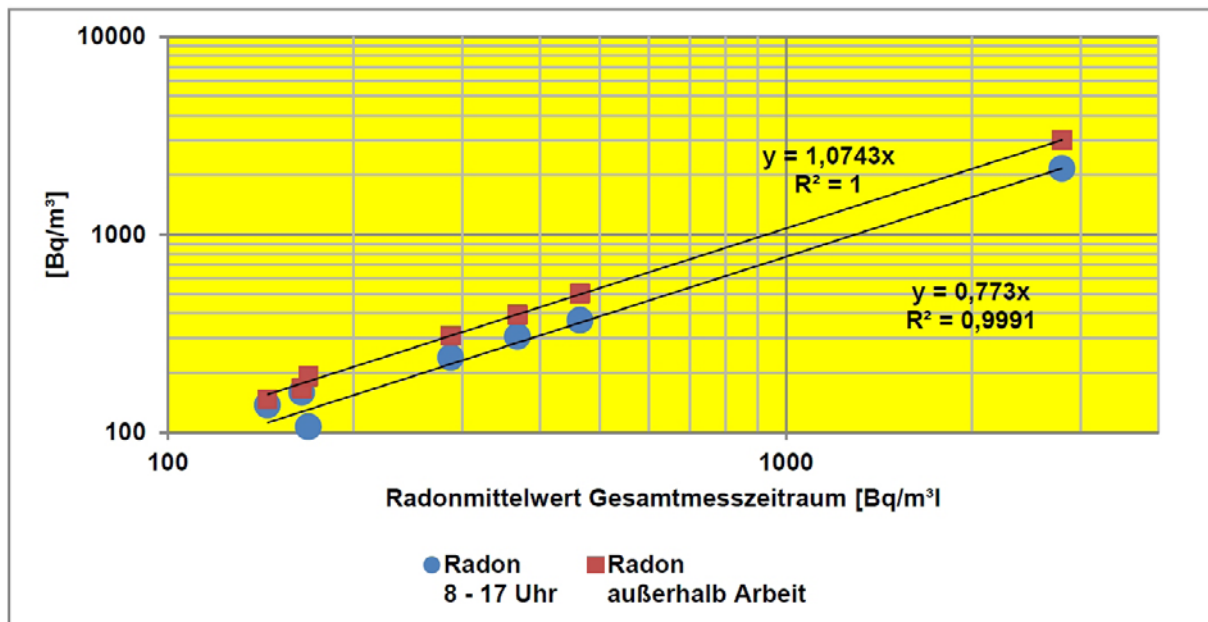


Abbildung 29: Berechnete mittlere Radonkonzentrationen für die Kernarbeitszeit von 8 bis 17 Uhr von Montag bis Freitag und die übrige Messzeit in Abhängigkeit von der über den Gesamtmesszeitraum berechneten mittleren Radonkonzentration für die Räume R1 – R7

Aus diesen Ergebnissen folgt, dass während der Arbeitszeit die mittleren Radonkonzentrationen um den Faktor 0,77 geringer sind, was vor allem auf die höheren nutzungsbedingten Luftwechsel z.B. durch Öffnen von Türen und Fenstern als auch infolge einer Verstärkung der technischen Lüftung zurückzuführen ist. Daraus würde folgen, dass für die gewählte Arbeitszeit eine geringere Dosis als für die übrige Zeitfolgen zu veranschlagen ist, wenn der Gleichgewichtsfaktor z.B. konstant wäre und z.B. mit $F=0,4$ approximiert wird.

In der Abbildung 30 sind analog zu Abbildung 29 die mittleren Gleichgewichtsfaktoren F für die Kernarbeitszeit von 8 bis 17 Uhr von Montag bis Freitag und für die übrige Messzeit (nachts und Wochenende) in Abhängigkeit von den mittleren Gleichgewichtsfaktoren F für den Gesamtzeitraum dargestellt. Aus diesen Ergebnissen folgt, dass die während der Arbeitszeit resultierenden mittleren Gleichgewichtsfaktoren F sich nur geringfügig von denen unterscheiden, die für die Nichtarbeitszeit berechnet wurden. Das bedeutet, dass letztlich die zu veranschlagende Dosis für die Kernarbeitszeit praktisch nur durch die etwa um den Faktor 0,7 geringere mittlere Radonkonzentration bestimmt wird (s.a. Abbildung 30). Im Umkehrschluss könnte man annehmen, dass die Arbeitsaktivitäten nur einen geringen bzw. zu vernachlässigenden Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der Gleichgewichtsfaktoren in den untersuchten Räumen haben und letztlich die angelagerten RFP bestimmend für die Höhe des Gleichgewichtsfaktors F sind.

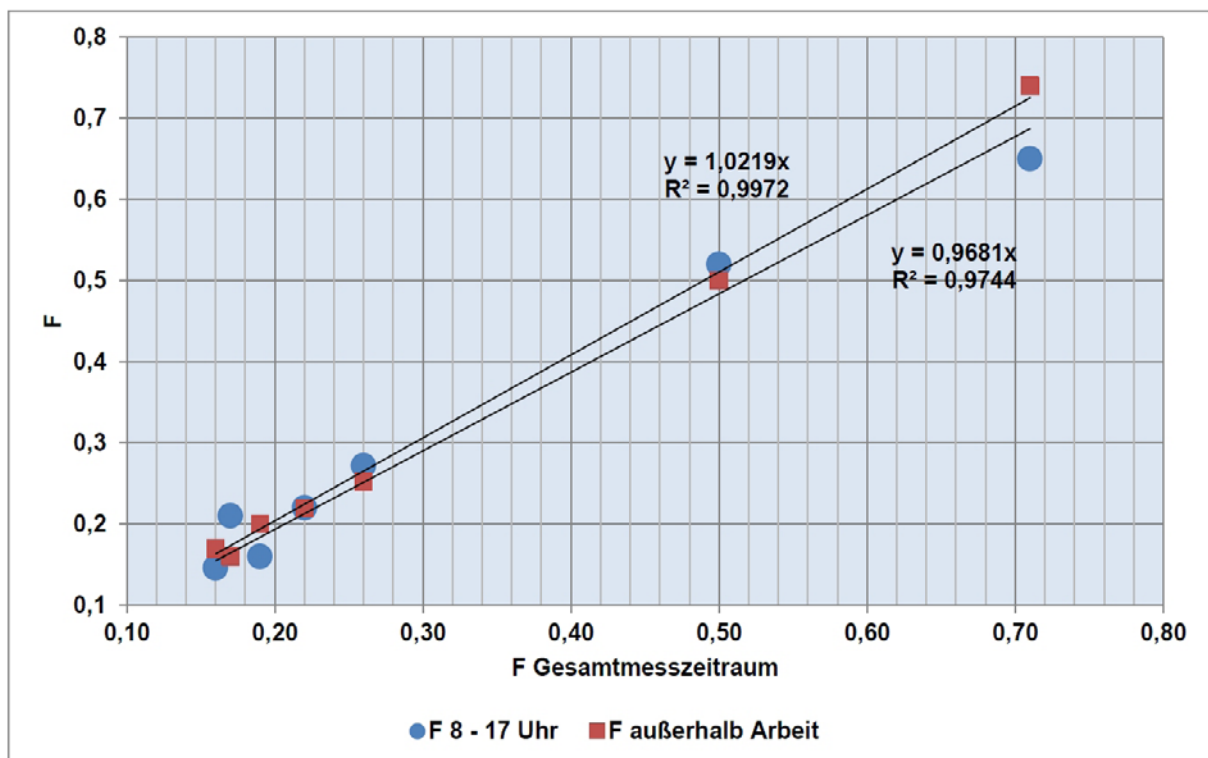


Abbildung 30: Wie Abbildung 29, jedoch für die jeweiligen Gleichgewichtsfaktoren F

Die Ergebnisse der Dosisberechnungen in der Abbildung 31 untersetzen die in den Abbildungen 29 und 29 dargestellten Zusammenhänge. Es ist zu erkennen, dass die für die Arbeitszeit zu veranschlagende Dosis knapp 30% niedriger als die für den Gesamtzeitraum berechnete Dosis ist. Diese Verringerung der Dosis während der Arbeitszeit ist praktisch nur auf

die geringe mittlere Radonkonzentration während der Arbeitszeit zurückzuführen und nicht auf eine Reduktion der Gleichgewichtsfaktoren, die, wie in der Abbildung 30 illustriert, annähernd konstant bleiben.

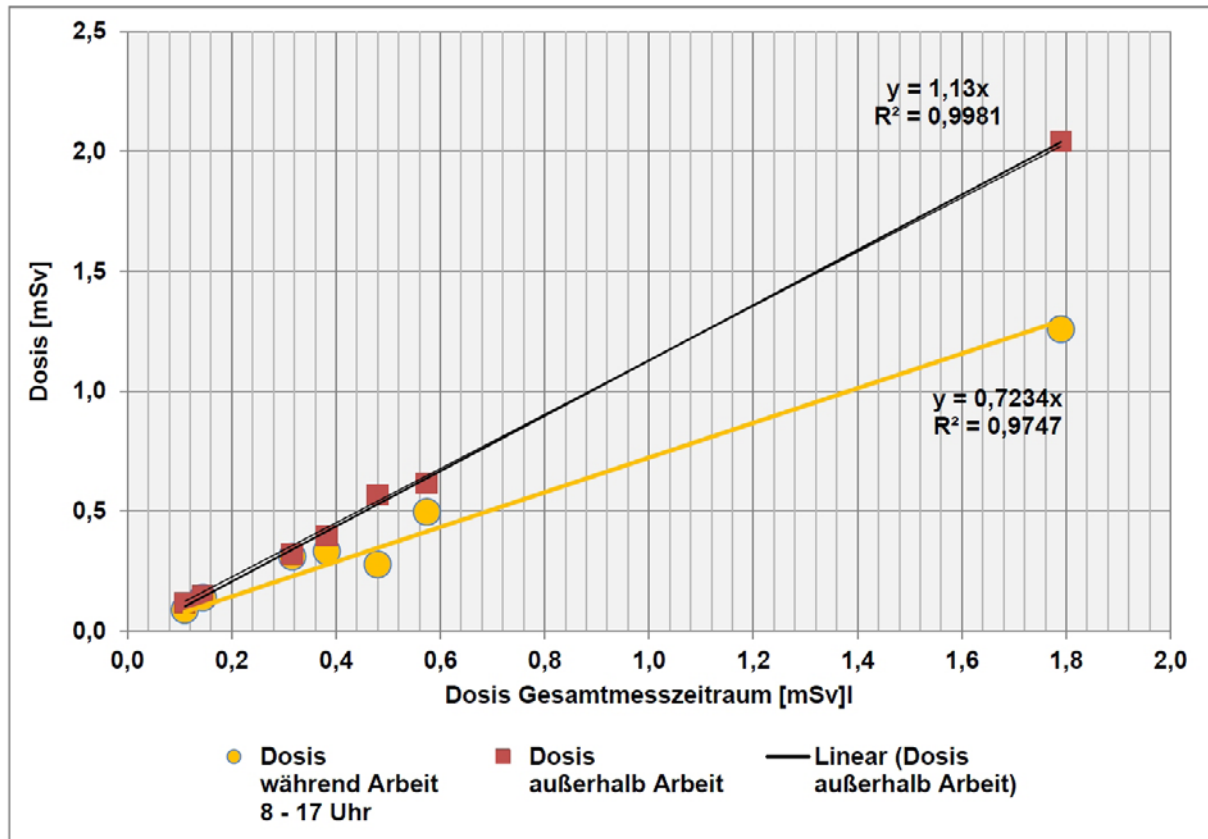


Abbildung 31: Wie Abbildung 30, jedoch für die jeweilige Dosisberechnung

5.3 Fazit der Dosisberechnungen nach Strahlenschutzverordnung

Die Grundlage für die Ermittlung der Körperdosis eines Beschäftigten sollte immer die über den Bewertungszeitraum gemittelte Radonkonzentration CRn an dem Arbeitsplatz sein. Eine generelle Anwendung eines Gleichgewichtsfaktors von $F=0,4$ führt nach unseren Untersuchungen in den meisten Fällen zu einer Überschätzung der Exposition und folglich bei Anwendung des Umrechnungsfaktors nach Anlage 18 Teil B Ziff. 3 der StrlSchV [1] auch zu einer Überschätzung der Körperdosis. Fraglich ist jedoch, ob die Expositionsbedingungen (z.B. Summe der Anteile der angelagerten und unangelagerten RFP), für die dieser Umrechnungsfaktor abgeleitet worden sind, auch für solche Situationen gelten, für die andere Gleichgewichtsfaktoren ermittelt worden sind.

Eine konservative Vorgehensweise der Ermittlung der Exposition könnte beim Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte eine zusätzliche Sicherheit bringen, die auch im Anwendungsbereich des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG) [4] für existierende Situationen bei Strahlenexpositionen durch Radon erforderlich sein kann. Entscheidungen nach § 130 Abs. 3 (StrlSchG) [4] können jedoch unnötige Maßnahmen zur Folge haben. Das ist nach

Auffassung des Auftragnehmers unbefriedigend. Nach Meinung der Autoren ist die Methode der Bestimmung

- eines über den gesamten Messzeitraum gemittelten Gleichgewichtsfaktors F , der implizit die Summe der angelagerten und freien RFP enthält,
- die gleichzeitige Bestimmung der ebenfalls über den gesamten Messzeitraum gemittelten Radonkonzentration C_{Rn} am Arbeitsplatz sowie
- die Verwendung des Umrechnungsfaktors nach Anlage 18 Teil B Ziff. 3 der StrlSchV [1]

eine akzeptable Lösung für die Ermittlung der Körperdosis.

Überschätzungen der Exposition sind bisher nur in Fällen festgestellt worden, in denen die Radonkonzentrationen von $< 400 \text{ Bq/m}^3$ gemessen worden sind. In diesen Fällen fordert das StrlSchG [4] zwar Maßnahmen zur Reduktion der Radonkonzentrationen aber keine Abschätzungen der Körperdosis.

6 Vergleich der Messergebnisse im Vorhaben mit Ergebnissen aus der Literatur

6.1 Ergebnisse der Recherche von Literatur nach Veröffentlichung der ICRP 137

In diesem und dem nächsten Unterabschnitt werden entsprechend den Anforderungen in der Leistungsbeschreibung die Expositionsbedingungen, welche während der Messungen im Vorhaben vorlagen, mit Expositionsbedingungen von in der Literatur publizierten Messungen bzw. den in der ICRP 137 zu Grunde gelegten Annahmen für die Ermittlung der Dosiskonversionsfaktoren verglichen. Hierbei ist anzumerken, dass anders als für Wohnräume, bezüglich der Expositionsbedingungen an Arbeitsplätzen nur sehr wenige Veröffentlichungen existieren, die nicht bereits in die ICRP 137 eingeflossen sind. Durch den Auftragnehmer wurden dazu insbesondere Veröffentlichungen ausgewertet, die nach der Publikation der ICRP 137, d.h., ab dem Jahr 2017, erschienen sind. Bei der Recherche erfolgte deshalb eine Fokussierung auf Veröffentlichungen zu Messungen an Arbeitsplätzen in den Jahren seit 2017.

In zahlreichen Veröffentlichungen werden nur die Ergebnisse von Messungen der mittleren oder zeitaufgelösten Radon-Aktivitätskonzentration [39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49] ((bzw. die Metastudie [50]) beschreiben, welche für die Bearbeitung des Vorhabens nur bedingt hilfreich sind. Für das Vorhaben sind gezielte Messungen der zeitabhängigen Aktivitätskonzentration von Radon und Radonfolgeprodukten, des Gleichgewichtsfaktors sowie der angelagerten bzw. unangelagerten Fraktion der Radonzerfallsprodukte besonders relevant, die entsprechenden Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert.

Bei der dosimetrischen Bewertung spielen die Anlagerungsprozesse der Radonzerfallsprodukte an die in der Luft befindlichen Aerosole eine wichtige Rolle. Deshalb wird im vorliegenden Bericht die zur Beschreibung der Anlagerung von Radonfolgeprodukten physikalisch relevante Oberflächenverteilung S ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) der Aerosole verwendet. Dies stellt einen methodischen Unterschied zu den in der wissenschaftlichen Literatur bisher verwendeten Teilchenzahlkonzentrationen ($1/\text{cm}^3$) dar.

Ein wichtiges Ergebnis des Vorhabens ist der große Variationsbereich des Gleichgewichtsfaktors. Zu diesem Ergebnis gelangten auch Chen und Harley [51] (Variation der Gleichgewichtsfaktoren an verschiedenen Arbeitsplätzen zwischen $F=0,15$ und $F=0,89$). Mit steigender Luftwechselzahl steigt entsprechend den Untersuchungen in [51] der Gleichgewichtsfaktor an den Arbeitsplätzen an. Im Vorhaben wurde die umgekehrte Tendenz beobachtet, siehe z.B. die Abbildungen in Anlage 1 zu Raum R2. Die in [51] vorgeschlagene Interpretation, dass ein hoher Luftwechsel mit einer geringen Teilchenzahl- bzw. Oberflächenkonzentration in der Raumluft verbunden sei, ist jedoch nach Meinung der Autoren nichtzutreffend, wie aus den in Anlage 1 und Anlage 2 dargestellten Zeitreihen ersichtlich ist. Bei Zufuhr von Frischluft aus der Gebäudeumgebung steigt vielmehr die Teilchenzahlkonzentration ($1/\text{cm}^3$) und die Flächenkonzentration ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) an, so dass sich anteilig mehr angelagerte (langsam diffundierende) Zerfallsprodukte in der Luft befinden und damit der Gleichgewichtsfaktor steigt. An Arbeitsplätzen, an denen durch die Tätigkeit bedingt eine hohe Staub- bzw. Aerosolkonzentration entsteht, trifft dieser Zusammenhang nicht mehr zu.

Modellrechnungen wie in [52], die einen abnehmenden Gleichgewichtsfaktor mit steigender Luftwechselrate vorhersagen, stehen im Widerspruch zu den Ergebnissen, die bei den Messungen an Arbeitsplätzen im Rahmen des Vorhabens gewonnen wurden. Als Schlussfolgerung ergibt sich daraus, dass bei der dosimetrischen Bewertungen einer Radon-Exposition immer die vorliegenden Expositionsbedingungen und vor allem der tatsächlich vorliegende Gleichgewichtsfaktor berücksichtigt werden müssen, um gravierende Fehleinschätzungen zu vermeiden.

Bei Messungen durch Zhang et al. [53] wurde ein unangelagerter Anteil $f_p = \text{unangelagert} / (\text{unangelagert} + \text{angelagert})$ der Radonzerfallsprodukte zwischen ca. 0,08 und 0,1 gemessen, was deutlich unter dem von Zwack [54] ermittelten Bereich von 0,4 bis 0,6 liegt. Die im Vorhaben festgestellte Spannweite von f_p (siehe Abbildung 12) reicht von 0,10 bis 0,56. Aus den Untersuchungen im Vorhaben ergibt sich auch eine negative Korrelation, zwischen F und f_p , (vgl. Abbildung 12 mit Abbildung 32), was auch in den Messungen von Dicarlo et al. [55] bestätigt wurde.

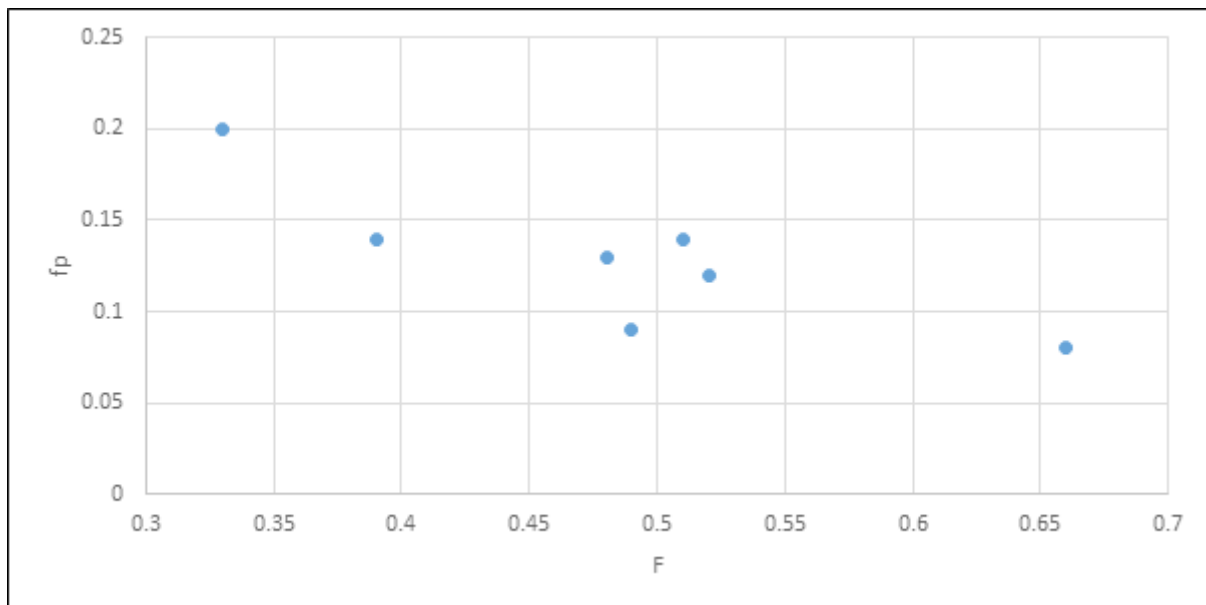


Abbildung 32: F und f_p (eigene graphische Darstellung von Tabelle 5 in [55])

Khalaf et al. [58] haben an Arbeitsplätzen den Zusammenhang zwischen dem unangelagerten Anteil der Radonfolgeprodukte und der Teilchenzahlkonzentration ermittelt, siehe Abbildung 33. Die Tendenz einer mit steigender Aerosolkonzentration abnehmenden unangelagerten Fraktion f_p entspricht dem in Abbildung 9 gezeigten Ergebnis aus dem Vorhaben.

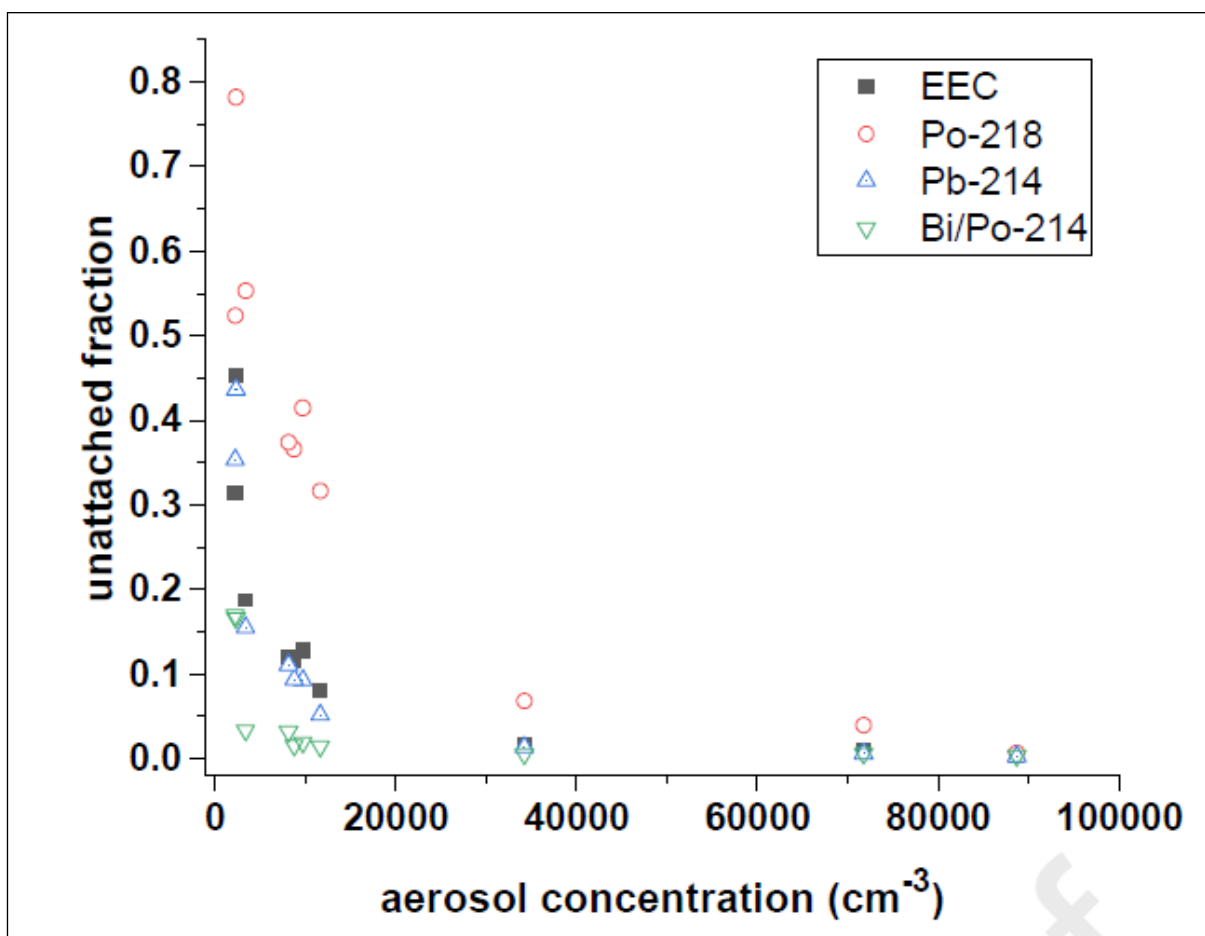


Abbildung 33: Unangelagerter Anteil f_p der Radonfolgeprodukte aufgetragen über der Teilchenzahlkonzentration der Aerosole (Figure 4 aus [58])

Ebenfalls eine gute Übereinstimmung zeigt sich zwischen dem im Vorhaben ermittelten Zusammenhang zwischen F und f_p , vgl. Abbildung 12 mit Abbildung 34. Bei vergleichbaren Wertebereichen von F (etwa 0,1 bis 0,8) sind jedoch die Werte von f_p für hohe F in [58] deutlich niedriger ($f_p < 0,05$) als in den Ergebnissen des Vorhabens ($f_p \sim 0,1$).

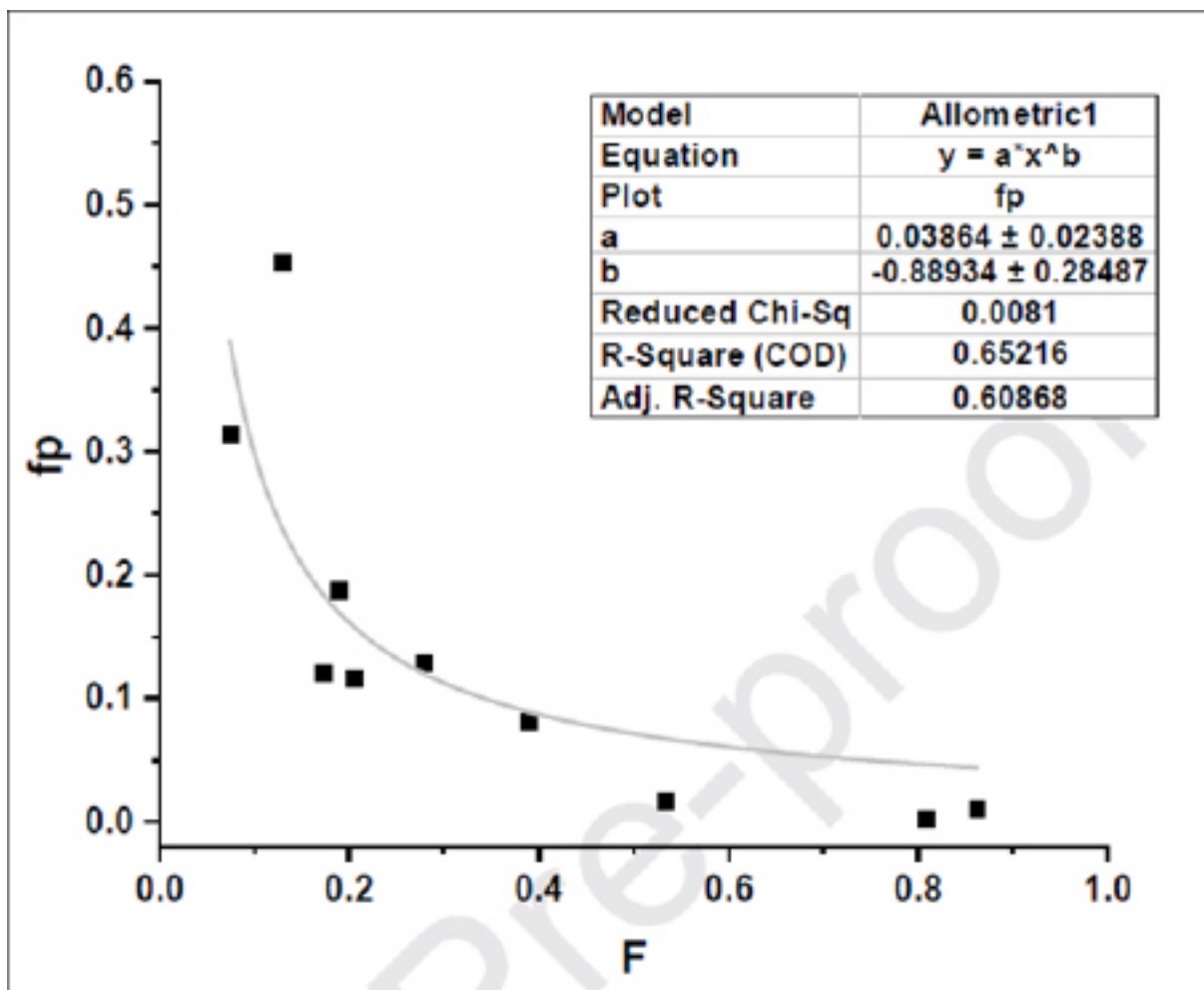


Abbildung 34: Unanglagerter Anteil fp der Radonfolgeprodukte aufgetragen über dem Gleichgewichtsfaktor (Figure 6 aus [58])

Der in [58] vermutete lineare Zusammenhang zwischen der gleichgewichts-äquivalenten Radonkonzentration (EEC) und der Aerosolkonzentration konnte jedoch im Vorhaben nicht nachgewiesen werden.

6.2 Vergleich der Ergebnisse mit den Annahmen der ICRP 137

In diesem Unterabschnitt werden die für die dosimetrische Bewertung von Radonexpositionen verwendeten Annahmen in Annex A der ICRP 137 [2] mit den Ergebnissen des Vorhabens verglichen. Es werden dabei nur Arbeitsplätze in Innenräumen diskutiert (keine Höhlen, Bergwerke etc.). Aus diesem Grund sind vorrangig die Ausführungen in den folgenden Abschnitten von ICRP 137 für das Vorhaben relevant:

Abschnitt 12.5 Dosimetric data for radon

Annex A

A.3 Physical properties of airborne radon progeny

A.4 Special quantities and units,

A.5 Inhalation of short-lived radon progeny, insbesondere A.5.1 Indoor workplaces

A.7 Reference values for regional deposition of inhaled Rn-222 and Rn-220 aerosols, insbesondere A.7.1 Radon progeny

A.8 Dosimetric data for radon progeny

Von besonderer Bedeutung für die im Vorhaben durchgeführten Untersuchungen besteht vor allem in Abschnitt A.5 und A.5.1.

Zunächst geht die ICRP 137, sofern keine konkreten davon abweichenden Messergebnisse vorliegen, von einem Gleichgewichtsfaktor von 0,4 aus (z.B. Tabelle A.11). Allein die nutzungsbedingten Luftwechselraten bzw. auch die Arbeitsvorgänge selbst können jedoch zu sehr starken Variationen der Radonkonzentrationen und des Gleichgewichtsfaktors führen, wie aus den Ergebnissen des Vorhabens deutlich wird. Damit ist die Situation an Arbeitsplätzen nicht kompatibel mit dem Konzept sich sehr langsam ändernder Radon-Aktivitätskonzentrationen und den damit verknüpften Aktivitätskonzentrationen der Radonfolgeprodukte an einem Arbeitsplatz.

Der in der ICRP 137 angegebene Zusammenhang $f_p = 414/N$ des unangelagerten Anteils f_p mit der Teilchenzahlkonzentration N wird durch die Messergebnisse bestätigt², wie Abbildung 35 und Abbildung 36 für die Beispiele R1 und R2 zeigen.

² Dieser Zusammenhang gilt nur im Bereich der Teilchenzahldichte $2E3 \text{ cm}^{-3}$ bis $7E5 \text{ cm}^{-3}$, was für die durchgeführten Messungen zutrifft.

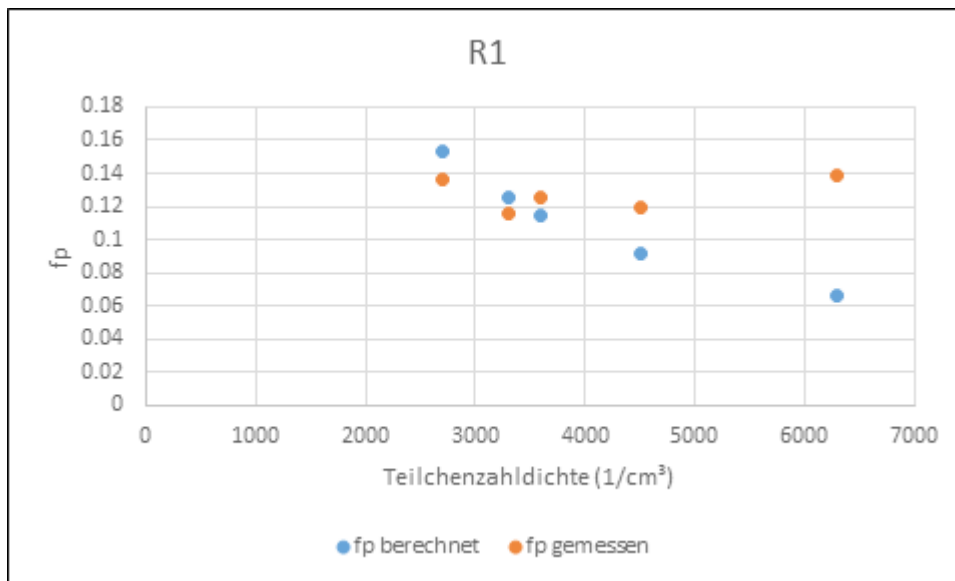


Abbildung 35: Vergleich der Messwerte und nach [2] berechneten Werte für f_p in Abhängigkeit von der Teilchenzahldichte, Beispiel Arbeitsplatz R1

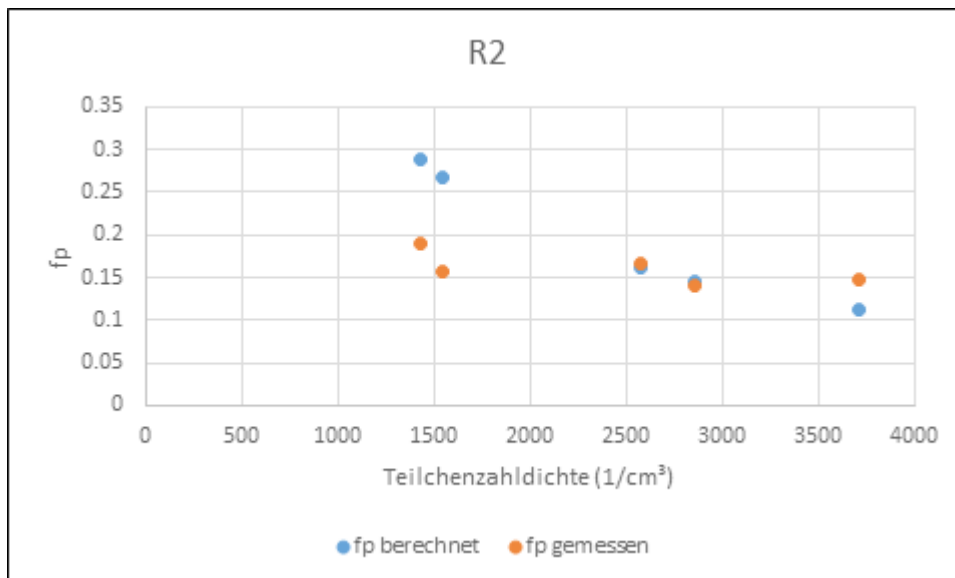


Abbildung 36: Vergleich der Messwerte und nach [2] berechneten Werte für f_p in Abhängigkeit von der Teilchenzahldichte, Beispiel Arbeitsplatz R2

Eine vergleichbare Abhängigkeit wurde auch an den anderen Arbeitsplätzen festgestellt.

Die ebenfalls in der ICRP 137 angegebene negative Korrelation zwischen F und f_p an Arbeitsplätzen in Innenräumen konnte, wie bereits in Abschnitt 6.1 erläutert, im Vorhaben bestätigt werden.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Aus den Ergebnissen der Messungen an Arbeitsplätzen über Zeiträume von bis zu 3 Wochen und einer Gesamtmesszeit von ca. 4000 Stunden unter unterschiedlichen Lüftungs- und Arbeitsbedingungen konnte kein allgemein gültiger Zusammenhang zwischen angelagerten und unangelagerten (freien) Radonfolgeprodukten gefunden werden, der es gestatten würde, auf der Grundlage einer generalisierten Klassifikation von Arbeitsplätzen die Strahlenexposition mittels einfachen Verfahren unter Einbeziehung standardisierter Koeffizienten zu bestimmen. Für belastbare Expositionsbestimmungen müssen die Messungen an den Arbeitsplätzen auch unter Einbeziehung der Aerosolpartikelverteilungen in der Raumluft durchgeführt werden. Solche komplexen Untersuchungen sind jedoch sehr kostspielig, so dass alternative Methoden, die sowohl ausreichend konservativ als auch realistisch sein müssen, diskutiert werden sollten.

Die mittleren Gleichgewichtsfaktoren für die untersuchten Räume variierten in einem relativ großen Bereich von $F=0,16$ bis $F=0,82$. Die Messungen dieses Vorhabens überdeckten damit einen größeren Bereich des Gleichgewichtsfaktors als die meisten der vom Auftragnehmer ausgewerteten Studien und Veröffentlichungen. Neben den Gleichgewichtsfaktoren wurden darüber hinaus hohe Schwankungsbreiten sowohl der angelagerten und nicht angelagerten (freien) RFP als auch der Aerosolverteilungen festgestellt und zusätzlich eine hohe Variabilität der Aerosolverteilungen in der Raumluft nachgewiesen. Der Median der berechneten Gesamtoberflächen $S(5\text{nm} - 800\text{nm})$ der Aerosole, gemessen in $\mu\text{m}^2/\text{m}^3$, wurde als eine wichtige Größe identifiziert, die neben der Luftwechselrate auch die Situation der Teilchenverteilungen in der Raumluft an den Arbeitsplätzen charakterisiert.

Die Gleichgewichtsfaktoren variierten wegen der sich ändernden Schwankungen der Radonkonzentration, bedingt vor allem durch das Lüftungsverhalten bzw. infolge unterschiedlicher Arbeitsvorgänge, relativ stark innerhalb der vorgegebenen Arbeitszeiten um den berechneten Mittelwert. Die Variationsbreite betrug bis zu 50% innerhalb von wenigen Stunden. Diese Änderungen der Gleichgewichtsfaktoren widerspiegeln sich auch in der Aerosolzusammensetzung der Raumluft.

Ein wichtiger Maßstab für die Bewertung und Prognose des Einflusses der Radonfolgeproduktkonzentrationen sind die mittleren Gesamtoberflächen $S(5\text{nm} - 800\text{nm})$ aller Partikel, die innerhalb einer Messperiode im Bereich von $20 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ bis $600 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ variieren können. Der Medianwert aller 19 durchgeführten Detailmessungen von mindestens einer Woche beträgt $130 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ (Minimum: $26,3 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$, Maximum: $400 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$).

Die Verwendung der Partikeloberflächen pro Luftvolumen ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) ist aus Sicht des Auftragnehmers eine wichtige Systemvariable und erfasst die Expositionssituation realistischer als die in den meisten Veröffentlichungen betrachteten Teilchenzahlkonzentrationen ($1/\text{cm}^3$).

Im Vergleich zu den hier betrachteten Arbeitsplätzen ändern sich in Wohnräumen die Radon-Aktivitätskonzentrationen weniger prägnant innerhalb einer Stunde. Auf die hohe Variabilität der Expositionsbedingungen an Arbeitsplätzen im Vergleich zu Wohnräumen wird auch in der neueren Literatur hingewiesen (z.B. [42, 47]). Für Wohnräume ist deshalb der Ansatz von konstanten Gleichgewichtsfaktoren mit z. B. $F=0,4$ allgemein akzeptiert, während er auf Arbeitsplätze nur bedingt zutrifft. Darauf weisen auch andere neuere Studien hin, z. B. [38]. In [51] wird aufgrund von Messreihen generell von einem höheren Gleichgewichtsfaktor an Arbeitsplätzen im Vergleich zu Wohnräumen ausgegangen. Das trifft jedoch im Ergebnis

des vorliegenden Forschungsvorhabens nicht zu.

Im Vorhaben konnte nachgewiesen werden, dass die Gesamtoberfläche S aller Partikel (Aerosole) in der Raumluft mit Durchmessern von 5 nm bis 800 nm tendenziell deutlich ansteigt, je größer der gemessene Gleichgewichtsfaktor F ist. Dieser Zusammenhang ist auf Grundlage allgemeinerer Überlegungen zu erwarten. Gleichfalls könnten die bisher erzielten Ergebnisse darauf hinweisen, dass die unangelagerten RFP gegenüber den angelagerten RFP dominieren, wenn die Gesamtoberflächen S maßgeblich durch die Oberfläche der kleinen Aerosolpartikel bestimmt werden.

Dies gilt auch für die Radonkonzentrationen in einigen Räumen, in denen die arithmetischen Mittelwerte über dem Referenzwert von 300 Bq/m^3 liegen. Eine Aussage darüber, ob die in diesen Räumen vorliegenden Nutzungs- und Expositionsbedingungen typisch für solche Arbeitsplätze sind, oder ob mit den in diesen Untersuchungen ausgewählten Beispielen zumindest die Variationsbreite an Arbeitsplätzen für eine dosimetrische Bewertung beschrieben werden kann, ist nach Ansicht des Auftragnehmers nach dem gegenwärtigen Untersuchungsstand nicht möglich.

Bei den Räumen, in denen diese Messungen durchgeführt wurden, handelt es sich um Räume mit Expositionsbedingungen, die auch an den Arbeitsplätzen nach § 127 Abs. 1 Nr. 2 StrlSchG vorliegen können, welche jedoch in der Leistungsbeschreibung explizit ausgeschlossen waren. (Eine Ausnahme stellen nach [2] ggf. Arbeitsplätze in untertägigen Grubenbauen des Bergbaus dar, bei denen die Luftwechselzahlen und Strömungsgeschwindigkeiten der Wetter um Größenordnungen höher sind als an den meisten anderen Arbeitsplätzen, so dass die im Vorhaben ermittelte negative Korrelation zwischen F und f_p nicht mehr gelten könnte.)

Beispielhaft wird hier eine kurze Zusammenfassung der Messergebnisse für den Arbeitsplatz R1 (siehe Tabelle 1) gegeben, um die Situation in Hinblick auf eine problemangepasste Dosisberechnung zu verdeutlichen. Die Zeitreihen der Messungen sind in Anlage 1 zusammengestellt. Die Radonaktivitätskonzentrationen sinken infolge der nutzungsbedingten Änderungen der Luftwechselraten (z. B. durch Öffnung der Türen zum Betreten des Raums oder Öffnen der Fenster zur Außenluftzufuhr) in sehr kurzen Zeiträumen von maximal ca. 600 Bq/m^3 auf Werte von ca. 10 bis 20 Bq/m^3 ab. Diese Handlungen führen praktisch zu einem vollständigen Austausch der Raumluft mit der Außenluft. Wegen der vergleichsweise hohen Radonquellstärke im Raum steigen innerhalb eines Tages bei eingeschränkten Luftwechselraten die Radonaktivitätskonzentrationen wieder auf das Ausgangsniveau von $> 300 \text{ Bq/m}^3$ an, das sich als ein Fließgleichgewicht aus Radoneintritts- und jeweils herrschenden Luftwechselrate ergibt. Die Zeitabstände dieser Ereignisse sind unterschiedlich (z.B. am Wochenende, nachts etc.).

Die Zufuhr von Außenluft ist nicht nur aus der teils rapiden Änderung der Radonaktivitätskonzentrationen, sondern auch an der Variation der Partikelzahlkonzentration (Anzahl/ cm^3) bzw. der Summe der Oberflächen der Partikel $S(\mu\text{m}^2/\text{cm}^3)$ in der Raumluft mit der Zeit erkennbar. Dies bedeutet, dass kurzfristig die Partikelzahlen bzw. die Oberflächen in dem Zeitraum deutlich ansteigen, in dem die Radonaktivitätskonzentrationen schnell aufgrund der Lüftung absinken. In gleicher Weise wie die Radonaktivitätskonzentrationen ändern sich auch die Aktivitätskonzentrationen der RFP; der Anteil der angelagerten RFP ist in diesem Fall bestimmend für die Aktivitätskonzentrationswerte der RFP. An anderen Arbeitsplätzen bzw. zu anderen Messzeiten kann die Situation auch dadurch geprägt sein, dass eher die unangelagerten RFP dominieren. Der Raum R4 ist dafür ein prägnantes Beispiel.

Nach Beendigung der Lüftung im Raum R1 nehmen die Aktivitätskonzentrationen der angelagerten RFP synchron mit der Radonaktivitätskonzentration wieder deutlich zu, wobei der Gleichgewichtsfaktor F weitgehend konstant bleibt. Die Aktivitätskonzentration der unangelagerten RFP verharrt dagegen meistens auf einem niedrigen Niveau.

Entsprechend der Leistungsbeschreibung des Vorhabens ist unter Verwendung der von der ICRP [2] publizierten Dosiskonversionsfaktoren sowie der Konversionsfaktoren der Anlage 18 Teil B Nr. 3 StrlSchV [1] jeweils die mittlere effektive Dosis eines Arbeitnehmers an den betrachteten Arbeitsplätzen abzuschätzen. In [54, 56, 57] sind weitere und von den Annahmen in der ICRP 137 abweichende Dosiskonversionsfaktoren angegeben, die hier jedoch nicht weiter betrachtet werden. Die Tatsache, dass abweichende Dosiskonversionsfaktoren für verschiedene Bedingungen in der Literatur diskutiert werden, deutet auf die Komplexität der Problematik hin.

In Abschnitt 12.7 der ICRP 137 werden Dosiskonversionsfaktoren für die überwiegenden Expositionsbedingungen empfohlen:

- Fall A: Für Arbeitsplätze untertage (Bergwerke) und für Arbeitsplätze in Gebäuden sollte der Dosiskonversionskoeffizient $3 \text{ mSv m}^3/\text{mJ h}$ angewendet werden, eine Berücksichtigung der Aerosoleigenschaften ist nicht erforderlich.
- Fall B: Für Arbeitsplätze in Gebäuden bei erheblichen körperlichen Arbeiten und in Touristenhöhlen sollte der Dosiskonversionskoeffizient $6 \text{ mSv m}^3/\text{mJ h}$ angewendet werden.

Der Umrechnungsfaktor (Dosiskonversionsfaktor) in Anlage 18 Teil B Nr. 3 StrlSchV [1] für die Berechnung der effektiven Dosis durch Inhalation von Radon an Arbeitsplätzen in Innenräumen ist

- 1 mSv bei einer Radon-222-Exposition von $0,32 \text{ MBq/m}^3 \text{ h}$ ($F=0,4$) bzw.
- 1 mSv bei einer PAEC von $0,71 \text{ Millijoule}$ durch Kubikmeter mal Stunde.

Die zuständige Behörde kann in solchen Fällen, in denen der Gleichgewichtsfaktor F von $0,4$ abweicht, auch abweichende Umrechnungsfaktoren festlegen.

Nach Auffassung der Bearbeiter ist eine Klassifikation der Arbeitsplätze nach den in Abschnitten 2.2.1 bis 2.2.3 beschriebenen Kriterien nicht zielführend. Ebenfalls ist die Klassifikation von Arbeitsplätzen mit „normaler“ und erheblicher körperlicher Aktivität nicht ausreichend. Die Expositionsbedingungen an einem Arbeitsplatz werden im Wesentlichen von den Lüftungsbedingungen bestimmt. Diese beeinflussen den Gleichgewichtsfaktor, die Teilchenkonzentration/Oberflächenkonzentration sowie das Verhältnis zwischen dem angelagerten und unangelagerten Anteil. Für weiterführende Arbeiten zur Dosisberechnung sollten deshalb folgende Punkte diskutiert werden:

- Sind die Gleichgewichtsfaktoren für vergleichbare Arbeitsplätze gleich?
 - Sind die Gleichgewichtsfaktoren über den gesamten Messzeitraum/Überwachungszeitraum zumindest näherungsweise konstant?
 - Kann man aus dem Gleichgewichtsfaktor generell auf den unangelagerten Anteil schließen, da dieser wesentlich zur effektiven Dosis beiträgt?
-

- Sind bei der Dosisberechnung auch die Teilchengrößenfraktionen (Nukleations- und Akkumulation-Modus) zu berücksichtigen, da die Teilchengrößenfraktionen unterschiedlich Beiträge zur effektiven Dosis leisten?

Aus der Tabelle A.10. in [2] folgt, dass die Dosiskoeffizienten der unangelagerten RFP um etwa einen Faktor 2 höher sind als die Koeffizienten der angelagerten RFP im nucleation mode und um etwa einen Faktor 6 höher als im accumulation mode. So werden in der Tabelle A.11 in [2] die Koeffizienten für Innenraumarbeitsplätze (charakterisiert durch einen Gleichgewichtsfaktor F von 0,4 und einen Anteil unangelagerte RFP von 0,08) mit 20 mSv/WLM oder $1,2 \cdot 10^{-5}$ mSv/Bq·h·m⁻³ angegeben. Der Beitrag der unangelagerten RFP ist somit offensichtlich eine bestimmende Größe. Der Anteil f_p der unangelagerten Radonfolgeprodukte an der PAEC ist damit ein die effektive Dosis signifikant bestimmender Parameter und muss folglich für die Bewertung eines Arbeitsplatzes ermittelt werden.

Es ist anzumerken, dass in [38] Dosismodelle angezweifelt werden, welche von höheren Dosisbeiträgen unangelagerter RFP im Vergleich zu angelagerten RFP ausgehen, da der Anteil der unangelagerten RFP, die tatsächlich in die relevanten Bereiche des Atemtraktes gelangen, geringer ist als bisher angenommen. Dieser Widerspruch kann im Rahmen des Vorhabens jedoch nicht weiter aufgeklärt werden, so dass die Annahmen aus ICRP 137 verwendet werden.

In den im Vorhaben durchgeführten Messungen wurde gezeigt, dass sowohl f_p als auch F deutlich von den in Tabelle 12.7 gemachten Annahmen (F=0,4, $f_p=0,08$) abweichen und je nach den Bedingungen am Arbeitsplatz auch zeitlich variieren können. Da dieser Anteil die Dosis des Beschäftigten maßgeblich beeinflusst, muss dieser bei der Expositionsermittlung berücksichtigt werden. Es scheint damit unerlässlich, die effektive Dosis für verschiedene Situationen zu berechnen. Auch Khalaf et al. [58] betonen in diesem Zusammenhang, dass die Expositionsbedingungen hinsichtlich der dosisrelevanten RFP in jedem Einzelfall von den konkret am jeweiligen Arbeitsplatz vorliegenden und durch Messungen zu ermittelnden Bedingungen abhängen.

Es stellt sich deshalb bei der Dosisberechnung die Frage, wie aus diesen für einen Raum bzw. Arbeitsplatz typischen zeitabhängigen Verhalten der relevanten Messgrößen ein entsprechender Dosiskoeffizient abzuleiten ist. Eine Orientierung an den Occupational Intakes of Radionuclides (OIR [2]) ist hilfreich, in denen der Einfluss der gemessenen Parameter auf die effektive Dosis diskutiert und auch für ausgewählte Fälle Dosiskoeffizienten abgeleitet werden.

Das Hauptaugenmerk muss nach Auffassung der Bearbeiter auf dem unangelagerten Anteil der Radonzerfallsprodukte liegen.

Eine Möglichkeit zur Dosisberechnung ist die in Tabelle A.12 in [2] angegebene Beziehung zwischen PAEC und der effektiven Dosis, welche als Variable den unangelagerten Anteil f_p enthält.

$$E \text{ [mSv]} = (24 f_p + 3,9 (1-f_p)) \text{ PAEC [mJ h/m}^3\text{]} \quad (10)$$

Sowohl PAEC als auch f_p sind aus den im Vorhaben durchgeführten Messungen bekannt. Damit könnte eine modifizierte Berechnung der effektiven Dosis für die Arbeitsplätze realisiert werden. In der Abbildung 37 ist der sich entsprechend ICRP 37 (Gl. 10) gegenüber der Herangehensweise in Gl. (7) ergebende Korrekturfaktor

$$0,71 [24 f_p + 3,9 (1-f_p)]$$

als Funktion des Gleichgewichtsfaktors F für alle untersuchten Arbeitsplätze dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in der Tendenz der Korrekturfaktor ansteigt, je geringer der Gleichgewichtsfaktor wird, jedoch für $F > 0,3$ im Mittel bei einem Wert von etwa 6 verharrt. Eine direkte Anwendung von Gl. (10) zur Dosisberechnung würde im Vergleich zu der Berechnung nach Gl. (7) (s. Abschnitt 5.1) zu einer im Mittel um einen Faktor 6 höheren Dosis bei vorgegebener mittlerer Radonkonzentration führen. Es ist anzumerken, dass bereits in der aktuellen Diskussion (siehe z.B. [59]) eine Festlegung auf die neuen von der ICRP vorgeschlagenen Dosiskoeffizienten nicht empfohlen wird. Daraus ergäben sich Korrekturfaktoren von ca. 2. Wie realistisch und aussagekräftig eine Vorgehensweise nach Gl. (10) mit einem Korrekturfaktor wäre, kann deshalb aus den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens nicht quantifiziert werden, weshalb auf eine konkrete Dosisberechnung an dieser Stelle verzichtet wird.

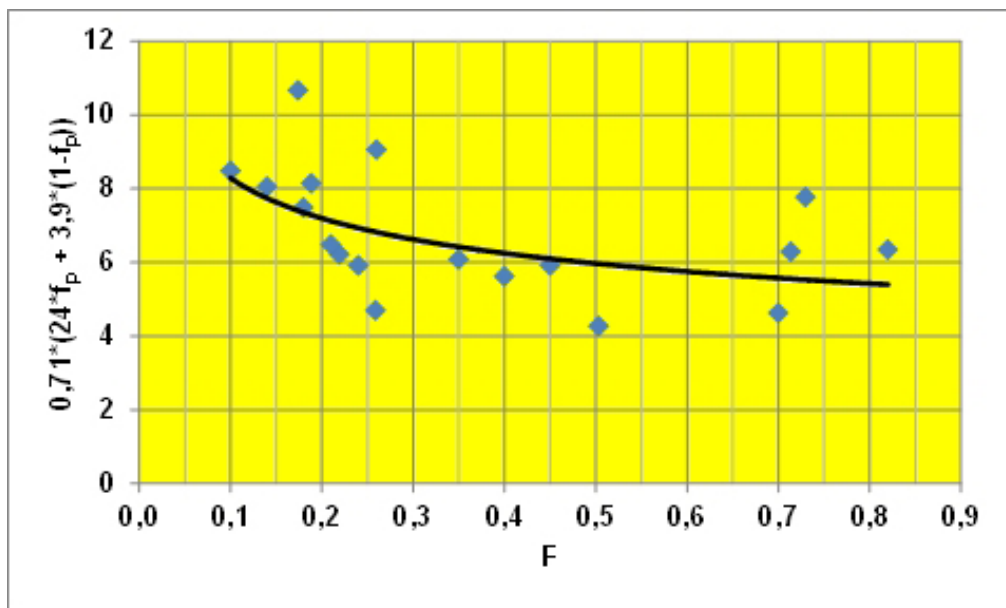


Abbildung 37: Abhängigkeit der in Gl. (10) eingeführten Größe $24 \cdot f_p + 3,9 \cdot (1 - f_p)$ von den an den Arbeitsplätzen bestimmten Gleichgewichtsfaktoren

Bei der Dosisberechnung für konkrete Arbeitsplätze sind zunächst folgende Fragen zu klären:

- Für welche Situationen sollten die Berechnungen durchgeführt werden?
- Für welche Zeiträume können entsprechende Mittelwerte verwendet werden?

Allgemein sind für die Dosisberechnung für Arbeitsplätze nach dieser Herangehensweise Messungen von f_p sowie PAEC bzw. der Radon-Aktivitätskonzentration und des Gleichgewichtsfaktors F durchzuführen. Da eine negative Korrelation zwischen f_p und F besteht (siehe Abbildung 12 und Abschnitt 6.1 für vergleichbare Ergebnisse anderer Autoren), könnte in der Praxis die messtechnische Bestimmung von F neben der Messung der Radon-Aktivitätskonzentration ggf. ausreichen, um die Größenordnung für f_p abzuschätzen. Ob neben dem erkennbaren Zusammenhang zwischen f_p und F eine belastbar quantifizierbare Beziehung herrscht, kann aus den Ergebnissen des Vorhabens nicht abgeleitet werden.

Die vorstehend zusammengestellte Annahmen der ICRP 137 sind unabhängig von den Aerosoleigenschaften; nur der Parameter f_p repräsentiert die Verteilung der Radonfolgeprodukte in einen unangelagerten und einen an Aerosolteilchen angelagerten Anteil. Wenn Aerosoleigenschaften "substanziell verschieden von typischen Bedingungen" sind, und wenn die entsprechenden Ausgangsdaten verfügbar sind, sollten gemäß ICRP 137 die Annahmen in Annex A (Abschnitt A.8.2) der ICRP 137 verwendet werden. In der Praxis ist jedoch eine messtechnische Bestimmung der Aerosoleigenschaften wegen des hohen Aufwandes nur in seltenen Ausnahmen durchführbar und für die Routineüberwachung zu kostenaufwendig.

Die Herangehensweise einer Nutzung der Formel (10) erscheint grundsätzlich eine praktikable Vorgehensweise zu sein, sofern zukünftig allgemein akzeptierte Faktoren für unangelagerte und angelagerte Radonfolgeprodukte vorliegen. Dies ist derzeit nicht der Fall, weshalb die Formel (10) nicht anwendbar ist. Die im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse stützen dies und haben an den ausgewählten Beispielen gezeigt, dass aufgrund der Komplexität der unterschiedlichen Einflussfaktoren zumindest die Messung der angelagerten und freien RFP eine Verbesserung der Dosisabschätzung liefern könnte. Jedoch sollten auch die vereinfachten Berechnungen, basierend auf der alleinigen Bestimmung des Gleichgewichtsfaktors, nicht außer Acht gelassen werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StriSchV) vom 29.11.2018, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2018 Teil I Nr. 41
- [2] Annals of the ICRP 46(3/4), ICRP Publication 137, Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3, Section 12: Radon (2017)
- [3] Leistungsbeschreibung „Ermittlung von charakteristischen Expositionsbedingungen bei Radon an Arbeitsplätzen in Innenräumen (FKZ 3620S12380), 03.09.2020

- [4] Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz- StrlSchG) im Artikel 1 des Gesetzes zur Neuordnung des Rechts zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierende Strahlung vom 27. Juni 2017, BGBl. 2017 Teil I Nr. 42, 03. Juli 2017
- [5] http://www.bfs.de/DE/themen/ion/service/radon-messung/anererkennung/anererkennung_node.html (21.04.2021)
- [6] Vorhaben St.Sch 3607S04534 „Erarbeitung fachlicher Grundlagen für die Entwicklung zeit- und kosteneffektiver Verfahren zur Bestimmung von Strahlenexpositionen durch Radon in Wohnungen“, IAF-Radioökologie GmbH und B.P.S. Engineering GmbH im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz, 15.11.2009
- [7] H. Schulz, E. Hermann, R. Baumert: „Qualifizierung der Luftdichtheitsmessung an Gebäuden zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude“, IAF-Radioökologie GmbH und B.P.S. Engineering GmbH im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz, Juni 2018
- [8] K. Flesch, E. Hermann, S. Jakobi, B. Leißring, W. Löbner, H. Schulz: „Radon in öffentlichen Gebäuden“, erstellt im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Dresden, 01.10.2008
- [9] H. Schulz, A. Sperrhacke: „Radon in öffentlichen Gebäuden“, Strahlenschutzpraxis, Heft 4, 2009
- [10] IAEA Safety reports series No. 33: Radiation protection against radon in workplaces other than mines. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2003.
- [11] Proceedings of the HERCA Workshop “Radon in Workplaces”, Geneva, 12-14 October 2015
- [12] R. Gellermann, K. Nickstadt, C. Ahrens: Ermittlung und Bewertung der Strahlenexposition an Arbeitsplätzen mit natürlich vorkommenden radioaktiven Materialien (NORM), BfS-Vorhaben 3616S12343, September 2017
- [13] J. Kemski, A. Kunte: Ermittlung und Quantifizierung der durch die Umsetzung der EURATOM-Direktive von Pflichten betroffenen Arbeitsplätze - BfS-Vorhaben 3616S12340, Mai 2019
- [14] SWI (Schweiz): Bund will Strahlenschutz verbessern, 15.10.2015, <https://www.swissinfo.ch/ger/alle-news-in-kuerze/bund-will-strahlenschutz-verbessern/41721736>
- [15] K. Wiegand, S. P. Dunne: Radon in the Workplace - A Study of Occupational Exposure in BT Underground Structures. Ann. Occup. Hyg., Vol. 40, No. 5, pp. 569-581, 1996.
- [16] R. D. Daniels, M. K. Schubauer-Berigan: Radon in U.S. workplaces, a review. Radiat. Prot. Dosimetry. 2017 Nov 1; 176(3): 278–286. doi: 10.1093/rpd/ncx007, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5751755/>
- [17] US EPA: Where I work we manufacture products from granite and other natural materials. Should I be concerned about radiation in my workplace <https://www.epa.gov/radon/where-i-work-we-manufacture-products-granite-and-other-natural-materials-should-i-be-concerned>

- [18] Europäische Gesellschaft für gesundes Bauen und Innenraumhygiene: Natürliche Strahlung aus dem Boden und aus Baustoffen, <https://www.eggbi.eu/forschung-und-lehre/zudiesemthema/radonbelastungen-in-gebaeuden/#c338> (11.02.2021)
- [19] G. Kießig, C. Kunze: Water Treatment and Waste Management. In: Geowissenschaften (GeoSciences), Vo. 14, November 1996, p. 481-485
- [20] G. G. Eigenwillig: Berufliche Strahlenexposition durch Radon und dessen Folgeprodukte. Deutsches Ärzteblatt 94, Heft 16, 18. April 1997 (41), A-1057
- [21] A. Maas, W.-R. Uhlig, B. Leißring: Radonsituation in Gebäuden mit Gewölbekeller. 8. Sächsischer Radontag/10. Tagung Radonsicheres Bauen, Dresden, 09.09.2014
- [22] IT Zoom World of Technology. 5 Rechenzentren an merkwürdigen Orten. 04.03.2020, <https://www.it-zoom.de/it-director/e/5-rechenzentren-an-merkwuerdigen-orten-25268/> (11.02.2021)
- [23] C. R. Maestre, V.E. Iribarren: The Radon Gas in Underground Buildings in Clay Soils. The Plaza Balmis Shelter as a Paradigm. Int. J. Environ. Res. Public Health 2018, 10, 1004; doi:10.3390/ijerph10051004.
- [24] Navy Radon Assessment and Mitigation Program Guidebook for Naval Shore Installations. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 6 June 2015.
- [25] Beantwortung von Bieterfragen im Ausschreibungsverfahren durch den Auftraggeber, 20.10.2020
- [26] Bundesagentur für Arbeit: Klassifikation der Berufe 2010 – Band 1: Systematischer und alphabetischer Teil mit Erläuterungen, Nürnberg, März 2011
- [27] Gesetzentwurf der Bundesregierung, Entwurf eines Gesetzes zur Neuordnung des Rechts zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung Deutscher Bundestag Drucksache 18/11241, 18. Wahlperiode 20.02.2017
- [28] http://www.bfs.de/DE/themen/ion/service/radon-messung/anererkennung/anererkennung_node.html
- [29] Vorhaben St.Sch 3607S04534 „Erarbeitung fachlicher Grundlagen für die Entwicklung zeit- und kosteneffektiver Verfahren zur Bestimmung von Strahlenexpositionen durch Radon in Wohnungen“, IAF-Radioökologie GmbH und B.P.S. Engineering GmbH im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz, 15.11.2009
- [30] H. Schulz, E. Hermann, R. Baumert: „Qualifizierung der Luftdichtheitsmessung an Gebäuden zur Prüfung der Radondichtheit neu errichteter Gebäude“, IAF-Radioökologie GmbH und B.P.S. Engineering GmbH im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz, Juni 2018
- [31] K. Flesch, E. Hermann, S. Jakobi, B. Leißring, W. Löbner, H. Schulz: „Radon in öffentlichen Gebäuden“, erstellt im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für

Umwelt und Geologie, Dresden, 01.10.2008

- [32] H. Schulz, A. Sperrhacker: „Radon in öffentlichen Gebäuden“, Strahlenschutzpraxis, Heft 4, 2009
- [33] Wiedensohler, A., Birmili, W., Nowak, A., Sonntag, A., Weinhold, K., Merkel, M., Wehner, B., Tuch, T., Pfeifer, S., Fiebig, M., others, Fjåraa, A. M., Asmi, E., Sellegri, K., Depuy, R., Venzac, H., Villani, P., Laj, P., Aalto, P., Ogren, J. A., Swietlicki, E., Williams, P., Roldin, P., Quincey, P., Hüglin, C., Fierz-Schmidhauser, R., Gysel, M., Weingartner, E., Riccobono, F., Santos, S., Grüning, C., Faloon, K., Beddows, D., Harrison, R., Monahan, C., Jennings, S. G., O'Dowd, C. D., Marinoni, A., Horn, H. G., Keck, L., Jiang, J., Scheckman, J., McMurry, P. H., Deng, Z., Zhao, C. S., Moerman, M., Henzing, B., De Leeuw, G., Löschau, G. and Bastian, S.: Mobility particle size spectrometers: harmonization of technical standards and data structure to facilitate high quality long-term observations of atmospheric particle number size distributions, *Atmos. Meas. Tech.*, 5(3), 657–685, doi:10.5194/amt-5-657-2012, 2012.
- [34] Fuchs, N. A.: On the stationary charge distribution on aerosol particles in a bipolar ionic atmosphere, *Geofis. pura e Appl.*, 56(1), 185–193, 1963.
- [35] Wiedensohler, A.: An approximation of the bipolar charge distribution for particles in the submicron size range, *J. Aerosol Sci.*, 19(3), 387–389, doi:10.1016/0021-8502(88)90278-9, 1988.
- [36] Vaisala Oy, 2018, User Guide Vaisala CARBOCAP (R) Carbon Dioxide Probe GMP252, verfügbar unter <https://www.vaisala.com/de/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/instruments-industrial-measurements/gmp252> bzw. <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/GMP252-User-Guide-in-English-M211897EN.pdf> (03.11.2021)
- [37] SSK Bericht, Radon-Dosiskoeffizienten Empfehlung der Strahlenschutzkommission, Verabschiedet in der 290. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 05./06. Dezember 2017
- [38] L. Gregory: Radon decay products: particle size really matters...or does it?. International Radon Symposium, 2019.
- [39] A. Azara, M. Dettori, P. Castiglia, A. Piana, P. Durando, V. Parodi, G. Salis, L. Saderi, G. Sotgiu: Indoor Radon Exposure in Italian Schools. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018; 15(4):749. doi: 10.3390/ijerph15040749.
- [40] K. Bode, H. Reci, B. Daci, E. Bylyku, I. Bërdufi, E. Kiri: Indoor Radon Concentration related to geological areas at different workplaces of Albania. *RAD Conference Proceedings*, 2018; 3:111-114. doi: 10.21175/RadProc.2018.24.
- [41] V. Gruber, S. Baumann, G. Wurm, W. Ringer, O. Alber: The new Austrian indoor radon survey (ÖNRAP 2, 2013–2019): Design, implementation, results. *J. Environ. Radioact.* 2021 Jul; 233:1-10. doi: 10.1016/j.jenvrad.2021.106618.
- [42] O. Holmgren, T. Turtiainen, K. Kojo, P. Kurttio: Radon at work places - concentrations during working hours vs. long term average. *STUK - Radiation and Nuclear Safety*

-
- Authority, Finland, 2019; 1-10.
- [43] K. Kojo, P. Kurttio: Indoor Radon Measurements in Finnish Daycare Centers and Schools—Enforcement of the Radiation Act. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020; 17(8):2877. doi: 10.3390/ijerph17082877.
- [44] F. Loffredo, F. Savino, R. Amato, A. Irollo, F. Gargiulo, G. Sabatino, M. Serra, M. Quarto: Indoor Radon Concentration and Risk Assessment in 27 Districts of a Public Healthcare Company in Naples, South Italy. *Life*. 2021; 11(3):178. doi: 10.3390/life11030178.
- [45] A. Mirbag, A. Shokati Poursani: Indoor radon measurement in residential / commercial buildings in Isfahan city. *J. Air Pollut. Health*. 2018;3(4):209-218. doi: 10.18502/japh.v3i4.404.
- [46] R. I. Obed, E. A. Oyelade, H. T. Lateef: Indoor radon levels in some selected nursery and primary schools in Ibadan, Oyo State, Nigeria. *J. Radiat. Res. Appl. Sci*. 2018; 11(4):379-382. doi: 10.1016/j.jrras.2018.07.003.
- [47] G. Venoso, A. Iacoponi, G. Pratesi, M. Guazzini, L. Boccini, E. Corbani, S. Bucci, F. Leonardi, R. Trevisi, M. Ampollini, S. Antignani, M. Caprio, C. Carpentieri, C. Di Carlo, F. Bochicchio: Impact of temporal variability of radon concentration in workplaces on the actual radon exposure during working hours. *Sci. Rep*. 2021; 11 doi: 10.1038/s41598-021-96207-9.
- [48] L. Vimercati, F. Fucilli, D. Cavone, L. De Maria, F. Birtolo, G.M. Ferri, L. Soleo, P. Lovreglio: Radon Levels in Indoor Environments of the University Hospital in Bari-Apulia Region Southern Italy. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018; 15(4):694. doi: 10.3390/ijerph15040694.
- [49] H. A. Yalim, A. Gümüş, R. Ünal: Determination of Indoor Radon Concentration and Effective Dose Equivalent at Workplaces of Afyonkarahisar Province. *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science*. 2018; 13(2):29-35. doi: 10.29233/sdufeffd.442298.
- [50] M. Zhukovsky, A. Vasilyev, A. Onishchenko, I. Yarmoshenko, Review of indoor radon concentrations in schools and kindergartens. *Radiat. Prot. Dosim*. 2018 Sep; 181(1):6–10. doi: 10.1093/rpd/ncy092.
- [51] J. Chen, N. H. Harley: A Review of indoor and outdoor radon equilibrium AND OUT-DOOR RADON EQUILIBRIUM FACTORS—PART I: 222Rn. *Health Phys*. 2018 Oct;115(4):490-499. doi: 10.1097/HP.0000000000000909.
- [52] E. A. Asano, F. G. Dolislager, K. L. Manning, D. J. Stewart, K. A. Noto, H. J. Ringer, C. E. Samuels, L. D. Galloway, A. Q. Armstrong, M. B. Bellamy: Air Exchange Rate Impact on Actinon, Thoron, and Radon Activity Equilibrium Factor and Inhalation Fractional Equilibrium Factor Determination in Vapor Intrusion Risk and Dose Models. ORNL/TM-2019/1269 R1, Oak Ridge, 2020
- [53] L. Zhang, W. Zhuo, Q. Guo, L. Guo, B. Shang: An instrument for measuring the unattached fraction of radon progeny with etched track detectors. *J. Radiol. Prot*. 2010; 30(3): 607-612. doi: 10.1088/0952-4746/30/3/014.
- [54] L. M. Zwack, S. E. Brueck, J. L. Anderson, D. R. Hammond: Evaluation of exposure
-

- to radon and radon progeny in an underground tourist cavern and its connected buildings. NIOSH Health Hazard Evaluation Report. 2014-0158-3345, May 2019
- [55] C. di Carlo, R. Remetti, F. Leonardi, R. Trevisi, L. Lepore, R. Ippolito: Indoor Radon Survey in University Buildings: A Case Study of Sapienza – University of Rome. WIT Trans. Ecol. Environ. 2019; 236(27):317-324. doi: 10.2495/AIR190311.
- [56] Wolosciuk K. Wołoszczuk, K. Skubacz: Particle size distribution of the radon progeny and ambient aerosols in the Underground Tourist Route “Liczyrzepa” Mine in Kowary Adit. E3S Web of Conferences 28. 2018; 1-8. doi: 10.1051/e3sconf/20182801040.
- [57] K. Skubacz, K. Wołoszczuk: Size distribution of ambient and radioactive aerosols formed by the shortlived radon progeny. Journal of Sustainable Mining 18 (2019) 61–66, <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.03.006>
- [58] M. Y. A. Mostafa, H. N. B. Khalaf, M. Zhukovsky: Radon decay products equilibrium at different aerosol concentrations. Applied Radiation and Isotopes, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.108981>
- [59] Strahlenschutzkommission: Radon-Dosiskoeffizienten, Empfehlungen der Strahlenschutzkommission, Verabschiedet in der 290. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 05./06. Dezember 2017