



Bundesamt
für Strahlenschutz

Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz

Charakterisierung der Ableitung von radioaktiven
Stoffen aus speziellen Arten von Einrichtungen im
Bereich Medizin und Industrie mit der Fortluft

Vorhaben 3622S52532

Dornier Hinneburg GmbH

Dr. Bettina Grauel

Dr. Nithiya Nirmalanathan-Budau

Dr. Steffen Wildgrube

Lukas Witter

Maryam Afarinandehbin

Mariia Oleshova

Carina Passarge

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

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUKN (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-250/25

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

urn:nbn:de:0221-2025072153458

Salzgitter, Juli 2025



Charakterisierung der Ableitung von radioaktiven Stoffen aus speziellen Arten von Einrichtungen im Bereich Medizin und Industrie mit der Fortluft

Abschlussbericht

Dornier Hinneburg GmbH
Im Bärenbühl 5
77731 Willstätt
www.dornier-group.com

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

Leistung: Bericht

Auftraggeber: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
Ingolstädter Landstraße 1
85764 Oberschleißheim

Auftragnehmer: Dornier Hinneburg GmbH
Im Bärenbühl 5
77731 Willstätt

Projektleiter: Dr. Bettina Grauel

Projektbearbeiter: Dr. Nithiya Nirmalanathan-Budau
Dr. Steffen Wildgrube
Lukas Witter
Maryam Afarinandehbin
Mariia Oleshova
Carina Passarge

Bearbeitungsabschluss: 17.12.2024

erarbeitet:

10.12.2024, Dr. Grauel

geprüft:

13.12.2024, Dr. Nirmalanathan-Budau

freigegeben:

17.12.2024, Dr. Wildgrube

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
Literaturverzeichnis	4
1 Aufgabenstellung	5
2 Kurzzusammenfassung	6
3 AP 1: Benennung der zu untersuchenden Einrichtungen und Festlegung der Nuklidvektoren sowie der erforderlichen Mess- und Auswertetechnik	7
3.1 Auswahl der Einrichtungen	7
3.1.1 Vor-Ort-Termine zur Festlegung der Nuklidvektoren und Messtechniken	7
3.1.2 Nuklidinventare in den Einrichtungen	8
3.1.3 Verwendete Messgeräte und Auswertemethoden	9
4 AP 2: Entwickeln und Testen von Messstrategien sowie Umsetzung der Messstrategien und Durchführung der Messreihen	21
4.1 JUM	21
4.1.1 Verwendete Messtechnik	21
4.1.2 Ergebnisse	22
4.1.3 Diskussion	25
4.2 FOR	26
4.2.1 Verwendete Messtechnik	26
4.2.2 Ergebnisse	27
4.2.3 Diskussion	29
4.3 IPR	29
4.3.1 Verwendete Messtechnik	29
4.3.2 Ergebnisse	31
4.3.3 Diskussion	33
4.4 MED	34
4.4.1 Verwendete Messtechnik	35
4.4.2 Ergebnisse	36
4.4.3 Diskussion	39
5 AP3: Vergleich und Bewertung der Messstrategien	41
5.1 Vergleich der vom Forschungsnehmer erhaltenen Messergebnisse mit betreibereigenen Messungen	41
5.1.1 JUM	41
5.1.2 FOR	46
5.1.3 IPR	48
5.1.4 MED	49
5.2 Unsicherheitsbudgets	51
5.2.1 Allgemein	52
5.2.2 Integrale Messkammer, standortunabhängig	53
5.2.3 Nuklidspezifische Messkammer, standortunabhängig	53
5.2.4 Messkammern standortspezifisch: JUM	53
5.2.5 Messkammern standortspezifisch: IPR	54
5.2.6 Handgehaltene Messtechniken	54
5.3 Charakteristische Grenzen nach DIN ISO 11929	54
5.3.1 Vertrauensniveau	54
5.3.2 Erkennungsgrenze	55
5.3.3 Nachweisgrenze	55
5.3.4 Bewertung der Messungen	55
6 Zusammenfassung und Ausblick	57
6.1 Bewertung der verwendeten Messtechnik	57
6.2 Alternative Messtechnik	58

6.3	Weiterführende Untersuchungen	59
6.4	Zusammenfassung	60
7	Anhang	61
7.1	Liste der Einrichtungen.....	61
7.1.1	Nuklearmedizin.....	61
7.1.2	Isotopenproduktion	64
7.1.3	Großforschung	66
7.2	Bewertungsmatrizes	68
7.3	Kalibrierfaktor	71
7.4	Rohdaten des Schirmzählers SZ2 der integralen Messkammer.....	72
7.5	Weiterführende grafische Auswertungen von Messdaten	73
7.5.1	Weitere nuklidspezifische Daten von JUM.....	73
7.5.2	Weitere nuklidspezifische Daten von IPR	74
7.5.3	Anstieg des Messsignals bei IPR am 14.-15.10.2023	75
7.5.4	Weitere nuklidspezifische Daten von MED	75

Titelbild erstellt mit der webbasierten KI-Anwendung CANVA [1].

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
DORNIER	Dornier Hinneburg GmbH (ehemals Dornier Nuclear Services GmbH)
EKG	Erkennungsgrenze
FOR	Einrichtung der Großforschung
FV Ableitungen	Forschungsvorhaben 3619S52560 „Evaluierung des aktuellen Standes bei der Überwachung der Ableitung von radioaktiven Stoffen mit der Fortluft und dem Abwasser in Medizin und Industrie“
FV Fortluft	Forschungsvorhaben 3622S52532 „Charakterisierung der Ableitung von radioaktiven Stoffen aus speziellen Arten von Einrichtungen im Bereich Medizin und Industrie mit der Fortluft“
HPGe	High Purity Germanium Detector (hochreiner Germaniumdetektor)
IPR	Einrichtung der Isotopenproduktion
JUM	Einrichtung mit Jodumgang
MED	Einrichtung der Nuklearmedizin
NORM	Naturally occurring radioactive materials (natürlich vorkommende Radionuklide)
NWG	Nachweisgrenze
PEX	Positronenexperiment am Beschleuniger des Großforschungsstandorts FOR
RadHAND	RadHAND 600 PRO der Firma Caen SyS

Literaturverzeichnis

- [1] „CANVA,“ [Online]. Available: <https://www.canva.com/>. [Zugriff am 15. 10. 2024].
- [2] Bundesministerium der Justiz, *Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)*, 2018.
- [3] TÜV Nord EnSys GmbH & Co. KG, „Evaluierung des aktuellen Standes bei der Überwachung der Ableitung von radioaktiven Stoffen mit der Fortluft und dem Abwasser in Medizin und Industrie,“ Salzgitter, 2021.
- [4] Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), „Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition,“ [Online]. Available: <https://www.base.bund.de/DE/base/gesetze-regelungen/dosiskoeffizienten/dosiskoeffizienten.html>. [Zugriff am 12 2022].
- [5] „DIN 25457-1:2014-12, Aktivitätsmessverfahren für die Freigabe von radioaktiven Stoffen und kerntechnischen Anlagenteilen - Teil 1: Grundlagen“.
- [6] „DIN ISO 2889:2024-04, Probenentnahme von luftgetragenen radioaktiven Stoffen aus Kanälen und Kaminen kerntechnischer Anlagen (ISO 2889:2023)“.
- [7] „DIN ISO 11929:2021-11, Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Überdeckungsintervalls) bei Messungen ionisierender Strahlung – Grundlagen und Anwendungen - Teil 1: Elementare Anwendungen (ISO 11929:2019)“.
- [8] International Atomic Energy Agency (IAEA), „Isotope Browser for Android,“ 2024.
- [9] H.-G. Vogt und J.-W. Vahlbruch, Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes, 7. überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, 2019, pp. Anhang Tabelle 15.16, S. 556.
- [10] Wikipedia, „Messunsicherheitsbudget - Wikipedia,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Messunsicherheitsbudget>. [Zugriff am 19 09 2024].

1 Aufgabenstellung

Dornier Hinneburg GmbH (DORNIER) bearbeitet für das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) ein Forschungsvorhaben, bei dem es um die radioaktiven Ableitungen der Fortluft von Einrichtungen geht. Mit der Novellierung der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) von 2018 ist die Kleinemittentenregelung weggefallen [2]. Nach § 103 Absatz 1 Satz 1 StrlSchV (2018) hat demnach eine Eigenüberwachung der Ableitungen aus (kerntechnischen) Anlagen und (nicht-kerntechnischen) Einrichtungen zu erfolgen.

Für die Eigenüberwachung der Emissionen von Einrichtungen fehlt bislang im Gegensatz zu den Anlagen ein bundesweit einheitliches Vorgehen, ebenso ein entsprechendes Kontrollmessprogramm. Das Forschungsvorhaben 3622S52532 „Charakterisierung der Ableitung von radioaktiven Stoffen aus speziellen Arten von Einrichtungen im Bereich Medizin und Industrie mit der Fortluft“ (FV Fortluft), das in diesem Bericht beschrieben wird, soll die Basis dafür schaffen. Dabei wird auf die Ergebnisse des vorangegangenen Forschungsvorhabens 3619S52560 „Evaluierung des aktuellen Standes bei der Überwachung der Ableitung von radioaktiven Stoffen mit der Fortluft und dem Abwasser in Medizin und Industrie“ (FV Ableitungen), das vom TÜV Nord EnSys GmbH & Co. KG bearbeitet wurde [3], aufgebaut.

Das FV Fortluft soll für drei ausgewählte Einrichtungen aus den Bereichen Nuklearmedizin, Isotopenproduktion und Großforschung über mindestens sechs Monate eine Fortluftüberwachung durchführen. Dabei sind die zu überwachenden Radionuklide zu identifizieren, Messverfahren zu etablieren, und die Ableitungen sowohl kurz- als auch langlebiger Radionuklide zu quantifizieren. Das Ziel ist das Einfließen der Ergebnisse in die Ausarbeitung einer bundeseinheitlichen Leitlinie für die Emissionsüberwachung von Einrichtungen sowie für ein auf Einrichtungen angepasstes Kontrollmessprogramm für die Kontrolle der Eigenüberwachung.

Das FV Fortluft ist in drei Arbeitspakete (AP) aufgeteilt und wurde zwischen 01.11.2022 und 31.10.2024 von DORNIER bearbeitet. Das AP1 „Benennung der zu untersuchenden Einrichtungen und Festlegung der Nuklidvektoren sowie der erforderlichen Mess- und Auswertetechnik“ wurde am 01.11.2022 begonnen. Der Vor-Ort-Termin beim Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) zur Abstimmung des Vorgehens erfolgte am 07.12.2022 in Neuherberg. Am 31.05.2023 wurde das AP1 mit einem Online-Abschlussworkshop abgeschlossen. Parallel wurden bereits mit der Bearbeitung des AP2 „Entwickeln und Testen von Messstrategien sowie Umsetzung der Messstrategien und Durchführung der Messreihen“ gestartet. AP2 wurde am 15.05.2024 mit einem Vor-Ort-Termin beim BfS in Neuherberg abgeschlossen. Das AP3 „Vergleich und Bewertung der Messstrategien und Erstellen des Abschlussberichts“ wurde im Anschluss bearbeitet, die Ergebnisse wurden am 17.10.2024 in einem Online-Workshop vorgestellt. Der Abschlussbericht zum FV Fortluft wurde dem BfS am 30.10.2024 in der Entwurfsfassung vorgelegt. Das Vorhaben wurde am 25.11.2024 mit einem Projektabschlussworkshop vollständig beendet.

2 Kurzzusammenfassung

DORNIER führte in insgesamt vier deutschen Einrichtungen Messungen an der Fortluft durch. Die Ergebnisse werden in diesem Bericht anonymisiert dargestellt. JUM bezeichnet eine Einrichtung mit Jodumgang, FOR eine Einrichtung aus der Großforschung, IPR eine Einrichtung der Isotopenproduktion und MED eine Einrichtung der Nuklearmedizin.

Bei JUM wurde mit integraler und nuklidspezifischer Bypass-Messtechnik gemessen, die Nuklide I-123 und I-125 konnten identifiziert werden. In den meistens Fällen konnten die Abgabezeiträume, die vom Betreiber genannt worden waren, anhand der Messdaten nachvollzogen werden.

Bei FOR wurde am Kamin des supraleitenden Beschleunigers gemessen. Dort wurde nur die integrale Messkammer eingesetzt, da vorrangig Positronenstrahler in der Fortluft erwartet wurden, die sich gammaspektrometrisch nicht unterscheiden lassen. Die Strahlzeit des Positronenexperiments (PEX) konnte klar in den Messdaten identifiziert werden.

Bei IPR konnten die Abgaben mit der integralen sowie der nuklidspezifischen Messkammer überwiegend sehr gut zugeordnet werden. Im betrachteten Zeitraum wurde hier lediglich Ga-68 gehandhabt. Die Abgaben waren klar erkennbar. In den Messdaten der integralen Messkammer kam es zu wenigen, schwierig zu identifizierenden Impulsen.

Als vierte Einrichtung wurden in MED Fortluftmessungen durchgeführt. Aus baulichen Gründen konnten hier keine Messkammern eingesetzt und auch keine Proben entnommen werden. Stattdessen wurden handgehaltene Gammaskpektrometer eingesetzt, mit denen neben K40 die Nuklide I-131, Lu-177 und Ra-223 nachgewiesen werden konnten. Die relativen Fehler sind oft größer als 50 %, aber als Proof-of-Concept konnten diese Messungen als Erfolg gewertet werden.

Die Qualität der gewonnenen Daten war stark vom jeweiligen Standort abhängig. Untergrundstrahlung, Höhe der Aktivitäten und Energien der Emissionen spielten dabei eine große Rolle. Die Messergebnisse wurden mit betreibereigenen Messungen verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass die Ergebnisse qualitativ gut übereinstimmen. Die von DORNIER eingesetzten Messgeräte sind als Allrounder zu betrachten, während die Messtechniken der Einrichtungen auf die jeweiligen Abgaben spezialisiert sind und deshalb unter Umständen bessere Ergebnisse liefern können.

Der Fokus des Forschungsvorhabens lag auf einer allgemeinen Bewertung der Messtechnik und der Einschätzung, ob sie für die Kontrolle der Eigenüberwachung in möglichst vielen Einrichtungen eingesetzt werden kann. DORNIER zeigt die Grenzen der Messtechnik auf und führt Vorschläge für alternative Messtechniken an. Die Unsicherheitsbudgets der verwendeten Messtechnik werden ausgeführt.

Nach Ansicht von DORNIER sind flächendeckende Kontrollmessungen mit allgemein gehaltenen Messgeräten problematisch, da aufgrund der sehr unterschiedlichen Radionuklide sowie der individuellen baulichen Gegebenheiten die zu verwendende Messtechnik an die jeweilige Einrichtung angepasst werden muss. Dafür sind unterschiedliche Messgeräte nötig, die mobil und dabei möglichst flexibel sind bezüglich der Radionuklide, die gemessen werden sollen, da das Messprinzip das entsprechende Radionuklid erfassen können soll. Der genaue Umfang an notwendigen Messgeräten muss noch bestimmt werden.

3 AP 1: Benennung der zu untersuchenden Einrichtungen und Festlegung der Nuklidvektoren sowie der erforderlichen Mess- und Auswertetechnik

In AP1 sollten drei nicht-kerntechnischen Einrichtungen aus den Bereichen Nuklearmedizin, Isotopenproduktion und Großforschung ausgewählt werden, an deren Fortluft eine Datenerfassung in AP2 und -auswertung in AP3 erfolgen kann. Dafür wurden in AP1 aus insgesamt 79 Einrichtungen, von denen 47 medizinische Einrichtungen, 29 Forschungseinrichtungen und 27 Einrichtungen der Isotopenproduktion waren, mithilfe einer Bewertungsmatrix acht Einrichtungen ausgewählt und kontaktiert. Am Ende des Auswahlprozesses wurden vier Einrichtungen für die Datenerfassung ausgewählt, die in diesem Bericht als JUM (Einrichtung mit Jodumgang), FOR (Einrichtung aus der Großforschung), IPR (Einrichtung der Isotopenproduktion) und MED (Einrichtung der Nuklearmedizin) bezeichnet werden.

3.1 Auswahl der Einrichtungen

In AP 1 wurde anhand einer Internetrecherche im Dezember 2022 insgesamt 79 Einrichtungen identifiziert. Die Einrichtungen wurden dabei nach den Einrichtungstyp Medizin, Großforschung und Isotopenproduktion eingeteilt, wobei manche Einrichtungen in mehrere dieser Kategorien fielen – beispielsweise sind einige Universitätskliniken ebenfalls Isotopenproduzenten. Zusätzlich wurde von den Internetpräsenzen der Einrichtungen die dort gehandhabten Radionuklide entnommen und deren Dosiskoeffizienten bestimmt [4]. Die Anzahl der Einrichtung pro Einrichtungstyp und die Bandbreite an Nukliden ist in Tabelle 1 dargestellt. Die genauen Listen sind im Anhang in Kapitel 8.1 einzusehen.

Tabelle 1: Übersicht über die Datenlage aus der Internetrecherche zur Identifikation in Frage kommender Einrichtungen. Bei den mit (*) gekennzeichneten Angaben zu Radionukliden in Großforschungseinrichtungen handelt es sich um indirekte Angaben, z. B. aus aktuellen Veröffentlichungen.

Kennzahl	Medizin	Isotopenproduktion	Großforschung
Anzahl Einrichtungen	47	27	29
Angabe zu Nukliden	38	23	21*
Bandbreite Nuklide	1 bis 10	2 bis 19	1 bis 11
Verbindung zu anderen Einrichtungstypen	22	27	17

Anhand von einrichtungstyp-spezifischen Bewertungsmatrizes wurden Punkte vergeben, beispielsweise für Anzahl der verschiedenen Radionuklide oder Vielfalt der Diagnose- und Therapiearten (bei Nuklearmedizin). Die Bewertungsmatrizes sind im Anhang in Kapitel 8.2 dargestellt. Jedes Kriterium wurde mit einer Gewichtung versehen und die gewichtete Summe aller Punkte wurde für jede Einrichtung gebildet. Aus den 79 Einrichtungen wurden pro Einrichtungstyp die am höchsten platzierten drei für eine Kontaktierung ausgewählt, wobei manche Einrichtungen mehrfach platziert waren (beispielsweise sowohl bei „Nuklearmedizin“ als auch bei „Großforschung“). Die ausgewählten Einrichtungen befinden sich in verschiedenen Bundesländern. Die zuständigen Landesbehörden wurden im Februar 2023 vom BfS über die bevorstehende Kontaktierung der Einrichtungen durch die DORNIER in Kenntnis gesetzt. Anschließend wurden einige Einrichtungen im Februar 2023 von DORNIER angeschrieben und eine Zusammenarbeit angefragt. Die Einrichtungen eines Bundeslands wurden auf Wunsch der zuständigen Behörde von diesen selbst kontaktiert. Von den angefragten Einrichtungen haben sich JUM, FOR, MED und IPR für weitere Vorgespräche zur Teilnahme am Forschungsvorhaben bereiterklärt.

3.1.1 Vor-Ort-Termine zur Festlegung der Nuklidvektoren und Messtechniken

Am 08.03.2023 fand der Vor-Ort-Termin bei JUM statt. Dabei wurde festgestellt, dass alle von JUM vertriebenen Radionuklide extern produziert werden und JUM lediglich eine Weiterverarbeitung zu den

Radiopharmaka vornimmt. JUM ist als Produzent von Radiopharmaka für das FV Fortluft aufgrund der Jodisotope sehr interessant. Die Überwachung der Fortluft von JUM erfolgt kontinuierlich mittels eines Jodmonitors der Firma Berthold Technologies (BAI 9103-4).

Am 31.03.2023 fand ein Online-Treffen zwischen FOR und der DORNIER statt. FOR verfügt über mehrere Fortluftkamine, die jeweils unterschiedliche Radionuklide ableiten. Aufgrund der für das FV Fortluft äußerst interessanten gasförmigen, kurzlebigen Nuklide, die bei Beschleunigern durch Aktivierung der Luft entstehen, wird der FOR-Kamin, der die Fortluft des Beschleunigers ableitet, für das FV Fortluft bevorzugt. Die betriebeigene Überwachung des FOR-Kamins erfolgt mittels eines Beta-Gasmonitors der Firma Berthold Technologies (BAI 9109-4), der in 4π -Geometrie mit 2 mm Blei abgeschirmt ist.

Am 10.05.2023 fand ein Online-Treffen mit IPR statt. An dem Standort, der für das FV Fortluft am interessantesten ist, befinden sich mehrere Kamine, von denen einige zur Ableitung einzelner Radionuklide genutzt werden. In den zwei Kamine der Entwicklungslabore, in dem Radionuklide mit Halbwertszeiten kleiner als 10 Tagen gehandhabt werden, sind mehrere Radionuklide möglich. Da es sich hierbei um gängige Radionuklide aus der Nuklearmedizin handelt, ist dieser Kamin für das FV Fortluft am interessantesten. Die Eigenüberwachung der Fortluft des Entwicklungslabors wird zweimal im Jahr mittels Gammasspektrometrie von Filterproben durchgeführt. Am 22.08.2023 fand der Vor-Ort Termin bei IPR statt. Hierbei wurde der Zugang des Fortluftkanals der Entwicklungslabore besichtigt.

Am 17.04.2023 fand ein Vor-Ort-Treffen bei MED statt. Die Kamine der Jodstation und des Heißlabors wurden gesichtet. Der Kamin der Jodstation ist mit einer Aktivkohlefilteranlage versehen. Es findet ähnlich wie bei IPR eine diskontinuierliche Überwachung statt, bei der die Effizienz der Filteranlage verifiziert wird, d. h. Probenentnahme vor und nach dem Filter und anschließende gammasspektrometrische Auswertung. Die Abgabemenge wird nicht ermittelt. Der zweite Kamin befindet sich hinter dem Abluftfilter des Heißlabors, in dem Radiopharmaka präpariert werden. Hier findet keine Messung der Fortluft statt, es befindet sich auch keine Probenentnahmemöglichkeit am Kamin. Die MED-Kamine sind sehr schwer zugänglich, da hier Leitern, niedrige Korridore und mehrere Stufen überwunden werden müssen.

3.1.2 Nuklidinventare in den Einrichtungen

Im Gegensatz zu kerntechnischen Anlagen gibt es bei Einrichtungen oft keine (nahezu) gleichbleibenden Nuklidvektoren, da die Anteile der Radionuklide in der Fortluft vom Betriebszustand und den Tätigkeiten in der Einrichtung abhängig sind. Ein Nuklidvektor impliziert eine Abhängigkeit zwischen Radionukliden und den Leitnukliden, die über Hochrechnungsfaktoren ausgedrückt werden können. Eine solche Abhängigkeit besteht bei Einrichtungen nicht, da die Abgaben handhabungsabhängig sind. Deshalb sollte bei einer Einrichtung nicht von Nuklidvektor, sondern vom Nuklidinventar gesprochen werden. Die Nuklidinventare der ausgewählten Einrichtungen wurden vor der Auswahl der geeigneten Messtechnik näher betrachtet.

Bei JUM findet ein Umgang mit I-123 statt. Neben diesem Radionuklid entstehen im Herstellungsprozess weitere Radionuklide, z. B. auch I-125. Diese Radionuklide können ebenfalls in der Fortluft vorkommen.

Beim FOR-Kamin werden auf Grund der unterschiedlichen Forschungsthemen verschiedene Radionuklide in der Fortluft erwartet. Eine Aktivierung der Luft findet durch den Beschleuniger von FOR statt, sodass Radionuklide der aktivierten Luft in der Fortluft im FOR-Kamin erwartet werden.

Über den Kamin des Entwicklungslabors von IPR können die Nuklide Ga-68, Y-90, In-111, Lu-177 und Ac-225 emittiert werden. Bis auf Ac-225 zerfallen alle Kerne in stabile Tochternuklide. Y-90 ist ein reiner Betastrahler, die anderen Radionuklide verfügen über Gammalinien. In-111 hat als einziges der Radionuklide keine Beta-Emission.

Auf der Jodstation von MED wird Radioiodtherapie durchgeführt. Vor Ort wird mit I-131, Lu-177 und Ac-225 umgegangen, wobei nur das I-131 aufgrund seiner Eigenschaften und seines Umgangs in die Luft gelangt und damit in der Fortluft erwartet wird. In der Fortluft des Heißlabors, in dem Radiopharmaka präpariert werden, könnten sich Radionuklide wie I-131, I-123, Tc-99m und Er-169 befinden.

Eine Zusammenfassung der Radionuklidinventar der einzelnen Einrichtungen ist in der Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht über die von den Einrichtungen abgeleiteten Radionuklide, deren Zerfallseigenschaften und die Messmethoden zur Eigenüberwachung.

Name der Einrichtung	Radionuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart	Eigenüberwachung
FOR (Beschleuniger)	C-11	20 min	ec β^+	Gasmonitor
	C-14	5730 a	β^-	C-14-Sammler
	N-13	10 min	ec β^+	
	O-14	70 s	ec β^+	
	O-15	2 min	ec β^+	
	Ar-41	109 min	β^-	
JUM	I-123	13,2 h	ec β^+	Jod-Monitor
	I-125	59,4 d	ec β^+	
IPR (Entwicklungslabor)	Ga-68	1,1 h	ec β^+	Gammaskpektrometrie an Filterproben (zweimal im Jahr)
	Y-90	2,7 d	β^-	
	Tc-99m	6 h	β^-	
	In-111	2,8 d	ec	
	Lu-177	6,6 d	β^-	
	Ac-225	9,9 d	α	
MED (Jodstation)	Y-90	2,7 d	β^-	Gammaskpektrometrie der halbj. Probenentnahme (ohne Rechnen) vor und hinter Aktivkohlefilter
	I-131	8 d	β^-	
	Lu-177	6,6 d	β^-	
	Ac-225	9,9 d	α	
MED (Heißlabor)	Y-90	2,7 d	β^-	Keine
	Tc-99m	6 h	β^-	
	I-123	13,2 h	ec β^+	
	I-131	8 d	β^-	
	Er-169	9,4 d	β^-	
	Re-186	3,7 d	β^- , ec	
	Ra-223	11,4 d	α	

3.1.3 Verwendete Messgeräte und Auswertemethoden

Aufgrund der kurzen Halbwertszeiten der zu detektierenden Radionuklide, die sich nach Tabelle 2 im Größenordnungsbereich von Stunden bis Tagen befinden, ist eine Sammlung über einen Filter mit zeitlich nachgelagerter Probenentnahme und anschließender Laboranalyse ungeeignet. Stattdessen wird für die Überwachung auf ein Monitoringsystem mit einer kontinuierlichen Messung zurückgegriffen, auch kurzzeitige, ggf. hohe Aktivitätsabgaben zeitlich zuordnen zu können. Für die Überwachung der Fortluft wurden DORNIER vom BfS eine integrale Messkammer (siehe Kapitel 4.1.3.1) sowie eine nuklidspezifische Messkammer (siehe Kapitel 4.1.3.2) zur Verfügung gestellt. Für die Messungen bei MED erhielt DORNIER vom BfS außerdem ein Handgerät zur spektrometrischen Messung von Gammastrahlung (siehe Kapitel 4.1.3.3). Zusätzlich lieh die Firma CaenSys DORNIER ein zweites Handgerät zur nuklidspezifischen Messung aus (siehe Kapitel 4.1.3.4).

Das BfS verwendet zur Kontrolle der Eigenüberwachung in Kernkraftwerken Messkammern, bei denen ein Teil des Fortluftstroms analysiert wird. Dabei liegt der Fokus auf der radiologischen Bestimmung von Edelgasen. Diese Messsysteme sollten im Kontext der Überwachung von Einrichtungen erprobt werden. Beide Systeme analysieren den gleichen Fortluftstrom, da sie in Reihe angeschlossen werden können. Dabei werden zwei verschiedene, sich ergänzende Messmethoden – integrale Messung von Beta- und Gammastrahlung mittels Proportionalzählrohren sowie nuklidspezifische Messung von Gammastrahlung mittels Gammaskpektrometrie – angewendet.

Da der Einsatz der Messkammern bei den MED-Kaminen aufgrund von baulichen Gegebenheiten nicht möglich war, suchte DORNIER nach alternativen Messmethoden. So bietet es sich an, die gammastrahlenden Radionuklide mit handgehaltenen, spektrometrischen Messgeräten zu messen, ohne

dass Fortluft entnommen wird. Alpha- bzw. betastrahlende Radionuklide ohne Gammalinie können aufgrund der Abschirmung durch das Material des Fortluftkamins jedoch nicht nachgewiesen werden.

3.1.3.1 Integrale Messkammer

Die integrale Messkammer des BfS ist eine Messkammer mit mehreren Großflächenproportionalzählern (siehe Abbildung 1) für direkte Messungen des Fortluftstroms.

Funktionsweise

Die Funktionsweise des Messverfahrens basiert auf elektrischen Impulsen, die im Zählgas eines Proportionalzählers durch ionisierende Strahlung erzeugt und elektronisch erfasst werden. Betastrahlung ist auf diese Weise sehr gut nachweisbar, während Gammastrahlung aufgrund der geringeren Wechselwirkungswahrscheinlichkeit nur eingeschränkt, Alphastrahlung aufgrund seiner sehr kurzen Reichweite und der hohen Wechselwirkung mit der Außenseite des Zählrohres ebenfalls nur schlechte nachweisbar ist. Neben der Messung der Probe (in diesem Fall: durchströmende Luft mit an Schwebstoffen gebundenen Radionukliden oder radioaktiven Gasen) werden auch Untergrundmessungen vorgenommen, um die Messeffekte von Umwelteinflüssen sicher trennen zu können. Da verschiedene Radionuklide in unterschiedlichen Energiebereichen emittieren und das Zählrohr ein energieabhängiges Ansprechvermögen aufweist, wird für die Umrechnung der Impulsraten in Aktivitätskonzentrationen ein nuklid- bzw. energieabhängiger Kalibrierfaktor benötigt.

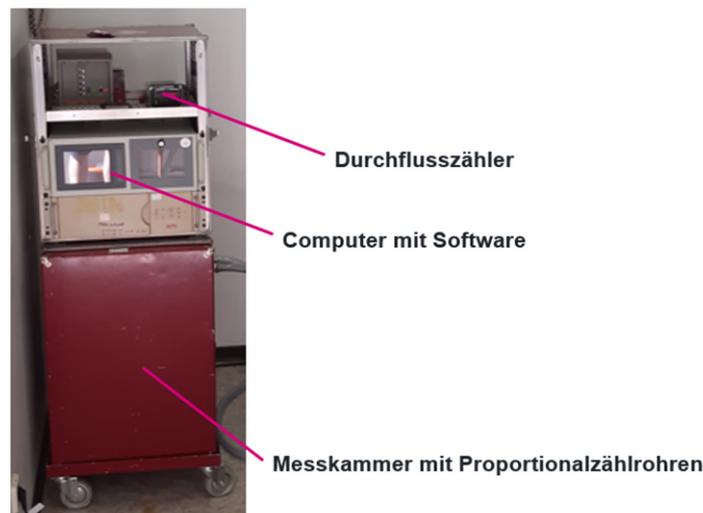


Abbildung 1: Integrales Messgerät (Messkammer mit Großflächenproportionalzählrohren).

In die integrale Messkammer des BfS sind insgesamt fünf Proportionalzählrohre verbaut, wovon drei eine Detektoroberfläche von 1000 cm² haben und zwei eine Detektoroberfläche von 500 cm². Zwei der fünf Proportionalzählrohre befinden sich in einer Aluminium-Messkammer mit einem Fassungsvermögen von 42 l (bzw. 0,042 m³). Diese Zählrohre sind bei der Messung der Gase nicht zusätzlich abgeschirmt. Die Fortluft passiert die Messkammer; dabei können die Gasmoleküle des Zählgases im Zählrohr durch die einfallende Strahlung ionisiert werden und es entstehen freie Elektronen. Durch das im Zählrohr vorherrschende elektrische Feld werden die Elektronen vom Zählendraht angezogen und lösen dort einen messbaren Stromimpuls aus.

Die anderen drei Zählrohre sind außerhalb der Messkammer positioniert, sodass sie lediglich die Umgebungsstrahlung messen. Das bezieht sowohl natürlich vorkommende Radionuklide (Naturally occurring radioactive materials, kurz: NORM), z. B. K-40 in der Bausubstanz der Gebäude, als auch künstliche Radionuklide einrichtungsfernen Ursprungs – z. B. Cs-137+ aus Kernwaffentests und Nuklearunfällen – mit ein.

Das System erlaubt einen Durchfluss durch die Aluminium-Messkammer von 1 m³/h bis maximal 5 m³/h. Eine vom BfS entwickelte Software erfasst Impulsraten, die nach einem Zeitraum von zehn Minuten

gemittelt werden. Alle zehn Minuten wird das Datum, die Uhrzeit und die gemittelte Zählrate der einzelnen Zählrohre sowie den jeweiligen Stundenmittelwert abgespeichert.

Auswertung

Die Rohdaten (Zehnminuten- und Stundenmittelwerte) des integralen Messsystems enthalten neben dem Datum und der Uhrzeit die Bruttoimpulsraten der fünf Zählrohre:

- Zähler 1 und 2 (Z1 und Z2), innerhalb der Messkammer für die ionisierende Strahlung der Fortluft
- Schirmzähler 1 bis 3 (SZ1 bis SZ3), außerhalb der Messkammer für die Untergrundstrahlung

Die Angabe der Zählraten erfolgt in Impulsen pro Sekunde und ist noch keiner Aktivität eines Radionuklids zugeordnet. Werden Radionuklide über die Fortluft abgegeben, wird deren Strahlung von Z1 und Z2 erfasst, sodass diese eine höhere Impulsrate als die SZ1 bis SZ3 messen sollten. Die Effizienz der Zählrohre ist von mehreren Faktoren abhängig, diese sind z. B. die Dicke der Folie des Zählrohres oder die Größe der Messkammer. Hinzu kommt, dass die Effizienzen auf Grund der unterschiedlichen Energie der Strahlungsteilchen und der möglicherweise unterschiedlichen Verweildauern je Radionuklid verschieden sind.

Bevor die Fortluft an die Messkammer angeschlossen und eingeleitet wird, werden Messungen des Untergrundes aufgenommen. Dabei wird eine Messung an der Umgebungsluft durchgeführt, sodass die Untergrundzählraten der Zählrohre erfasst werden.

Die Untergrundmessung wurde bei JUM über eine Stunde, bei FOR über eine Stunde bzw. drei Tage sowie bei IPR über einen halben Monat aufgezeichnet. Aus der Untergrundmessung wird ein Mittelwert für jedes Zählrohr gebildet und von der Bruttoimpulsrate zum Zeitpunkt t subtrahiert, um die Nettoimpulsraten zu errechnen. Dabei wird als Schirmzähler das Zählrohr verwendet, das die gleiche Detektoroberfläche wie die beiden Zählrohre in der Messkammer vorweist. Die beiden kleineren Schirmzähler können verwendet werden, um schnelle Änderungen des Untergrunds zu verfolgen.

$$R_n^{Z1}(t) = R_b^{Z1}(t) - R_0^{Z1} \quad \text{Gleichung 1}$$

$$R_n^{Z2}(t) = R_b^{Z2}(t) - R_0^{Z2} \quad \text{Gleichung 2}$$

$$R_n^{SZ2}(t) = R_b^{SZ2}(t) - R_0^{SZ2} \quad \text{Gleichung 3}$$

Dabei bezeichnet $R_n^i(t)$ die Nettoimpulsrate des i -ten Zählrohrs zum Zeitpunkt t , $R_b^i(t)$ die Bruttoimpulsrate des i -ten Zählrohrs zum Zeitpunkt t sowie R_0^i den Mittelwert der Untergrundmessung des i -ten Zählrohrs ($i = Z1, Z2, SZ2$).

Anschließend wird die Summe der beiden Bruttoimpulsraten von Z1 und Z2 gebildet und davon das Doppelte der Nettoimpulsrate des Schirmzählers SZ2 subtrahiert, um die bereinigten Impulse der Fortluft $\bar{R}_n(t)$ zu erhalten.

$$\bar{R}_n(t) = R_n^{Z1}(t) + R_n^{Z2}(t) - 2 \cdot R_n^{SZ2}(t) \quad \text{Gleichung 4}$$

Abschließend wird die bereinigte Impulsrate der Fortluft $\bar{R}_n(t)$ mit dem Kalibrierfaktor w_j des jeweiligen Radionuklids j multipliziert. Der Kalibrierfaktor berücksichtigt die zählrohrseitige sowie die nuklidspezifische Effizienz. Daraus resultiert die Aktivitätskonzentration A_j in Bq/m³. Auf die Bestimmung des Kalibrierfaktors wird im nachfolgenden Absatz näher eingegangen.

$$A_j(t) = \bar{R}_n(t) \cdot w_j \quad \text{Gleichung 5}$$

Durch die Auftragung der Aktivitätskonzentration gegen die Zeit wird ein Diagramm erhalten, das die zeitabhängige Konzentration der Aktivität in der Fortluft darstellt. Für die Bewertung der Messergebnisse in Kapitel 5 werden zunächst die bereinigten Impulse der Fortluft (Gleichung 4) herangezogen. Für den Vergleich mit betriebeigenen Messungen in Kapitel 6 werden Aktivitätskonzentrationen bestimmt (Gleichung 5), für die ein nuklidabhängiger Kalibrierfaktor verwendet wird.

Bestimmung des Kalibrierfaktors

Bei Kalibriermessungen werden üblicherweise Radionuklide unterschiedlicher Betaenergien, die einen Energiebereich von 50 keV bis 1000 keV abdecken, eingesetzt, um die geforderten Aktivitäten sicher bestimmen zu können. Da gasförmige Radionuklide, die diese Energien abbilden, nur in geringem Maße verfügbar sind, ist eine näherungsweise Kalibrierung durch Verwendung von Kalibrierquellen mit gleicher Geometrie, beispielsweise Linien- oder Flächenstrahlern, die in die Messkammer eingeführt und in eine

konservative Position zum Detektor gebracht werden, möglich. Hier kommen als gasförmige Radionuklide Xe-133, Cl-36 und Kr-85 in Frage, wobei die Betaenergien von Kr-85 und Cl-36 fast identisch sind. Die mittlere Betaenergie von Xe-133 (100,6 keV) ist außerdem der von Co-60 (95,8 keV) sehr nah, sodass hier möglicherweise eine Korrelation der unterschiedlichen Geometrien erfolgen kann, wenn für den weiteren Energiebereich feste Proben als Kalibrierpräparate verwendet werden. Hier kommen neben Co-60 beispielsweise Ni-63, C-14, Hg-203, Pm-147, Tc-99, Cs-137, Tl-204, Au-198 und Y-90 in Frage.

Zum Zeitpunkt der Messungen bei den Einrichtungen war die Messkammer durchgehend in Betrieb, sodass zunächst keine zusätzlichen Kalibrierfaktoren bestimmt werden konnten. Es lag lediglich aus früheren Arbeiten ein Kalibrierfaktor für Xe-133 vor. Die mittlere Betaenergie der Emission von Xe-133 liegt bei 100,6 keV, d. h. für Emissionen mit einer ähnlichen Betaenergie, z. B. Er-169 mit 99,8 keV, kann dieser Kalibrierfaktor verwendet werden. Für andere Emittenten, beispielsweise Y-90 mit einer mittleren Betaenergie von 932,4 keV, oder C-14 mit einer mittleren Betaenergie von 49,5 keV, ist dieser Kalibrierfaktor aber möglicherweise unzutreffend.

Die Erstellung einer messtechnisch bestimmten Kalibrierkurve war geplant, konnte jedoch im Rahmen des FV Fortluft nicht mehr umgesetzt werden. Deshalb wird für die im Rahmen des FV Fortluft vorgenommenen Messungen eine rechnerische Methode gewählt, um den Kalibrierfaktor abzuschätzen. Hierfür werden die Kalibrierfaktoren, die in der DIN 25457-1 (Tabelle A.1) [5] angegeben werden, nichtlinear (sigmoidal) angepasst und so skaliert, dass die Fitfunktion den bekannten Kalibrierwert für Xe-133 enthält. In Tabelle 3 sind die unskalierten Kalibrierfaktoren aus der DIN 25457-1 angegeben.

Tabelle 3: Flächenbezogene Ansprechvermögen eines vergleichbaren Detektors für verschiedene Radionuklide [5].

Radionuklid	Mittlere Betaenergie [keV]	flächenbezogenes Ansprechvermögen in $\text{cm}^2/(\text{s}\cdot\text{Bq})$ in Xenon [5]
Ni-63	17,425	0,05
C-14	49,47	5
Pm-147	61,78	8
Co-60	95,77	17
Cs-137	174,32	25
Tl-204	244,05	23
Sr-90/Y-90	564,05	29

Die Daten sind gemeinsam mit der angepassten Kurve in Abbildung 2 dargestellt.

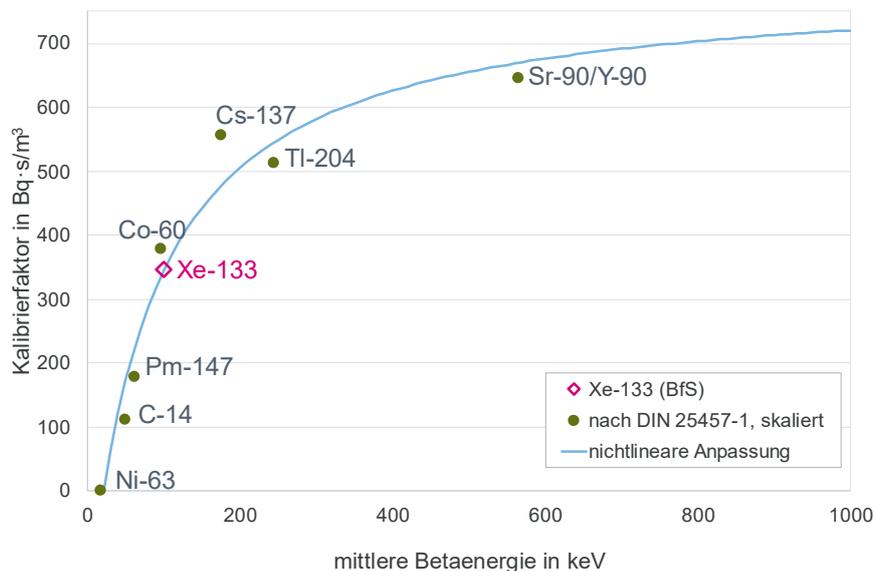


Abbildung 2: Nichtlineare Anpassung der skalierten Daten für den Kalibrierfaktor aus der DIN 25457-1, Tabelle A.1 [5].

Für die nichtlineare Anpassung der sigmoidal verlaufenden Kalibrierkurve wurde die Form

$$w(E) = \frac{a \cdot E}{b + c \cdot E} - d \quad \text{Gleichung 6}$$

gewählt. Dabei bezeichnet E die mittlere Betaenergie und $w(E)$ den Kalibrierfaktor bei der Energie E . Für die nichtlineare Anpassung wurde die Software Octave (Version 6.4.0) verwendet, ein numerisches Rechenprogramm ähnlich wie MATLAB. Die Fitparameter wurden mit der `nonlin_residmin`-Funktion aus dem `Optim`-Paket von Octave bestimmt. Diese Funktion wird für nichtlineare Minimierung von Residuen eingesetzt. Dabei ergaben sich folgende Werte:

- $a = 1654,7$
- $b = 134,49$
- $c = 1,6471$
- $d = 208,35$

Zuvor wurden iterativ geeignete Startwerte für die Fitparameter ermittelt. Die genannten Ergebnisse wurden mit den Startparametern $a = 450$, $b = 50$, $c = 0,7$ und $d = 71$ erhalten.

Die nachfolgenden Kalibrierfaktoren werden im Weiteren verwendet:

- für N-13: $653,22 \text{ Bq} \cdot \text{s}/\text{m}^3$
- für Ga-68: $696,13 \text{ Bq} \cdot \text{s}/\text{m}^3$
- für Xe-133: $346,5 \text{ Bq} \cdot \text{s}/\text{m}^3$

DORNIER empfiehlt, mit einer Bandbreite an Radionukliden mit unterschiedlichen Betaenergien Kalibriermessungen vorzunehmen, um die geforderten Aktivitäten sicherer bestimmen zu können. Da nicht viele gasförmige Radionuklide verfügbar sind, die diese Energien abbilden, empfiehlt DORNIER, eine näherungsweise Kalibrierung durch Verwendung von Kalibrierquellen mit gleicher Geometrie, beispielsweise Linien- oder Flächenstrahler, die in die Messkammer eingeführt und in eine konservative Position zum Detektor gebracht werden. Mögliche Radionuklide wurden weiter oben vorgeschlagen.

Berechnung der Transmissionsgrade nach DIN ISO 2889

Für das FV Fortluft wird davon ausgegangen, dass die Ableitungen gasförmig (FOR, JUM, IPR) vorliegen. Für IPR werden außerdem die Transmissionsgrade bestimmt, die relevant wären, wenn zusätzlich in

Aerosolform schwebstoffgebundene Radionuklide vorliegen würden. Dadurch soll die Auswirkung des Aufbaus auf den Transmissionsgrad demonstriert werden.

Bei gasförmigen Ableitungen sind in der Regel keine Verluste in den Probenentnahmeeinrichtungen zu erwarten. Bei schwebstoffgetragenen Aktivitäten sind nach DIN ISO 2889 [6] Übertragungsfaktoren zu berücksichtigen, die sich aufgrund der Geometrie des gesamten Messaufbaus ergeben. Maßgebend sind hier gerade verlaufende Rohr- bzw. Schlauchstücke und Rohrbögen, sowie die Probenentnahmeeinrichtung und die Messkammern. Für jedes dieser Elemente wird ein Übertragungsfaktor abgeschätzt. Um den Transmissionsgrad für das gesamte System zu bestimmen, werden die einzelnen Übertragungsfaktoren multipliziert.

Für die Messkammern liegen DORNIER keine Daten vor, hier wird von einem Übertragungsfaktor von 0,95 ausgegangen. Für die Entnahmesonden liegen die Werte für die Verluste je nach Probenentnahmeort zwischen 0,8 und 1,3. Die weiteren Faktoren, die durch die verwendeten Schläuche und die Aufstellung der Messkammern bestimmt werden, sind abhängig vom jeweiligen Aufbau und werden im Ergebniskapitel der jeweiligen Einrichtung beschrieben.

3.1.3.2 Nuklidspezifische Messkammer

Die vom BfS eingesetzte Messtechnik zur nuklidspezifischen Messung von Gammastrahlung basiert grundlegend auf einem Germanium-Halbleiterdetektor, welcher in eine Messkammer eingeführt ist.

Funktionsweise

Die Messkammer ist von einer Abschirmung umgeben, um den Einfluss von Untergrundstrahlung so gering wie möglich zu halten. Die Messkammer besteht aus Stahl, die Abschirmung aus 14 Bleiplatten mit einer Gesamtmasse von 310 kg.

Das Gammaskpektrometer besitzt einen Halbleiterdetektor aus hochreinem Germanium (HPGe), der elektrisch auf ca. -180 °C gekühlt wird. Des Weiteren wird eine Hochspannung angelegt. Die einfallenden Gammaquanten lösen verschiedene Ionisationsvorgänge im Detektor aus, die einen elektrischen Impuls erzeugen. Diese werden durch die entsprechende Elektronik verstärkt und aufgezeichnet. Die unterschiedliche Stärke der elektrischen Impulse geben Rückschluss auf die charakteristische Energie der Gammaquanten und ermöglichen es, diese zu identifizieren. Diese Daten können mittels einer geeigneten Software ausgelesen werden.

Das BfS besitzt mehrere Detektoren mit verschiedenen Eigenschaften, die für eine Messung genutzt werden können. Beim FV Fortluft kam das tragbare, elektrisch gekühlte, p-Type, HPGe-Gammaskpektrometer vom Typ Aegis der Firma Mirion Technologies (Canberra) GmbH mit einer relativen Effizienz von 40 % zum Einsatz (siehe Abbildung 3).

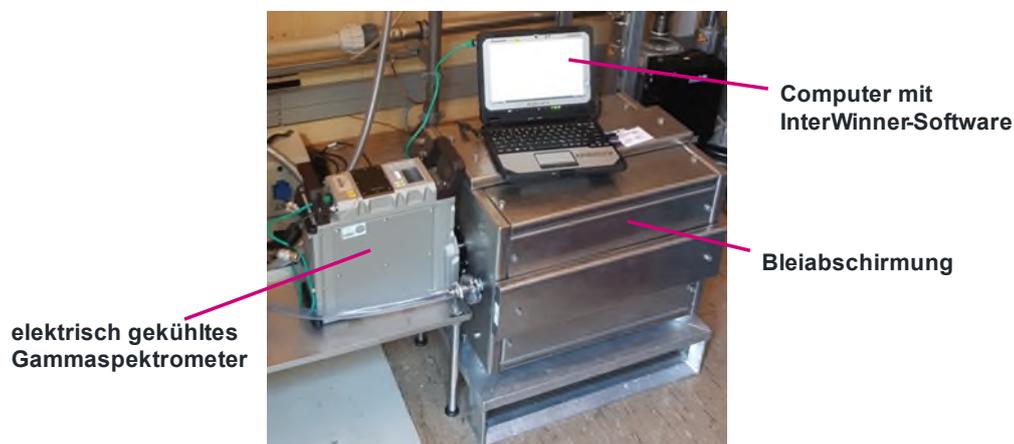


Abbildung 3: Für das FV Fortluft verwendete nuklidspezifische Messkammer mit Abschirmung

Der Detektor ist per Ethernetkabel mit einem Laptop verbunden. Von diesem Gerät können mittels einer geeigneten Software, Einstellungen am Detektorsystem sowie der Messwertaufbereitung vorgenommen werden.

Während der laufenden Messung werden die in der integrierten Messwertaufbereitung erfassten Messdaten mittels der Software InterWinner 8.0 im Zehnminutentakt ausgelesen und auf dem Laptop aufgezeichnet.

Der genannte Detektor kann auch ohne Messkammer betrieben und gleichermaßen wie der in Kapitel 4.1.3.3 beschriebene Falcon 5000 genutzt werden.

Auswertung

In dem Programm InterWinner auf dem Messrechner ist ein Makro hinterlegt, mit dem wiederholt ein zehnmütiges, energieabhängiges Impulshöhenspektrum im Energiebereich von 0 keV bis 1700 keV aufgezeichnet wird. Bei der Auswertung mit InterWinner kann aus der Summation von 144 zehnmütigen Spektren ein Tagesspektrum erzeugt werden. Für die Auswertung werden zunächst diese Tagesspektren analysiert (siehe Abbildung 4).

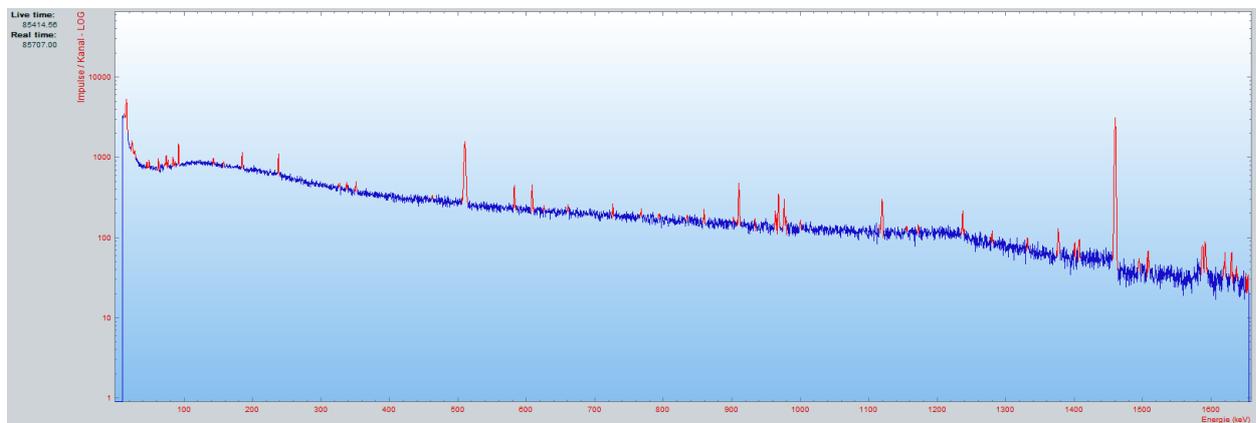


Abbildung 4: Beispiel eines Impulshöhenspektrums, das an der nuklidspezifischen Messkammer mit der Software InterWinner 8 aufgenommen wurde.

Hierzu werden die Parameter der Messung für die Auswertung des Tagesspektrums eingestellt. Dabei ist zu beachten, dass einige Parameter bereits in der hinterlegten Ausbeutekurve des Aegis-Detektors für diese Messgeometrie berücksichtigt werden. Die Ergebnisse für die in der Nuklidtabelle hinterlegten Radionuklide werden in Becquerel pro Kubikzentimeter (Bq/cm^3) angegeben.

Die Ausbeutekurve des Aegis mit der Geometrie der verwendeten Messkammer wird DORNIER vom BfS zur Verfügung gestellt. Die Nuklidtabellen (siehe Tabelle 3) wurden für die Einrichtungen einzeln angelegt und je nach auszuwertenden Spektren entsprechend abgerufen (siehe Tabelle 3).

Auf Grundlage der eingestellten Parameter und einer voreingestellten Analysesequenz führt die Software eine Spektrenanalyse durch. Dabei werden die im Impulshöhenspektrum auftretenden Peaks den in einer Nuklidtabelle hinterlegten Radionukliden zugeordnet. Mithilfe der Software werden die spezifischen Aktivitäten und deren Unsicherheiten, Erkennungsgrenzen (EKG) und Nachweisgrenzen (NWG) gemäß DIN EN ISO 11929 [7] für die identifizierten Radionuklide berechnet.

Die tagesabhängige Zusammensetzung der Aktivität in der Fortluft wird in einem Diagramm dargestellt, indem die Aktivitätskonzentrationen gegen die Zeit aufgetragen wird. Zu Zeiten, wo keine Aktivitätskonzentration ermittelt werden konnte, wird der ermittelte Wert der EKG als Messwert angenommen. Anhand des so erzeugten Diagramms wird ausgewählt, welche Zeitbereiche interessant sind, z. B., weil sie signifikante Abgaben enthalten. Für diese Zeitbereiche werden dann ggf. Analysen in kürzeren Zeitbereichen (stundenweise Auswertung zu Stundenspektren) erstellt. Das Vorgehen ist analog zu den Tagesspektren.

Peaks, die keinem Nuklid der Nuklidtabelle zugeordnet werden konnten, wurden stichpunktartig verifiziert und konnten einem natürlichen Radionuklid zugeordnet werden.

Tabelle 4: Nuklidtabellen für die Auswertung von Gammaskpektren der nuklidspezifischen Messkammer. Für FOR wird keine Nuklidtabelle angelegt, da dort nicht mit der nuklidspezifischen Messkammer gemessen wird.

JUM		
Radionuklid	Energie in keV	Intensität in %
K-40	1460,83	10,67
I-123	159,00	83,60
I-125	35,49	6,68
IPR		
Radionuklid	Energie in keV	Intensität in %
K-40	1460,83	10,67
Ga-68	1077,34	3,22
Tc-99m	140,51	89,00
In-111	245,00	94,10
Lu-177	208,37	10,41
Bi-213	440,45	25,90
Fr-221	218,00	11,44

Bei K-40 handelt es sich um ein Nuklid aus dem Bereich NORM, dessen emittierte Gammastrahlung einen *Full Energy Peak* bei 1.460 keV besitzt. Der Anteil von K-40 an allen Kaliumatomen beträgt 0,012 %. Da in unserer Umwelt sowie in den Baustoffen der Gebäude Kalium häufig vorkommt, wird die Gammalinie des K-40 bei den meisten In-situ-Gammaskpektrometriemessungen analysiert und ausgewertet. Diese wird daher zur einfachen Überprüfung der Energiekalibrierung einer Messung herangezogen.

Berechnung der Transmissionsgrade nach DIN ISO 2889

Die Berechnung der Übertragungsfaktoren nach DIN ISO 2889 [6] für die nuklidspezifische Messkammer erfolgt ebenso wie in Kapitel 4.1.3.1 für die integrale Messkammer beschrieben.

3.1.3.3 Handgehaltende nuklidspezifische Messtechnik: Falcon 5000

Der Falcon 5000 ist ein tragbares, elektrisch gekühltes Gammaskpektrometer, das mit einem HPGe-Detektor ausgestattet ist.

Funktionsweise

Der Falcon ist per Ethernetkabel mit einem Tablet verbunden, auf dem das Messprogramm Genie 2000 in der Version V3.1a installiert ist. Über dieses Programm werden die Einstellungen des Messgeräts vorgenommen sowie die Messungen gesteuert und gespeichert. Die Messung und Speicherung erfolgen offline über das Tablet. Die Messdaten wurden mit einem USB-Stick vom Tablet kopiert.



Abbildung 5: Messgerät Falcon 5000 im Messeinsatz bei MED.

Die Auswertung der gespeicherten Messungen erfolgte mit der Software Genie 2000.

Auswertung

In der Messsoftware des Falcon 5000 ist im Gegensatz zum Aegis kein Makro hinterlegt, mit dem wiederholt Zehnminutenspektren aufgezeichnet werden können. Aus diesem Grund entfällt das systematische Zusammenfassen der Spektren zu Stunden- oder Tagesspektren. Während der Messungen muss eine Person vor Ort sein, die die Messungen startet, stoppt und abspeichert.

Die Auswertung der Falcon 5000-Spektren entspricht im Westlichen der in Kapitel 4.1.3.2 vorgestellten Vorgehensweise für die Auswertung mit InterWinner. Die Auswertung erfolgte mit dem Messprogramm Genie 2000, das sich im Benutzerinterface von InterWinner unterscheidet.

Zuvor wurden abweichend zum Vorgehen beim Aegis separate Ausbeutekurven erstellt. Die Berechnung der Ausbeutekurven erfolgte in ISOCS über die Erstellung realitätsangenäherter Geometrien und einer winkelabhängigen Effizienzcharakterisierung des Detektors mittels einer Monte-Carlo-Simulation. Anschließend wurde eine Auswerterroutine festgelegt. Dabei werden in jeder Messreihe Spektren gruppiert, die sich aus allen Einzelmessungen zusammensetzen, die unter den gleichen Bedingungen aufgenommen wurden (z. B. gleicher Abstand und Winkel zum Fortluftkanal). Die Einzelauswertungen innerhalb einer Gruppierung werden als eine Grundgesamtheit betrachtet und zusammengefasst analysiert.

Die verwendeten Nuklidtabellen sind in Tabelle 4 gezeigt. Es handelt sich um fast identische Nuklidtabellen, da die im Heißlabor präparierten Radiopharmaka oft auf der Jodstation verabreicht werden. Lediglich Tc-99m und Re-186 werden nur im Heißlabor, nicht jedoch auf der Jodstation gehandhabt. Fr-221 und Bi-213 sind Tochternuklide von Ac-225, die aufgrund der kurzen Halbwertszeiten der beteiligten Radionuklide ebenfalls als Nachweis für Ac-225 herangezogen werden können. Sie verfügen im Gegensatz zu Ac-225 über eine Gammaemission mit über 10 % Emissionsintensität.

Tabelle 5: Verwendete Nuklidtabellen bei der Auswertung der gammaspektrometrischen Messungen bei MED.

Jodstation		
Radionuklid	Energie in keV	Intensität in %
K-40	1460,83	10,66
I-123	158,97	83,60
I-131	364,49	81,50
Lu-177	208,37	10,41
Bi-213	440,45	25,90
Fr-221	218,00	11,44
Ra-223	269,46	13,30
Heißlabor		
Radionuklid	Energie in keV	Intensität in %
K-40	1460,83	10,66
Tc-99m	140,51	89,00
I-123	158,97	83,60
I-131	364,49	81,50
Lu-177	208,37	10,41
Re-186	137,15	9,47
Bi-213	440,45	25,90
Fr-221	218,00	11,44
Ra-223	269,46	13,30

Abweichend zum Aegis kann bei der Bewertung der Ergebnisse die Aktivitätskonzentration nur kumulativ für den gesamten Zeitraum und nicht nach der Zeit aufgetragen werden. Eine Untersuchung auf auffällige Zeiten der Abgabe kann hier nicht erfolgen

3.1.3.4 Handgehaltene nuklidspezifische Messtechnik: RadHAND

Das tragbare Gammaskpektrometer RadHAND ist mit einem NaI-Detektor ausgestattet, der im Gegensatz zu HPGe-Detektoren keine Kühlung benötigt, jedoch ein Gammaskpektrum mit einer geringeren Auflösung liefert. Das Gerät selbst ist sehr kompakt. Der RadHAND kann, wie auch der Falcon 5000 und der Aegis, mittels Akkus betrieben werden.

Funktionsweise

Das Gerät ist ursprünglich für schnelle Nuklididentifikationen und Dosisleistungsbestimmungen ausgelegt und entsprechend auf eine einfache Handhabung optimiert. Beispielsweise sollen mit dem RadHAND in unterschiedlichen Umgebungen wie Deponien Hotspots lokalisiert werden. Der Nutzer kann zwischen festgelegten Messdauern auswählen, die längste auszuwählende Messdauer beträgt 30 Minuten.

Der RadHAND muss vor Beginn der Messungen über einen QR-Code und dem dort hinterlegten Link Kontakt zu einer Online-Datenbank aufnehmen. Anschließend muss sich der Nutzer des Messgerätes durch einen weiteren Code verifizieren und anmelden. Danach können die Messungen auch offline

durchgeführt werden. Allerdings werden die Messungen erst auf der Datenbank gespeichert, wenn das nächste Mal eine online-Verbindung besteht und das Gerät mit der Datenbank synchronisiert wird. Eine lokale Speicherung oder Entnahme der Daten per Datenträger sind nicht möglich.

Der RadHAND ist ein Messsystem, das wie oben beschrieben für das FV Fortluft zweckentfremdet wird.



Abbildung 6: Messgerät RadHAND im Messeinsatz bei MED.

Die Messung selbst erfolgt mit einem NaI-Detektor. Das erhaltene Spektrum wird über Spektrenentfaltung (engl. deconvolution) automatisch ausgewertet und das identifizierte Radionuklid angezeigt. Der RadHAND wird im Rahmen des FV Fortluft zweckentfremdet verwendet.

Auswertung

Die Auswertung der Spektren erfolgt automatisiert unter Verwendung von Nuklidbibliotheken durch die installierte Software. Die Nuklidbibliotheken werden beim FV Fortluft jedoch nicht vom Endnutzer angelegt, sondern durch CaenSys. Da der Fokus der integrierten Software auf schneller Nuklididentifikation liegt, wird jeweils nur das Radionuklid ausgegeben, das von der Software sicher identifiziert werden konnte. In seltenen Fällen wird mehr als ein Radionuklid angegeben.

Die Messergebnisse (inklusive des Impulshöhenspektrums) werden auf eine Online-Datenbank geladen und können von dort an jedem Rechner mit Internetzugang heruntergeladen und weiterverwendet werden. In Abbildung 7 ist ein Screenshot von der Online-Anzeige eines Impulshöhenspektrums dargestellt. Für den Zweck der Messungen bei MED werden lediglich die identifizierten Radionuklide herangezogen.

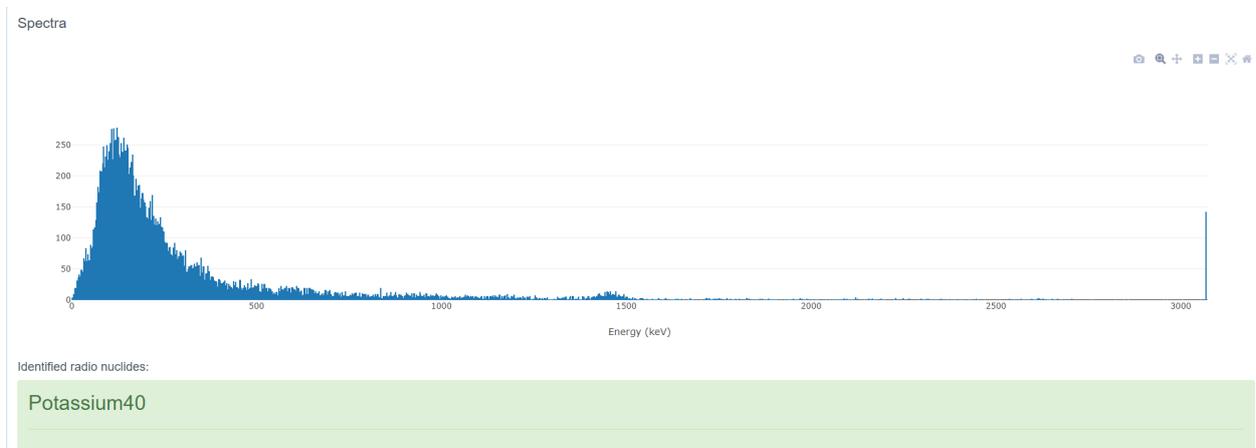


Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung des Impulshöhenspektrums einer Messung mit dem RadHAND. Screenshot von der Anzeige der Online-Datenbank.

Die Information, welches Radionuklid bzw. welche Radionuklide identifiziert wurden, wurde nach jeder Messung handschriftlich notiert. Die identifizierten Radionuklide werden für die Analyse in Kapitel 5.4.2 zusammengefasst. Eine weiterführende Auswertung war nicht vorgesehen.

4 AP 2: Entwickeln und Testen von Messstrategien sowie Umsetzung der Messstrategien und Durchführung der Messreihen

In AP2 wurde an den in AP1 ausgewählten Einrichtungen die Fortluft mit der in Kapitel 4.1.3 vorgestellten Messtechnik über einen längeren Zeitraum gemessen. Dabei wurden pro Einrichtung zwei bis drei Messreihen aufgenommen.

Nach der Erstellung eines Messplans wurden die Messgeräte in den verschiedenen Einrichtungen aufgebaut und am jeweiligen Fortluftkamin (mit Ausnahme von MED) angeschlossen. Die Messdaten wurden über einen Zeitraum von drei Wochen bis zu vier Monaten pro Einrichtung aufgezeichnet. Bei längerer kontinuierlicher Messdauer wurden die Messdaten in einzelne Messreihen aufgeteilt. Die Messreihen wurden einheitlich ausgewertet, in Punktdiagrammen dargestellt und dem BfS präsentiert. Dabei konnten in jeder Einrichtung die zu erwartenden Radionuklide mit variierenden Genauigkeiten nachgewiesen werden. Die Zeiträume, in denen in den jeweiligen Einrichtungen gemessen wurde, sind in der Abbildung 8 dargestellt.

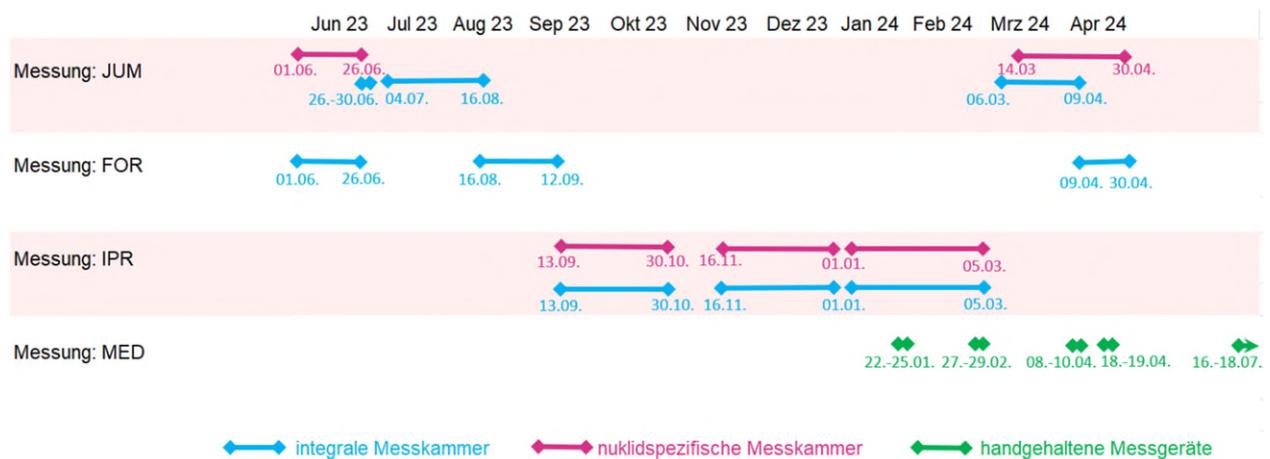


Abbildung 8: Zeitplan der Messreihen in den ausgewählten Einrichtungen.

4.1 JUM

Die Messungen wurden vom 01.06.2023 bis 18.08.2023 sowie vom 06.03.2024 bis 30.04.2024 durchgeführt, wobei sowohl die integrale als auch die nuklidspezifische Messkammer eingesetzt wurden. Zu beachten ist, dass für die Zeiträumen, in denen das PEX der FOR-Forschungsanlage in Betrieb war, die integrale Messkammer zu FOR transportiert wurde, sodass bei JUM in dieser Zeit nur die nuklidspezifische Messkammer zum Einsatz kam. Nach einer Stromabschaltung im Messcontainer am 30.06.2024 wurde durch einen Bedienungsfehler die nuklidspezifische Messung nicht wieder aufgenommen, sodass für den Zeitraum vom 01.07.2023 bis 15.08.2023 keine Messdaten vorliegen. Somit sind bei JUM zwei Messreihen zu verzeichnen.

4.1.1 Verwendete Messtechnik

Bei JUM wird mit Jodisotopen umgegangen, die mittels Beta- oder Gammamessung nachgewiesen werden können. Die gewählte Messtechnik soll dabei alle relevanten Jodisotope erfassen. Zusätzlich soll ein diskriminierendes System, das den Einfluss von zusätzlichen Radionukliden aufzeichnet, eingesetzt werden. Aus diesem Grund wurde sowohl die integrale als auch die nuklidspezifische Messkammer ausgewählt. Bei JUM befand sich die Probenentnahmestelle außerhalb des Gebäudes in einem Container, sodass der Zugang ohne Schwierigkeiten möglich war. Im Container waren genügend Platz als Aufstellfläche sowie eine freie Anschlussstelle am Fortluftkamin vorhanden. Der Aufbau ist in Abbildung 9 gezeigt.



Abbildung 9: Aufbau der integralen und nuklidspezifischen Messkammern im Messcontainer von JUM. Links und Mitte: Erste Messreihe. Rechts: Zweite Messreihe.

Der Aufbau wurde von der ersten zur zweiten Messreihe variiert, wie in Abbildung 9 zu sehen ist.

4.1.1.1 Parameter für die Berechnung der Transmissionsgrade

DORNIER wurde darüber informiert, dass die Fortluft von JUM durch ein vorgeschaltetes Filtersystem frei von Schwebstoffen ist, sodass die Berechnung der Übertragungsfaktoren nach DIN ISO 2889 entfällt.

4.1.2 Ergebnisse

Bei den integralen Messungen bei JUM ist bei beiden Messreihen ein verrauschter Untergrund erkennbar. Dadurch sind Abgaben in der Größenordnung des Untergrunds nur schwer identifizierbar. Aktivitätskonzentration oberhalb des Untergrunds wurden lediglich an wenigen Tagen in beiden Messreihen aufgezeichnet. Die maximale Aktivitätskonzentration, die aus dem Impulshöhenspektrum ermittelt wurde, liegt bezogen auf den Kalibrierfaktor für Xe-133 bei beträgt ungefähr $2,5 \text{ E}+03 \text{ Bq/m}^3$. Dieser Kalibrierfaktor wurde verwendet, da weder für I-123 noch für I-125 ein spezifischer Kalibrierfaktor rechnerisch ermittelt werden konnte, weil beide Radionuklide über Elektroneinfang zerfallen [8]. In der Abbildung 10 sind die Impulshöhenspektren (bereinigte Impulse der Fortluft nach Gleichung 4) der Messreihen 1 und 2 des integralen Messsystems bei JUM dargestellt.

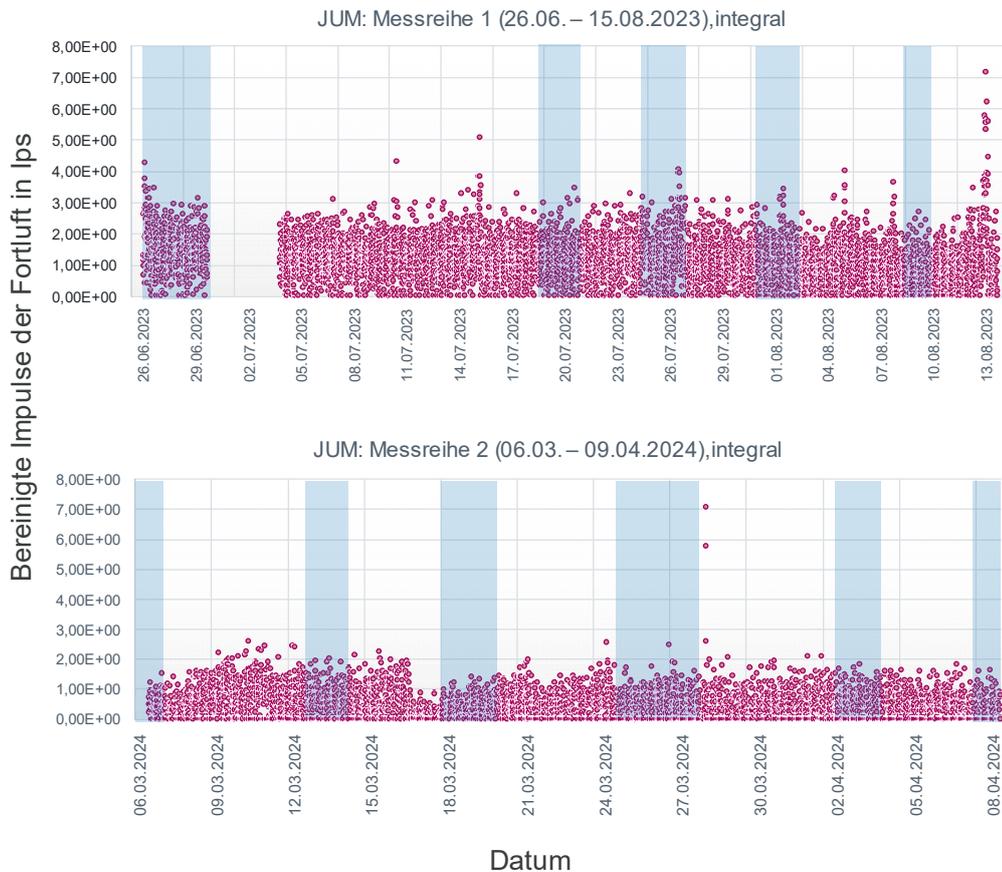


Abbildung 10: Messreihe 1 und 2 bei JUM unter Verwendung der integralen Messtechnik. Die Tage, an denen JUM produzierte, sind blau unterlegt.

Bei den nuklidspezifischen Messdaten von JUM wurden die in Tabelle 4 festgelegten Radionuklide bei der Auswertung berücksichtigt. K-40 weist als natürliches Radionuklid in allen Messreihen wie zu erwarten konstante Messwerte oberhalb der EKG (siehe Kapitel 6.3.2) auf. Von den interessanten Radionukliden I-123 und I-125 konnten an wenigen Tagen Aktivitätskonzentrationen gemessen werden, die über der EKG lagen, aber die NWG nicht überschritten (siehe Kapitel 6.3.3). Die EKG wurde für alle Radionuklide an allen Messtagen bestimmt und aufgetragen. In der Abbildung 11 ist die Messreihe 1 und 2 für die Radionuklide I-123 und I-125, die mit dem nuklidspezifischen Messsystem bei JUM aufgenommen wurde, abgebildet. Die Tage, an denen bei JUM produziert wurde, sind in der Abbildung blau unterlegt. Messdaten für K40 sind ergänzend im Anhang in Abbildung 31 dargestellt.

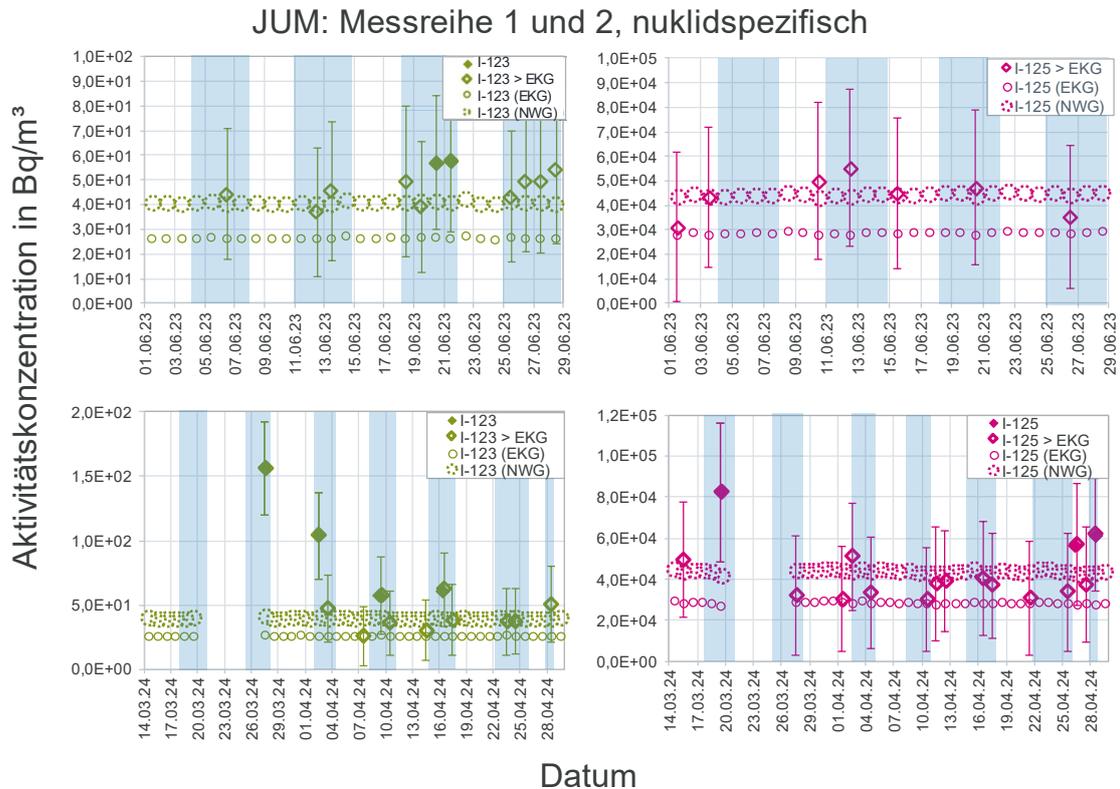


Abbildung 11: Messreihe 1 (oben) und Messreihe 2 (unten) bei JUM mit der nuklidspezifischen Messkammer. Aktivitätskonzentrationen (volle Rauten), Messwerte ganz oberhalb der EKG (leere Rauten), NWG (gestrichelte leere Kreise) und EKG (kleine leere Kreise) der Radionuklide I-123 (links) und I-125 (rechts). Produktionstage sind blau hinterlegt.

Abbildung 11 zeigt deutlich, dass in beiden Messreihen Aktivitätskonzentrationen von I-123 oberhalb der EKG identifiziert wurden. Mit 13,2 Stunden besitzt I-123 eine sehr kurze Halbwertszeit; deshalb ist der Nachweis nur an Produktionstagen möglich. In beiden Messreihen wurde auch I-125 mit Aktivitätskonzentrationen oberhalb der EKG nachgewiesen – dies auch außerhalb der Produktionszeit. Zurückzuführen sein könnte dies auf die hinreichend lange Halbwertszeit von I-125 mit fast 60 Tagen. Auffällig ist in Abbildung 11, dass die EKG und NWG für die I-125-Aktivitätskonzentration höher sind als die für I-123. Dies liegt an der sehr niedrigen Gammaenergie von nur 35 keV mit einer Emissionsintensität von 6,7 % sowie an Abschirmeffekten.

Für Tage, an denen in Abbildung 11 eine signifikante Abgabe oberhalb der EKG erkennbar ist, wurden zusätzlich stündliche Auswertungen der Messdaten durchgeführt. Durch die kürzeren Messzeiten erhöhen sich EKG und NWG, sodass nur an wenigen Tagen eine Aktivität von I-125 bestimmbar war. In Abbildung 12 sind exemplarisch die Ergebnisse der stündlichen Auswertung vom 20.03.2024 dargestellt. Die Ergebnisse von diesem Tag sind repräsentativ für die weiteren stündlichen Auswertungen einzelner Tage.

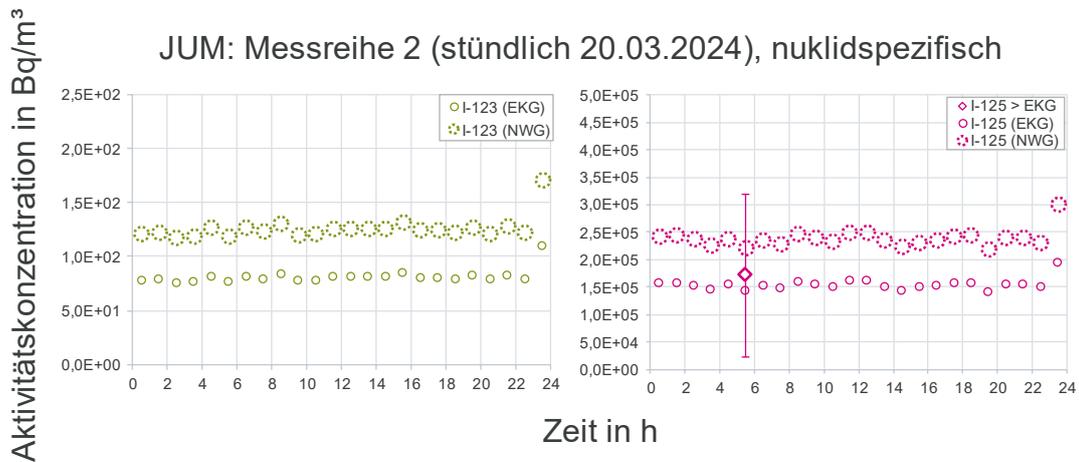


Abbildung 12: Messreihe 2 bei JUM mit der nuklidspezifischen Messkammer, stündliche Auswertung vom 20.03.2024. Aktivitätskonzentrationen oberhalb der EKG, aber unterhalb der NWG (leere Rauten), NWG (gestrichelte leere Kreise) und EKG (kleine leere Kreise) der Radionuklide I-123 (links) und I-125 (rechts).

Wie aus Abbildung 12 ersichtlich, konnte an diesem Tag für I-125 zwischen 5 und 6 Uhr eine Aktivitätskonzentration in Höhe von $1,7E+05$ Bq/m³ oberhalb der EKG festgestellt werden. Für I-123 konnten lediglich EKG und NWG bestimmt werden. Trotz des einmaligen Nachweises von I-125 in Abbildung 12 gestaltet sich ein verlässlicher messtechnischer Nachweis hier schwierig. Insbesondere ein stundengenauer zeitlicher Verlauf der Abgabe lässt sich nicht beobachten.

4.1.3 Diskussion

Der Aufbau der Messkammern war in beiden Messreihen aufgrund der räumlichen Gegebenheiten nicht optimal. In der ersten Messreihe mussten entsprechend der Aufstellungsorte lange Schlauchstücke verwendet werden. In der letzten Messreihe wurde versucht, die Entfernungen möglichst kurz zu halten, dafür waren jedoch mehrere Schlauchbögen notwendig, die ihrerseits zu hohen Verlusten führten. Für einen optimierten Aufbau sind möglichst kurze Schlauchstücke zu verwenden und Schlauchbögen zu vermeiden. Ein größerer Schlauchdurchmesser würde ebenfalls zu höheren Transmissionsgraden führen.

Im Weiteren kam es bei den Messungen zudem zu mehreren technischen Schwierigkeiten. Am stärksten wogen die Stromabschaltungen sowohl in der ersten als auch in der zweiten Messreihe. Die erste Stromabschaltung führte dazu, dass die Hochspannung am Aegis-Detektor abgeschaltet blieb und keine verwertbaren Daten über ca. zwei Monate aufgezeichnet werden konnten. Dadurch war ein Vergleich der beiden Messsysteme bei JUM so gut wie nicht möglich. In Folge der zweiten Stromabschaltung wurde ein elektronisches Problem beim integralem Messsystem am Schirmzähler 2 festgestellt. Die Rohdaten des SZ2 zeigen ab dem Zeitpunkt der Stromunterbrechung einen Offset, der vermutlich durch eine Veränderung am Verstärker hervorgerufen wurde. Dieser konnte jedoch korrigiert werden. Weiterführende Daten sind im Anhang in Abbildung 30 dargestellt.

Die bei JUM nachgewiesenen Jodisotope zerfallen über Elektroneneinfang. Dieser ist zwar mit Proportionalzählrohren nachweisbar, jedoch ist die eingesetzte Messtechnik nicht auf diese Radionuklide bzw. diese Zerfallsart optimiert. Die Empfindlichkeit für Betastrahler ist deutlich höher.

Die geringen Aktivitätskonzentrationen von I-123 und I-125 in der Fortluft von JUM führen zu einer schwierigen Detektion der Zerfälle mit den eingesetzten Messsystemen. Beim integralen Messsystem ist beispielsweise das Signal-zu-Rausch-Verhältnis sehr gering, sodass kleine Aktivitätskonzentrationen überdeckt werden. Bei der nuklidspezifischen Messung ist I-123 in Tagesspektren im Gegensatz zu I-125 noch gut nachweisbar. Insbesondere die niedrige Gammaenergie von I-125 und der Messaufbau führen zu relativ hohen EKG und NWG. Dadurch wird eine belastbare Aussage zur tatsächlichen Aktivitätskonzentration erschwert.

4.2 FOR

An der FOR-Forschungsanlage wurden drei Messreihen durchgeführt: von 01.06.-26.06.2023, vom 16.08.-12.09.2023 und vom 09.04.-30.04.2024. Die Messzeiträume wurden so gewählt, dass sie mit dem Zeitraum des Positronenexperiment (PEX) zur Positronenspektroskopie zusammenfielen. In dieser Zeit ist die Aktivierung der Luft besonders hoch. In den Messdaten aller drei Messreihen ist die PEX-Strahlzeit sehr gut erkennbar. Kurz vor dem Beginn der dritten Messreihe, als die integrale Messkammer noch im JUM-Container installiert war, kam es zu einer weiteren Stromabschaltung, die womöglich zu einer elektronisch bedingten Verschiebung eines der Messsignale geführt hat, sodass eine nachträgliche Korrektur der Messdaten notwendig war.

4.2.1 Verwendete Messtechnik

Beim FOR-Kamin liegen aufgrund der Aktivierung der Luft beim Betrieb des Beschleunigers, insbesondere während des PEX, vorrangig Positronenstrahler vor. Da diese gammaspektrometrisch aufgrund der Annihilationsstrahlung bei 511 keV nicht voneinander zu unterscheiden sind, war eine Messung mit der nuklidspezifischen Messkammer nicht sinnvoll. Stattdessen wurde beim FOR-Kamin lediglich das integrale Messsystem eingesetzt und auf eine nuklidspezifische Messung verzichtet. Beim FOR-Kamin befindet sich die Probenentnahmestelle für die Fortluft in einen Container außerhalb des Gebäudes. Es konnte eine freie Anschlussstelle an den Fortluftkamin genutzt werden. Für die erste und zweite Messreihe wurde ein Teil der Fortluft in die integrale Messkammer eingeleitet und danach wieder zurückgeführt. Für die dritte Messreihe wurde hinter der Messkammer zusätzlich ein C-14-Sammler angeschlossen, um auszuschließen, dass die gemessenen Intensitäten durch C-14-Aktivität verzerrt werden, da das Messsystem sehr sensitiv auf die Energie von C-14-Emissionen reagiert.



Abbildung 13: Aufbau der integralen Messtechnik im Messcontainer der FOR-Forschungseinrichtung. Links: Aufbau für die erste und zweite Messreihe. Rechts: Aufbau für die dritte Messreihe mit C-14-Sammler im Hintergrund (durch magenta-gefärbten Rahmen hervorgehoben).

4.2.1.1 Parameter für die Berechnung der Transmissionsgrade

Da beim FOR-Kamin lediglich radioaktive Gase und keine schwebstoffgebundenen Radionuklide gemessen werden, ist eine Verlustrechnung nicht notwendig. Die Ergebnisse, die in Kapitel 5.2.2.2 vorgestellt und in Kapitel 5.2.3 diskutiert werden, sind daher nicht korrigiert worden.

4.2.2 Ergebnisse

Die Messreihen wurden wie in Abschnitt 4.1.3.1 beschrieben ausgewertet. Hierbei muss zunächst der Kalibrierfaktor bestimmt werden.

4.2.2.1 Bestimmung des Kalibrierfaktors

Bei FOR handelt es sich um einen Elektronenbeschleuniger, dessen Energie im Bereich 20 MeV bis 40 MeV liegt. Diese Energie ist ausreichend, um Kernreaktionen mit den Atomkernen der umliegenden Stoffe zur Folge zu haben. Allerdings reagieren die Kerne in der Regel nicht mit den Elektronen selbst, sondern mit den Gammaquanten der Bremsstrahlung. Folglich müssen nicht die (e,-)Reaktionen betrachtet werden, die aufgrund der Natur der Elektronen (Leptonen) und Kerne (Baryonen) sehr unwahrscheinlich sind, sondern die (γ ,)-Reaktionen.

DORNIER geht davon aus, dass die Zusammensetzung der Luft in der FOR-Halle der durchschnittlichen Zusammensetzung der Atemluft entspricht. Demzufolge hat die nicht aktivierte Luft eine Zusammensetzung von

- 78,00 Vol % Stickstoff
- 20,94 Vol % Sauerstoff
- 0,93 Vol % Argon und
- 0,04 Vol % Kohlenstoffdioxid.

Weitere Gase treten nur in so geringer Konzentration auf, dass sie hier nicht näher betrachtet werden.

Es werden alle (γ ,)-Reaktionen betrachtet, die einen Sauerstoff-, Stickstoff-, Kohlenstoff- oder Argonkern als Ausgangskern haben. Als Quelle wird das Standardwerk „Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes“ herangezogen [9]. Demzufolge gibt es für Argon keine (γ ,)-Reaktionen. In Frage kommende Kernreaktionen sind:

- C-12 (γ ,n) C-11
- N-14 (γ ,n) N-13
- O-16 (γ ,n) O-15

Aufgrund des geringen Anteils in der Luft wird die Kernreaktion von C-12 als nicht relevant angesehen. Nur die Kernreaktionen mit Stickstoff und Sauerstoff als Ausgangskerne werden weiter betrachtet.

O-15 hat eine Halbwertszeit von lediglich 122 s. Es wird davon ausgegangen, dass die Luftführung bis zum Fortluftkanal hier bereits eine Art Abklingstrecke darstellt, sodass keine nennenswerten Mengen an O-15 mehr abgegeben werden. Hinzu kommt, dass die Wirkungsquerschnitte für die Kernreaktionen zur Erzeugung von O-15 kleiner sind als die zur Erzeugung von N-13. Außerdem ist die Erzeugung von N-13 bereits ab einer Photonenenergie von 14 MeV möglich, wohingegen es für O-15 22 MeV braucht [9].

N-13 hat eine Halbwertszeit von 9,9 min. Hier ist nach fünf Minuten noch ca. 70 % des ursprünglichen N-13 vorhanden, O-15 ist in der gleichen Zeit schon auf 18 % abgefallen. Nach einer halben Stunde liegen noch ungefähr ein Achtel, oder 12,5 %, der ursprünglichen N-13-Aktivität vor. Nach derselben Zeit verbleiben lediglich 0,006 % der Ausgangsaktivität von O-15.

Es kann also gefolgert werden, dass die gesamte Aktivität der detektierten Aktivierung der Luft auf N-13-Zerfälle zurückzuführen ist. Die mittlere Betaenergie des Zerfalls liegt bei 491,82 keV, demnach ist der entsprechende Kalibrierfaktor nach Gleichung 6 anzuwenden.

Weiterhin ist denkbar, dass (n,-)Reaktionen auftreten. Mögliche Reaktionen sind:

- Ar-40 (n, γ) Ar-41
- N-14 (n,2n) N-13
- N-14 (n,p) C-14
- O-16 (n,2n) O-15

- O-16 (n,p) N-16

N-16 ist aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit von nur rund 7 s nicht relevant. Für die (n,2n)-Reaktionen sind vergleichsweise hohe Schwellenergien notwendig, für die (n, γ)- bzw. (n,p)-Reaktion (Bildung von C-14) sind thermische Neutronen ausreichend. Demzufolge ist auch die Bildung von C-14 und von Ar-41 nicht auszuschließen. Die mittlere Betaenergie des Zerfalls von Ar-41 liegt bei 459,36 keV, sodass der Kalibrierfaktor sehr ähnlich zu dem von N-13 ist. Nach Gleichung 6 ergibt sich eine relative Abweichung von nur 1 %.

4.2.2.2 Messergebnisse der drei Messreihen

Die Messreihen wurden so geplant, dass eine zeitliche Überlappung mit den PEX-Strahlzeiten vorlag, da dann mit einem erhöhten Aktivitätsaufkommen in der Fortluft zu rechnen war. In allen drei Messreihen konnte die PEX-Strahlzeit zweifelsfrei in den Impulshöhenspektren (grafisch über die Zeit aufgetragenen bereinigten Impulse der Fortluft) in der Luft identifiziert werden. Die Messergebnisse sind in Abbildung 14 dargestellt.



Abbildung 14: Messreihen 1 bis 3 bei FOR mit der integralen Messtechnik.

In Abbildung 14 ist deutlich ersichtlich, dass in allen drei Messreihen während der PEX-Strahlzeit eine erhöhte Aktivitätskonzentration in der Fortluft vorlag. In diesem Zeitraum erhöhte sich die Aktivitätskonzentration plateauartig und bleibt über die gesamte Strahlzeit sehr konstant hoch. Zum Ende der Strahlzeit sank die Aktivitätskonzentration rapide ab. Sowohl vor als auch nach der PEX-Strahlzeit waren erhöhte Aktivitätskonzentrationen messbar. Auch außerhalb der PEX-Strahlzeit waren punktuell höhere Aktivitätskonzentrationen in der Fortluft von FOR messbar. Die Abgaben sind auf einzelne Experimente am FOR-Beschleuniger zurückzuführen, die sich jedoch nicht nuklidspezifisch zuordnen lassen, da DORNIER die Nuklidzusammensetzung nicht bekannt ist.

Da die integrale Messtechnik sehr sensitiv auf C-14 reagiert, war während der dritten Messreihe ein C-14-Sammler installiert. Damit sollte verhindert werden, dass etwaige C-14-Aktivitätskonzentrationen als Aktivitätskonzentrationen eines anderen Nuklids fehlinterpretiert werden. Die Auswertung des C-14-Sammlerkatusche ergab, dass die Aktivitätskonzentration von C-14 während des Messzeitraums unterhalb der EKG lag.

4.2.3 Diskussion

Die PEX-Strahlzeit ist in allen drei Messreihen deutlich erkennbar. Das Plateau lässt sich durch die konstante Energie des Beschleunigers erklären, die für eine gleich hohe Bremsstrahlung sorgt, die wiederum eine zeitlich konstante Produktion von N-13 zur Folge hat. Das rapide Abklingen des Messsignals zum Ende der PEX-Strahlzeit spricht ebenfalls dafür, dass es sich bei der Aktivität um Strahlung von aktivierter Luft handelt, da die Halbwertszeiten von N-13 und vergleichbaren Radionukliden im Größenordnungsbereich von Sekunden bis Minuten liegen und somit sehr kurz sind.

C-14 wird aus N-14 durch Einfang von thermischen Neutronen gebildet. Der Wirkungsquerschnitt ist höher als bei der Bildung von Ar-41 aus Ar-40 (ebenfalls durch Einfang thermischer Neutronen). Mit dem C-14-Sammler in der dritten Messreihe konnte gezeigt werden, dass keine Aktivitätskonzentration von C-14 in nennenswerten Mengen vorliegt. Da Argon neben dem geringeren Wirkungsquerschnitt außerdem in deutlich geringerer Konzentration als Stickstoff in der Atmosphäre vorliegt, wird die Bildung von Ar-41 in relevanten Mengen von DORNIER als unwahrscheinlich erachtet. Das Vorliegen der diskutierten Radionuklide wurde messtechnisch jedoch nicht verifiziert. In Abschnitt 5.2.2.1 wurde gezeigt, dass der Kalibrierfaktor von Ar-41 lediglich um 1 % von dem Kalibrierfaktor von N-13 abweicht. Eine Verwechslung ist also nicht relevant für das Ergebnis.

Plötzliche Stromabschaltungen oder Veränderungen bei der Stromversorgung können Probleme bei der Elektronik des integralen Messsystems hervorrufen. Die Daten können nicht tagesaktuell überwacht werden, sondern erst im Nachhinein eingesehen und ausgewertet werden. Sie wurden alle 4-6 Wochen heruntergeladen; somit können derartige Fehler erst zu einem späten Zeitpunkt erkannt werden.

4.3 IPR

Bei IPR wurden drei Messreihen an zwei verschiedenen Kaminen durchgeführt. Beide Kamine führen die Fortluft aus Entwicklungslaboren. Die Messung am ersten Kamin wurde vom 13.09.2023 bis 30.10.2023 durchgeführt. Die beiden Messungen am zweiten Kamin fanden vom 16.11.2023 bis 31.12.2023 sowie vom 01.01.2024 bis 05.03.2024 statt. Beide Messkammern kamen die gesamte Zeit über zum Einsatz. Bei diesen Messungen liegt, verglichen mit den FOR- und JUM-Messungen, ein deutlich verringerter Untergrund vor. Es sind klare Abgaben von Ga-68 und deren zeitliche Verläufe identifizierbar.

Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten im Messraum konnten die Messkammern nicht direkt neben den Kaminen platziert werden. Somit mussten Schläuche verwendet werden, die mehrere Meter lang sind. Eine entsprechende Verlustrechnung wurde durchgeführt.

4.3.1 Verwendete Messtechnik

Bei IPR wird mit Radionukliden umgegangen, die verschiedene Strahlungsarten emittieren. Es besteht nach Tabelle 2 keine Möglichkeit, mit nur einer Messtechnik alle Nuklide zu erfassen. Beispielsweise ist Y-90 ein reiner Betastrahler, der gammaspektrometrisch nicht nachgewiesen werden kann, während

Tc-99m keine Betastrahlung emittiert und ein Nachweis lediglich über Gammaskopie möglich ist. Aus diesem Grund wurde die nuklidspezifische Messkammer ausgewählt, um die vier Radionuklide Ga-68, In-111, Lu-177 und Ac-225 erfassen zu können, und das integrale Messsystem, um auch Y-90 miteinzuschließen. Die zwei Kamine sind mit Probenentnahmerechen ausgestattet und befinden sich in einem abschließbaren Technikraum im ersten Obergeschoss des Gebäudes von IPR, in dem sich auch eins der Labore befindet. Hier konnten die integrale und die nuklidspezifische Messkammer in Reihe an einen der Fortluftkamine mit nachgeschalteter Pumpe angeschlossen werden. Die entnommene Fortluft wurde nicht in den Kamin zurückgeführt, da dies baulich nicht vorgesehen ist. Die erste Messreihe wurde an Fortluft aus dem Kamin des Entwicklungslabors im Erdgeschoss („EG“), die anderen beiden Messreihen an Fortluft aus dem Kamin des Entwicklungslabors im ersten Obergeschoss („OG“) durchgeführt.



Abbildung 15: Aufbau der integralen und nuklidspezifischen Messtechnik bei IPR in zwei Perspektiven.

4.3.1.1 Parameter für die Berechnung der Transmissionsgrade

Beim IPR-Kamin ist eine dreistufige Filterung vorgeschaltet, sodass davon ausgegangen wird, dass die Fortluft frei von Schwebstoffen ist. Somit ist eine Verlustrechnung nicht notwendig. Die Ergebnisse, die in Kapitel 5.3.2 vorgestellt und in Kapitel 5.3.3 diskutiert werden, sind daher nicht korrigiert worden.

Aus Demonstrationszwecken wird in diesem Abschnitt dennoch die Vorgehensweise bei der Berechnung der Transmissionsgrade skizziert.

Da alle Messreihen konsekutiv ohne Abbau vorgenommen wurden, sind die Aufstellorte für alle drei Messreihen gleich. Die Aufstellung ist in Abbildung 15 gezeigt. Die Verlustfaktoren für beide Messkammern werden bestimmt. Folgende vereinfachte Aufstellgeometrie wird angenommen: 5 m vom Kamin zur Pumpe, von dort 1,5 m zur integralen Messkammer, danach ca. 2 m zur nuklidspezifischen Messkammer. Am Ein- und Auslass der integralen Messkammer sowie am Einlass der nuklidspezifischen Messkammer befinden sich außerdem Schlauchbögen. Daraus ergeben sich für Aerosole Transmissionsgrade von 24 % für die nuklidspezifische Messkammer und 56 % für die integrale Messkammer. Bei Staub sind es 2 % für die nuklidspezifische und 9 % für die integrale Messkammer.

Nach der DIN ISO 2889 [6] sind Messungen mit Transmissionsgraden, die kleiner als 50 % sind, im kerntechnischen Kontext nicht belastbar [10]. Hier sind die 50 % fast immer unterschritten, sodass keine belastbaren Aussagen zu Aktivitätshöhen getroffen werden können. Einzig bei der integralen Messkammer wird für Aerosole ein Transmissionsgrad von mehr als 50 % erreicht. Für die Abschätzung der Größenordnung wird die gemessene Aktivität nicht durch den Transmissionsgrad geteilt, um die tatsächliche Aktivität des Volumenstroms im Bereich der Probenentnahmesonde abzuschätzen, da die

Ergebnisse dann nicht mehr vergleichbar wären. Die Ergebnisse, die in Kapitel 5.3.2 vorgestellt und in Kapitel 5.3.3 diskutiert werden, enthalten diese Korrektur demzufolge nicht.

4.3.2 Ergebnisse

Der Untergrund bei dem integralen Messsignal lässt sich bei IPR, im Gegensatz zu FOR und JUM, sehr zuverlässig korrigieren, sodass das Signal-zu-Rausch-Verhältnis deutlich höher ist. Das kann möglicherweise dadurch begründet werden, dass sich der Kamin vom Entwicklungslabor bei IPR im ersten Stockwerk im Innern eines massiven Gebäudes befindet und nicht in einem Container aus Wellblech, wie es bei JUM und dem FOR-Kamin der Fall ist. Dadurch ist der Einfluss von Niederschlag deutlich geringer.

Aufgrund des besseren Signal-zu-Rausch-Verhältnis können in allen drei Messreihen der integralen Messtechnik Ableitungen in der Fortluft sehr gut verfolgt werden. Sogar geringe Aktivitätskonzentration können mit der Messtechnik tagesscharf detektiert werden. In Abbildung 16 sind die Spektren der drei Messreihen dargestellt.

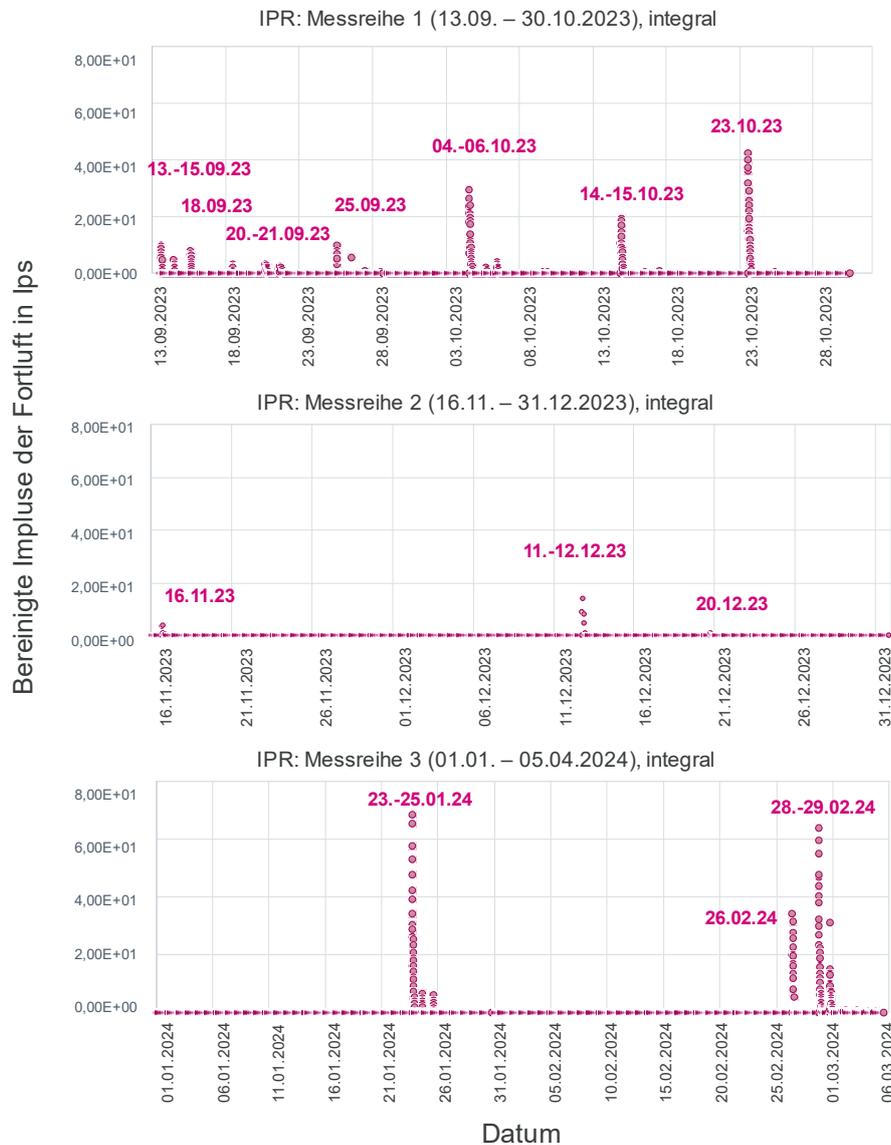


Abbildung 16: Messreihen 1 bis 3 bei IPR mit der integralen Messtechnik. Tage mit deutlichen Abgaben sind in der Grafik gekennzeichnet.

Neben der integralen Messtechnik wurde bei IPR auch die nuklidspezifische Messkammer an die Fortluft angeschlossen. Bei der Analyse der Gammaskpektren wurden die Radionuklide K-40, Ga-68, Tc-99m, In-111, Lu-177 sowie Bi-213 und Fr-221 (Tochternuklide von Ac-225) betrachtet. Neben dem natürlichen Radionuklid K-40, was über den gesamten Zeitraum oberhalb der NWG identifiziert werden konnte, wurde an fast allen Messtagen Ga-68 nachgewiesen. Während die Aktivitätskonzentration von K-40 konstant blieb, schwankte die Aktivitätskonzentration von Ga-68: an drei bis sechs Tagen pro Messreihe wurden deutlich erhöhte Aktivitätskonzentrationen aufgezeichnet. Von den anderen fünf Radionukliden wurde nur die EKG bestimmt, da diese über den gesamten Zeitraum nicht nachgewiesen werden konnten. Die Aktivitätskonzentration von Ga-68 für alle drei Messreihen ist in der Abbildung 17 dargestellt. Die Aktivitäten von K-40 sowie alle EKG der betrachteten Radionuklide sind im Anhang in Abbildung 32 einzusehen.

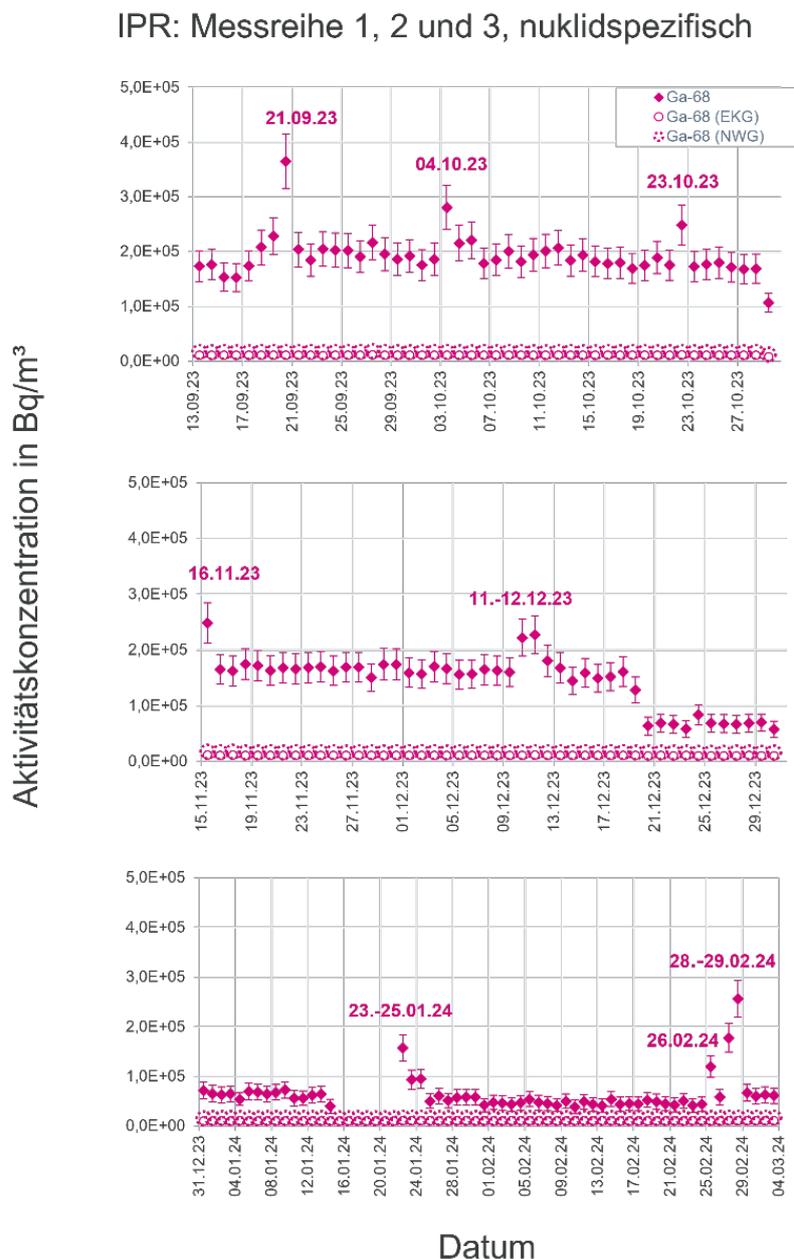


Abbildung 17: Messreihe 1 (oben), 2 (mittig) und 3 (unten) bei IPR mit der nuklidspezifischen Messtechnik. Aktivitätskonzentrationen (volle Rauten), NWG (gestrichelte leere Kreise) und EKG (kleine leere Kreise) des Radionuklides Ga-68 (rechts).

Für ausgewählte Tage mit hoher Ga-68 Aktivitätskonzentration erfolgte eine stündliche Auswertung. Durch diese ist ein Muster bei den Abgaben erkennbar. Über den Tag gibt es zu einer bestimmten Uhrzeit

ein Maximum, dann klingt das Signal stündlich ab. Ga-68 hat eine Halbwertszeit von ca. einer Stunde. Die Aktivitätskonzentration halbiert sich ungefähr nach ein bis zwei Stunden und pendelt sich dann bei der EKG ein. Es ist also anzunehmen, dass vor dem Maximum eine große Menge des Radionuklids produziert wurde, das zu medizinischen Zwecken zu einer festen Zeit abgeholt werden sollte. Ein Teil des Ga-68 ist in die Abluft übergegangen und konnte in der Fortluft bis zum vollständigen Abklingen nachgewiesen werden. Häufig sind die Verläufe sehr ähnlich, sodass auf einen üblichen Betriebsablauf aus dem Tagesgeschäft von IPR zu schließen ist. Ein solcher Verlauf ist in der Abbildung 18 exemplarisch dargestellt.

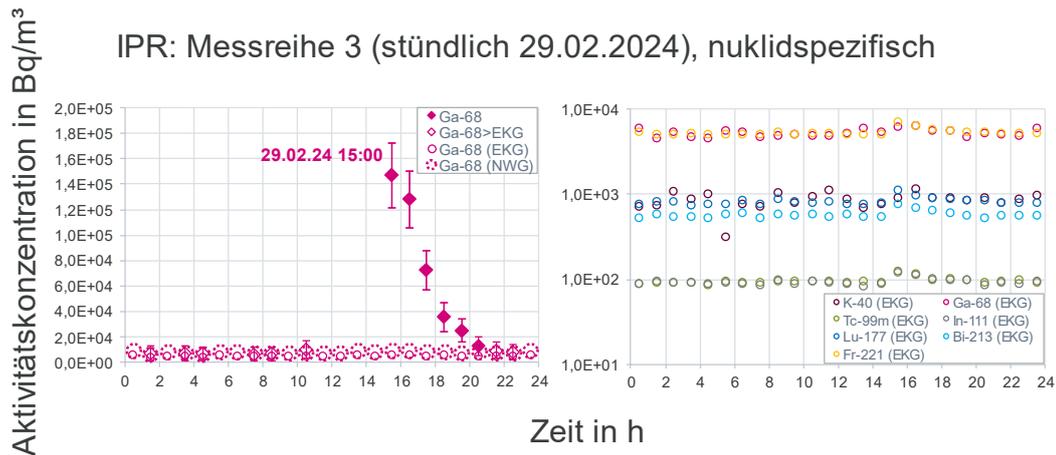


Abbildung 18: Messreihe 3 stündliche Auswertung vom 29.02.2024 bei IPR mit der nuklidspezifischen Messtechnik. Aktivitätskonzentrationen (volle Rauten), Messwerte oberhalb der EKG (leere Rauten), NWG (gestrichelte leere Kreise) und EKG (kleine leere Kreise) des Radionuklids Ga-68 (links). EKG aller sieben Radionuklide (rechts).

Wie in Abbildung 18 für einen Tag gezeigt, nimmt die Ga-68-Konzentration gegen 15 Uhr plötzlich zu und fällt anschließend ungefähr exponentiell ab. Insgesamt wurden 15 Tagesauswertungen im Verlauf der Messreihen 1 bis 3 vorgenommen. Bei den meisten Tagesspektren wurde zu einer bestimmten Uhrzeit eine maximale Abgabe von Ga-68 gemessen. In vielen Fällen war es um 14 Uhr oder um 11 Uhr, bei einigen wenigen Tagesspektren war es um 7 Uhr, 13 Uhr oder 15 Uhr. Über die anschließenden 3-5 Stunden klingt die Aktivität ab und pendelt sich bei der EKG von Ga-68 ein.

4.3.3 Diskussion

Bei IPR wurde die integrale mit der nuklidspezifischen Messkammer in Reihe angeschlossen, sodass ein Vergleich der Messtechnik über einen Zeitraum von knapp sechs Monaten möglich war. Zunächst ist auffällig, dass bei den integralen Messdaten ein sehr geringer Untergrund vorliegt und die einzelnen Abgaben sehr klar zu identifizieren sind. Aufgrund der höheren Betaenergie von Ga-68 von ca. 836 keV ist von einem hohen Ansprechvermögen der Proportionalzählrohre auszugehen. Zudem war die integrale Messkammer zuerst angeschlossen, sodass die Verluste geringer sein sollten als bei der nuklidspezifischen Messkammer.

Dennoch ist in den nuklidspezifischen Daten an fast jedem Tag eine Ga-68-Aktivität zu verzeichnen. Den Grund dafür vermutet DORNIER in der kurzen Halbwertszeit von Ga-68 von nur ca. 1 h, da durch die Halbwertszeitkorrektur bei der Auswertung mit InterWinner die Aktivität hier stark überschätzt wird. Dadurch können sehr kleine Peaks überbewertet werden. Darauf wird in Kapitel 6.1.3 näher eingegangen. Nur die Ausschläge, die eine höhere Ga-68-Aktivität als an den übrigen Tagen darstellen, werden daher näher untersucht. In den meisten Fällen gibt es unter dieser Annahme eine gute Korrelation zwischen den integralen und den nuklidspezifischen Messdaten.

Die Erhöhung der Aktivitätskonzentration in den integralen Messdaten kann durch die Auswertung der nuklidspezifischen Messdaten auf das Radionuklid Ga-68 zurückgeführt werden. Der Umgang mit Ga-68 wurde durch IPR bestätigt.

An vereinzelt Tagen kam es in den integralen Messdaten zu einem hohen Ausschlag, der in den nuklidspezifischen Daten nicht abgebildet wurde. An diesen Tagen können die Messsignale beider Messkammern nicht korreliert werden.

Leider sind die Messungen durch DORNIER nicht mit einem Umgang mit Y-90 bei IPR zusammengefallen. Demnach konnte nicht überprüft werden, ob ein indirekter Nachweis von Y-90 mit den verwendeten Messkammern möglich ist. Es wird vermutet, dass eine Y-90-Emission durch ein hohes Signal im integralen Messsystem, aber kein erhöhtes Messsignal im nuklidspezifischen Messsystem erkannt werden könnte. Es gab einen solchen Fall vom 14.10.2023 auf den 15.10.2023 zwischen 22 Uhr und 3 Uhr. Von IPR konnte in diesem Zeitraum kein Umgang und auch keine Abweichungen in der Luftführung o. ä. bestätigt werden, es wurde auch kein übermäßiger Niederschlag berichtet. Eine Erklärung für den hohen Ausschlag im integralen Messsystem konnte nicht gefunden werden. Die Daten sind im Anhang in Abbildung 33 dargestellt.

Bei der Auswertung der Demonstrationsrechnung des Transmissionsgrads von IPR waren geringe Transmissionsgrade aufgefallen. Diese sind auf die Geometrie des Raumes zurückzuführen, die es nicht zulässt, die Messkammern günstiger zu platzieren. Die Anschlüsse an die Kamine befinden sich in mehreren Metern Höhe, vor den Kaminen ist ein schmaler Durchgang, der nicht blockiert werden darf. Es ist demnach nicht möglich, eine Schlauchlänge von einigen Metern zu unterschreiten. Allerdings hätte die nuklidspezifische Messkammer andersherum positioniert werden können, sodass die Schläuche gerade anstatt im 180°-Bogen verlaufend an sie anschließen. Das hätte zu einer Erhöhung des Transmissionsgrads für die nuklidspezifische Messkammer von 24 % auf 37 % (für Aerosole) geführt. Dieser liegt jedoch immer noch unter den geforderten 50 %, sodass eine belastbare Aussage über Aktivitätshöhen nicht getroffen werden kann. Da jedoch aufgrund der Vollfilterung bei IPR keine Aerosole in der Fortluft zu erwarten sind, ist diese Betrachtung nicht weiter relevant für die Bewertung der Messergebnisse.

4.4 MED

Am untersuchten MED-Standort befinden sich zwei Kamine. Der Kamin der Jodstation ist auf dem Dachboden des Gebäudes der Nuklearmedizin angesiedelt. Er verfügt über eine Probenentnahmemöglichkeit, die von MED für diskontinuierliche Probenentnahmen zur Verifizierung der Filtereffizienz genutzt wird. Eine Probenentnahme im Rahmen des FV Fortluft wäre somit zwar grundsätzlich denkbar, allerdings kann das Obergeschoss lediglich über eine ca. 4 m lange Leiter oder per Kran über das angrenzende Dach erschlossen werden. Damit ist die Installation von großen Messkammern mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand verbunden. Weiterhin verfügt die Probenentnahmestelle über keinen Rechen, sodass nicht von einer repräsentativen Probenentnahme im Sinne der DIN ISO 2889 ausgegangen werden kann.

Der Kamin des Heißlabors befindet sich im selben Gebäude auf einer anderen Etage. Um ihn zu erreichen, muss eine kurze Leiter und ein ca. 100 m langer Korridor mit mehreren Störkanten (hohe Stufen, niedrige Durchgänge) überwunden werden. Die Abluft wird mit einem Filtersystem gereinigt, eine messtechnische Überwachung erfolgt nicht. Eine Probenentnahmevorrichtung ist nicht vorhanden.

Die Installation einer Bypass-Messkammer an den MED-Kaminen scheint baulich nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand umsetzbar. Da eine schlechte Zugänglichkeit bei einer Vielzahl der zu kontrollierenden Einrichtungen anzunehmen ist, wurde am Beispiel von MED die Möglichkeit einer Messtechnik getestet, die ohne eine Probenentnahme auskommt. Dazu wurde auf mobile Messgeräte mit minimaler Infrastruktur zurückgegriffen. An der Außenseite des jeweiligen Kamins wurde mit handgehaltenen Messgeräten (Falcon und RadHAND) die Gammastrahlung gemessen. Durch die schlechte Internetverbindung in den Räumlichkeiten war eine Verbindung zur Datenbank mit dem RadHAND nicht immer möglich. Somit konnten Messungen manchmal erst zeitverzögert gestartet werden, da die Verbindung zur Datenbank notwendig ist, um sich zu authentifizieren und die Messungen abspeichern zu können.

Bei MED wurden zu insgesamt fünf Zeiträumen gemessen:

- Am Kamin der Jodstation an insgesamt sieben Tagen:
 - a) vom 22.01.2024 bis 25.01.2024
 - b) vom 27.02.2024 bis 29.02.2024 sowie zusätzlich
 - c) eine Langzeitmessung mit dem Falcon vom 29.02.2024 bis 08.04.2024.

Am Kamin des Heißlabors ebenfalls an insgesamt sieben Tagen:

- a) vom 08.04.2024 bis 10.04.2024
- b) vom 18.04.2024 bis 19.04.2024 und
- c) vom 16.07.2024 bis 17.07.2024 sowie zusätzlich
- d) Langzeitmessungen mit dem Falcon vom 10.04.2024 bis 18.04.2024, vom 17.07.2024 bis 18.07.2024, vom 23.07.2024 bis 31.07.2024 und vom 31.07.2024 bis 22.08.2024.

4.4.1 Verwendete Messtechnik

Auf der MED-Jodstation wird mit den Radionukliden I-131, Lu-177 und Ac-225 umgegangen, wobei nur bei Jod aufgrund seiner Eigenschaften und seines Umgangs mit einem signifikanten Übergang in die Abluft und dadurch mit einem messbaren Beitrag in der Fortluft gerechnet wird. Im Heißlabor wird mit den Radionukliden Y-90, Tc-99m, I-123, I-131, Er-169, Re-186, Ra-223 und Ac-225 umgegangen, sodass diese Radionuklide in der Fortluft vorkommen können. Bis auf die Radionuklide Y-90 und Er-169 verfügen alle anderen Radionuklide oder deren Tochternuklide über Gammalinien mit einer Effizienz, die einen messtechnischen Nachweis realistisch erscheinen lässt.

An beiden Kaminen wurden die handgehaltenen Messgeräte Falcon 5000 und RadHAND eingesetzt. Aufgrund der größeren Beweglichkeit der handgehaltenen Messgeräte gegenüber den Messkammern wurden jeweils der Abstand und der Winkel zum Kamin dokumentiert.



Abbildung 19: Aufbau des Falcon 5000 und des RadHAND für die Messung des Fortluftkamins der MED-Jodstation. Links: Senkrecht zum Fortluftkanal. Rechts: Unter einem Winkel von ca. 45°.



Abbildung 20: Aufbau der Messtechnik am MED-Fortluftkamin des Heißlabors.

4.4.2 Ergebnisse

In der Auswertung wird zwischen beiden MED-Kaminen klar unterschieden, da jeder Kamin einen unabhängigen Bereich abdeckt.

Die Auswertung der Impulshöhenspektren des Falcon erfolgte mit der Software Genie 2000. Dafür wurden vorab in ISOCS drei verschiedene Messgeometrien, die die Abstände und Winkel des Detektors sowie die Maße, Formen und Materialien des Kamins berücksichtigen, erstellt und hinterlegt. Anhand dieser rechnerisch vorgenommenen Effizienzkalibrierung konnten Aktivitätskonzentrationen bestimmt werden.

Die Auswertung der Messungen mit dem RadHAND erfolgt automatisch mit der implementierten Software. Aufgrund der offline-Messungen wurde das Radionuklid, das nach Ende der Messdauer im Display angezeigt wurde, notiert.

Messergebnisse mit dem Falcon 5000

Da in der Messsoftware des Falcon keine 10-Minuten-Messintervalle hinterlegt sind, war bei der Langzeitmessung keine Zeitauflösung möglich. Somit können bei den identifizierten Radionukliden der Zeitpunkt oder die Dauer der Detektion nicht bestimmt werden.

Neben Messungen am Kamin wurden auch Untergrundmessungen sowie Messungen an der Abluft und an der Filterstrecke vorgenommen, um die Empfindlichkeit des Detektors bei der Messung an der Außenseite des Kamins zu bewerten. Während der gesamten Messdauer waren Jod- und Lutetium-Patienten auf der Station. Bei fast jeder Messanordnung wurden mit dem Falcon die Radionuklide K-40 und I-131 nachgewiesen. Einzig bei der Messung der Abluft vor der Filteranlage im Heißlabor wurde kein I-131 detektiert. In manchen Messreihen liegen nur vereinzelte Messwerte vor, in anderen wurde in jeder oder fast jeder Einzelmessung I-131 nachgewiesen und diese Ergebnisse statistisch ausgewertet. Der Mittelwert und die Standardabweichung wurden ermittelt, außerdem wurde aus den von Genie 2000 bei der Auswertung ausgegebenen Unsicherheiten der Maximalwert bestimmt.

In Abbildung 21 sind die Messwerte der Jodstation für K-40 und I-131 dargestellt. Einzelne Messwerte für Lu-177 und Ra-223 sowie die NWG aller betrachteten Radionuklide sind im Anhang in Abbildung 34 gezeigt.

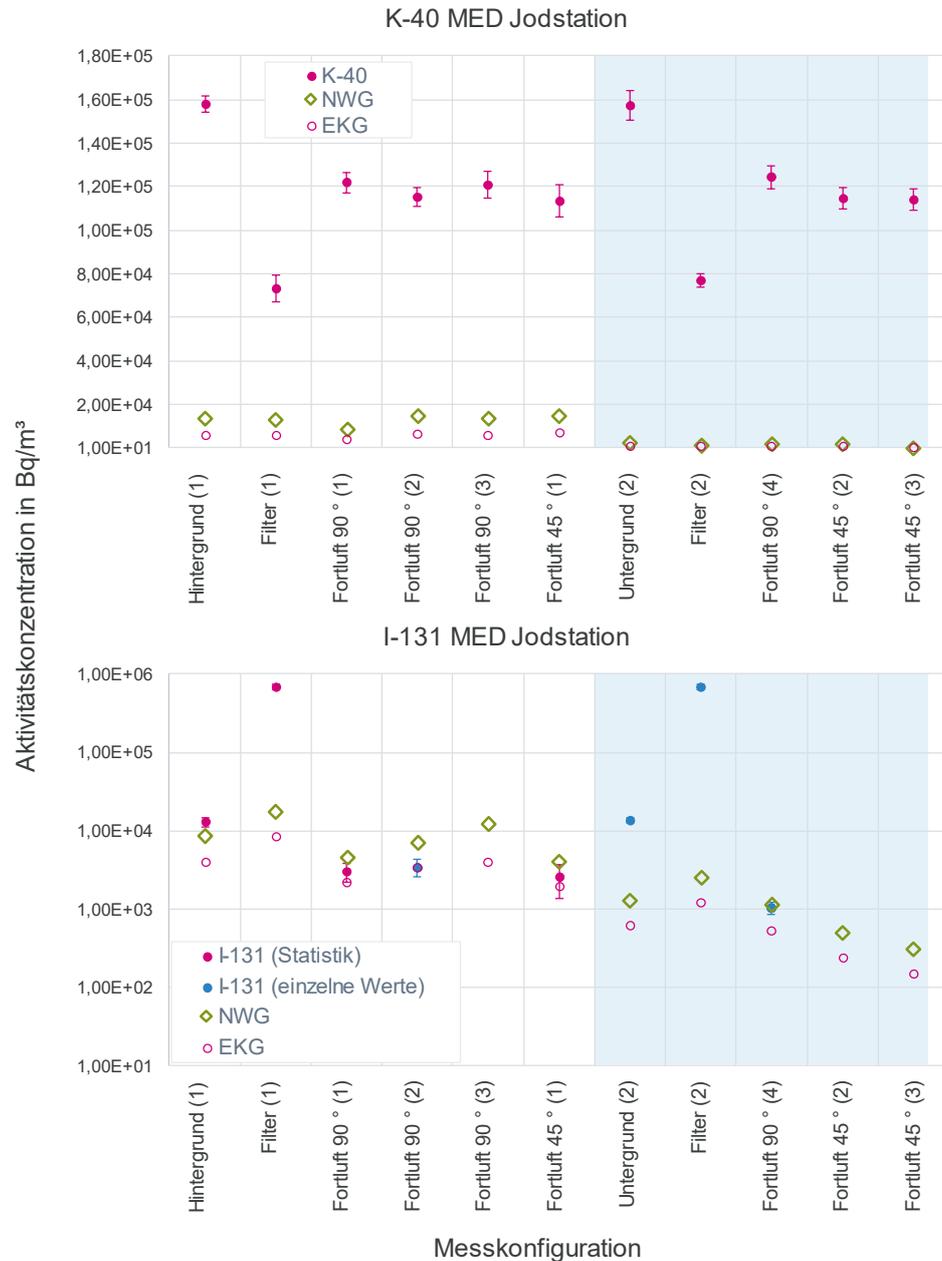


Abbildung 21: Aktivitätskonzentrationen am Kamin der MED-Jodstation, die mit dem Falcon 5000 gemessen wurden, dargestellt für einzelne Radionuklide. Oben: K40; unten: I-131. Auf der Abszissenachse sind die Messkonfigurationen aufgeführt. Daten von Langzeitmessungen sind blau unterlegt.

In Abbildung 21 sind die Ergebnisse der mit Genie 2000 ausgewerteten Messungen des Falcon am Kamin der Jodstation dargestellt. Das obere Diagramm in Abbildung 21 zeigt die gemessenen K-40-Aktivitätskonzentrationen, die sich aufgrund der Anordnung des Detektors im Raum voneinander deutlich unterscheiden. Werden Messungen in derselben Position des Messgeräts betrachtet, sind die gemessenen Aktivitätskonzentrationen im Rahmen ihrer Unsicherheiten gleich.

Im unteren Diagramm in Abbildung 21 ist die Aktivitätskonzentration von I-131 halblogarithmisch aufgetragen, um die Messergebnisse miteinander vergleichen zu können. Messwerte, die bei mehreren Messungen der gleichen Messreihe als statistische Mittelwerte erhoben wurden, sind dabei magenta gefärbt. Die Unsicherheit entspricht dem Maximum aus Standardabweichung und größtem Einzelfehler. Bei den Messreihen, bei denen nur in wenigen Einzelmessungen I-131 nachgewiesen wurde, wurde der maximale Wert mit seiner Unsicherheit aus der Genie-Ausgabe dargestellt. Als offene Rauten ist die NWG abgebildet, die EKG als offene Kreise. Für I-131 finden sich nur wenige Messwerte oberhalb der NWG.

Bei den Langzeitmessungen, die in der Abbildung blau unterlegt sind, ist gut erkennbar, dass die NWG für I-131 deutlich verringert werden kann. Hier liegen die Messwerte dann deutlich oberhalb der NWG. Entsprechend sind die Fehler, die für jeden Messwert ausgegeben werden, deutlich niedriger. Die höchste Aktivitätskonzentration für I-131 wird bei der Messung des Filters der Jodstation erreicht. Bei Fortluftmessungen werden für I-131 Aktivitätskonzentrationen zwischen $1\text{E}+03$ Bq/m³ und $3\text{E}+03$ Bq/m³ erreicht. Die festgestellten Aktivitätskonzentrationen am Fortluftkanal fallen geringer aus bei der Untergrundmessung.

Im Anhang in Abbildung 34 sind im oberen Diagramm die Aktivitätskonzentrationen von Ra-223 dargestellt. Während der Messzeiträume wurde bei MED jedoch nicht mit Ra-223 umgegangen. Dennoch liegen die gemessenen Aktivitätskonzentrationen oberhalb der NWG. Im mittleren Diagramm sind Messwerte für Lu-177 dargestellt. Das untere Diagramm zeigt alle NWG der Aktivitätskonzentrationen aller betrachteten Radionuklide. Es ist wieder zu beobachten, dass die NWG bei den Langzeitmessungen deutlich gegenüber den kürzeren Messungen verringert sind.

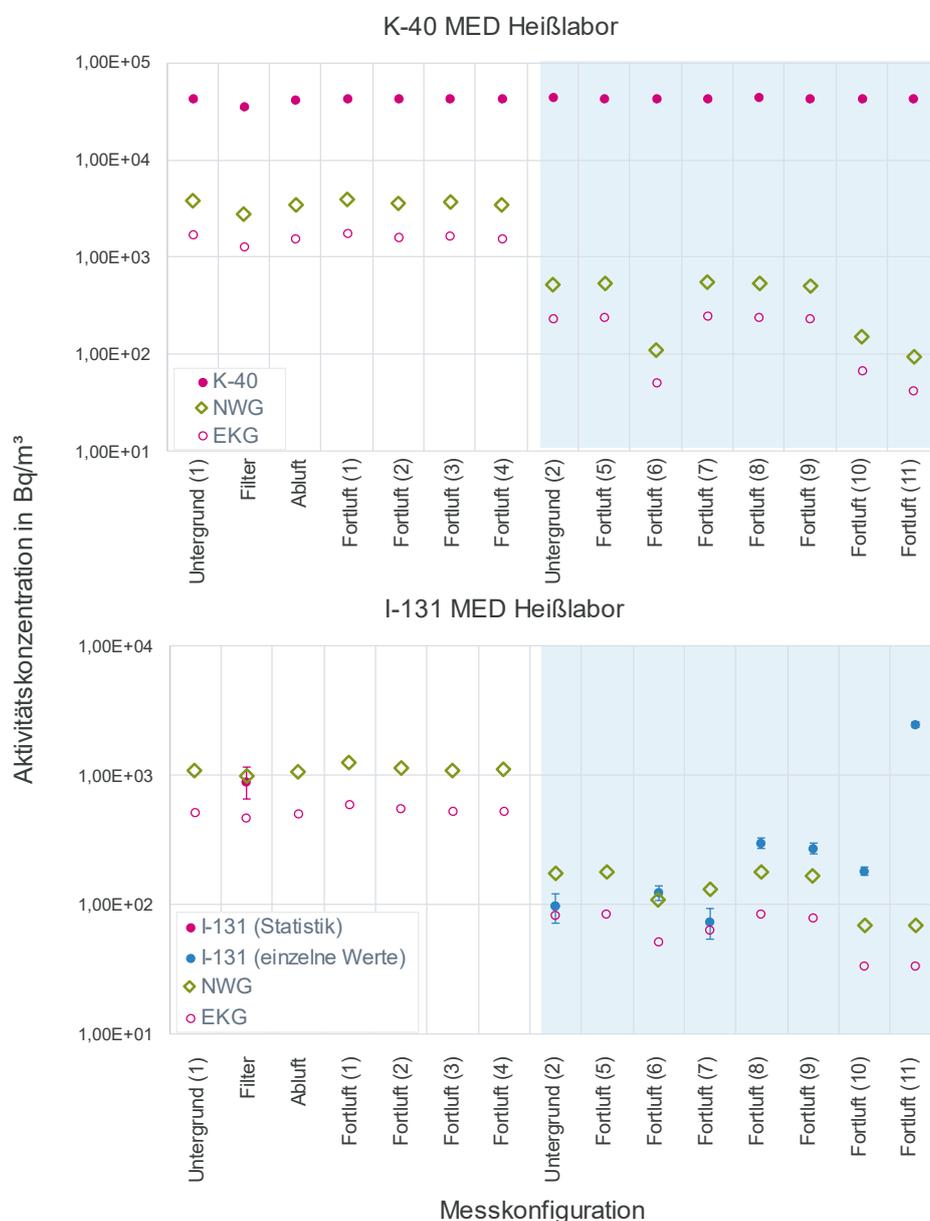


Abbildung 22: Aktivitätskonzentrationen am MED-Kamin des Heißlabors, die mit dem Falcon 5000 gemessen wurden, dargestellt für einzelne Radionuklide. Oben: K 40; unten: I 131. Auf der Abszissenachse sind die Messkonfigurationen aufgeführt. Daten von Langzeitmessungen sind blau unterlegt.

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse der mit Genie 2000 ausgewerteten Messungen des Falcon am Kamin des MED-Heißlabors dargestellt. Im oberen Diagramm ist die gemessene K40-Aktivitätskonzentration dargestellt. Die nahezu gleichen Aktivitätskonzentrationen sind darauf zurückzuführen, dass immer der gleiche Abstand zu Boden und Decke eingehalten wurde. Im unteren Diagramm sind die Aktivitätskonzentrationen von I-131 wie bereits in Abbildung 21 halblogarithmisch dargestellt. Auch hier liegen nur wenige Aktivitätskonzentrationen oberhalb der NWG; selbst bei den Langzeitmessungen ist dies nicht immer der Fall. Bei den Fortluftmessungen werden für I-131 Aktivitätskonzentrationen zwischen $7E+01$ Bq/m³ und $2E+03$ Bq/m³ erreicht.

Im Anhang in Abbildung 35 sind die Messdaten von Ra-223 und Lu-177 sowie die NWG aller betrachteten Radionuklide dargestellt.

Messergebnisse mit dem RadHAND

Mit dem RadHAND war keine nachträgliche Nuklididentifikation oder aufwendige Auswertung notwendig, da das Messgerät an seinem Bildschirm automatisch nach Messende die identifizierten Radionuklide ausgibt. In den meisten Fällen wurde lediglich NORM bzw. K-40 identifiziert. In Einzelfällen wurde bei Filter- und Abluftmessungen im Kamin der Jodstation auch I-131 angezeigt. Am Kamin des Heißlabors wurde einmal zusätzlich zu K-40 noch Ba-133 angezeigt.

4.4.3 Diskussion

Die K-40-Aktivitätskonzentrationen entsprechen keiner tatsächlichen Aktivitätskonzentration in der Fortluft, sondern sind durch die Baustoffe des Gebäudes begründet. Die K-40-Messung ist ein guter Indikator dafür, dass die Energiekalibrierung korrekt ist, und erlaubt es, systematische Fehler in der Auswertung zu identifizieren. In den Ergebnissen der Jodstation, die in Abbildung 21 gezeigt werden, ist deutlich zu erkennen, dass die „K-40-Aktivitätskonzentration“ des Filters der Jodstation am geringsten und die des Untergrunds am höchsten ist. Das liegt an den unterschiedlichen Abständen und Winkeln des Detektors zu den Raumwänden, die vermutlich den höchsten Beitrag zur K-40-Aktivität liefern. Bei der Messung des Filters lag ein Abstand von mehreren Metern zur nächsten Wand vor und der Detektor wurde recht hoch über dem Boden platziert. Bei der Messung des Untergrunds stand der Falcon am Boden, bei den anderen Messungen auf einem Tritt, sodass die mineralische Struktur bei der Untergrundmessung deutlich näher am Detektor war und dadurch deutlicher wahrgenommen wurde. Weiterhin wurden für die Untergrund- und Filtermessungen keine Geometrien erstellt, sodass die Umrechnung von Impulsen zu Aktivitätskonzentration Untergrundeffekte nicht mit abbildet. Die Messwerte liegen deutlich oberhalb der NWG.

Die Ergebnisse der Messung von I-131 zeigen, dass I-131 oft nachgewiesen werden konnte. Die Messung am Abluftfilter der Jodstation zeigt einen Messwert, der um mehrere Größenordnungen oberhalb der anderen Messwerte liegt. Allerdings war es bei der Messung am Abluftfilter des Kamins des Heißlabors nicht möglich, I-131 oberhalb der NWG nachzuweisen, da im beobachteten Zeitraum im Heißlabor nicht mit I-131 umgegangen wurde. Die Messergebnisse des Untergrunds am Kamin der Jodstation fallen höher aus als am Fortluftkanal, das liegt in der Positionierung des Detektors begründet. Obwohl der Filter ca. 8 m entfernt war, wird hier eine Einstrahlung durch den Filter vermutet, da ohne Abschirmung gearbeitet wurde.

In der 4. Messreihe an der Fortluft des Heißlaborkamins wurde im Heißlabor mit I-131 umgegangen, es konnte jedoch kein I-131 in der Fortluft nachgewiesen werden. Es ist möglich, dass das I-131 effektiv gefiltert wird und eine Remobilisierung mehrere Tage benötigen würde.

Für die einmalige Messung von Ba-133 mit dem RadHAND gibt es bislang lediglich Erklärung, dass die Ba-Linie mit einer Jod-Linie verwechselt wurde. Da das Messergebnis nicht reproduziert werden konnte und zwischen den jeweiligen Linien nur 10 keV Differenz besteht, wird davon ausgegangen, dass es sich um eine Fehlinterpretation des Messgerätes handelt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Messergebnisse mit dem Falcon genauer waren als mit dem RadHAND, was an den unterschiedlichen Detektortypen liegt. Trotzdem war es mit keinem der beiden Messsysteme möglich, Radionuklide in der Fortluft sicher festzustellen, abgesehen von Langzeitmessungen, die mehrere Tage oder Wochen dauerten.

Die hohen NWG können bei der Nuklididentifikation hinderlich sein. Durch längere Messdauern ließe sich die NWG senken, jedoch erfolgen die Abgaben in kurzen Zeiträumen, sodass bei langen Messdauern die

Annahme der homogenen Verteilung nicht mehr gegeben ist. Da keine Bypass-Messung mit vertretbarem Aufwand möglich war, sah DORNIER die verwendete Messmethodik dennoch als interessant an, da sie eine attraktive Alternative zu teuren Umbauten darstellt. Durch das täglich wechselnde Nuklidinventar in den Kaminen und die unbekannte Driftgeschwindigkeit durch den Filter ist eine Zuordnung zu Arbeiten im Labor kaum möglich. Beim Kamin des Heißlabors stand der Filter direkt neben dem Kaminrohr, sodass durch den geringen Abstand mit unerwünschter Einstrahlung zu rechnen war. Aus diesem Grund wurde der Falcon 5000, der mit einem 90 °-Kollimator ausgestattet ist, so positioniert, dass die Einstrahlung möglichst nicht in den Öffnungswinkel des Detektors fällt.

Bei Langzeitmessungen am Kamin des Heißlabors wurde mehrfach Ra-223 festgestellt, obwohl nach Angaben von MED in diesen Zeiträumen nicht mit Ra-223 umgegangen wurde. Dieses Phänomen kann zum aktuellen Zeitpunkt nicht erklärt werden.

5 AP3: Vergleich und Bewertung der Messstrategien

Im AP3 werden die von DORNIER erbrachten Messungen und die erfassten Radionuklide mit den Ergebnissen der Eigenüberwachung der Einrichtungen verglichen, sofern diese vorliegen. Zusätzlich werden die Unsicherheitsbudgets beschrieben und die charakteristischen Grenzen nach DIN EN ISO 11929 [7] bestimmt.

Bezüglich der Eigenüberwachung lagen DORNIER Angaben mit sehr unterschiedlichem Umfang vor. Von JUM und FOR gab es ausführliche Messdaten und Angaben.

Bei IPR konnte durch einen Messgeräteausfall die Eigenüberwachung, die genau in der Mitte der Messreihen von DORNIER gelegen hätte, nicht durchgeführt werden. MED führt keine eigenen Messungen durch, hier kann lediglich mit den Aktivitätshöhen der gehandhabten Radionuklide verglichen werden.

5.1 Vergleich der vom Forschungsnehmer erhaltenen Messergebnisse mit betreibereigenen Messungen

Für den Vergleich der von DORNIER durchgeführten Messungen mit den betreibereigenen Messungen wurde bei den Einrichtungen die entsprechenden Daten angefragt. Die erhaltenen Messdaten wurden mit den erhobenen Daten hinsichtlich der Höhe der Ableitung, der Tage der Ableitung und der nachgewiesenen Radionuklide verglichen. Zusätzlich wurde anhand des Fortluftgesamtstroms und der gemessenen Aktivitätskonzentration die mit der Fortluft abgeleitete Aktivität bestimmt und mit der umgegangenen Aktivität verglichen.

5.1.1 JUM

Die Fortluft von JUM wird vor Ort kontinuierlich mittels eines Jodmonitors BAI 9103-4 (Berthold Technologies) überwacht. Dabei ist eine stundenscharfe Überwachung der radioaktiven Jodisotope möglich. Die Jodmonitordaten wurden DORNIER für den Vergleich der Daten zu Verfügung gestellt. In Abbildung 23 sind im oberen Diagramm die Messdaten der Eigenüberwachung zum Zeitpunkt der Messreihe 1 und im unteren Diagramm die zum Zeitpunkt der Messreihe 2 gezeigt.

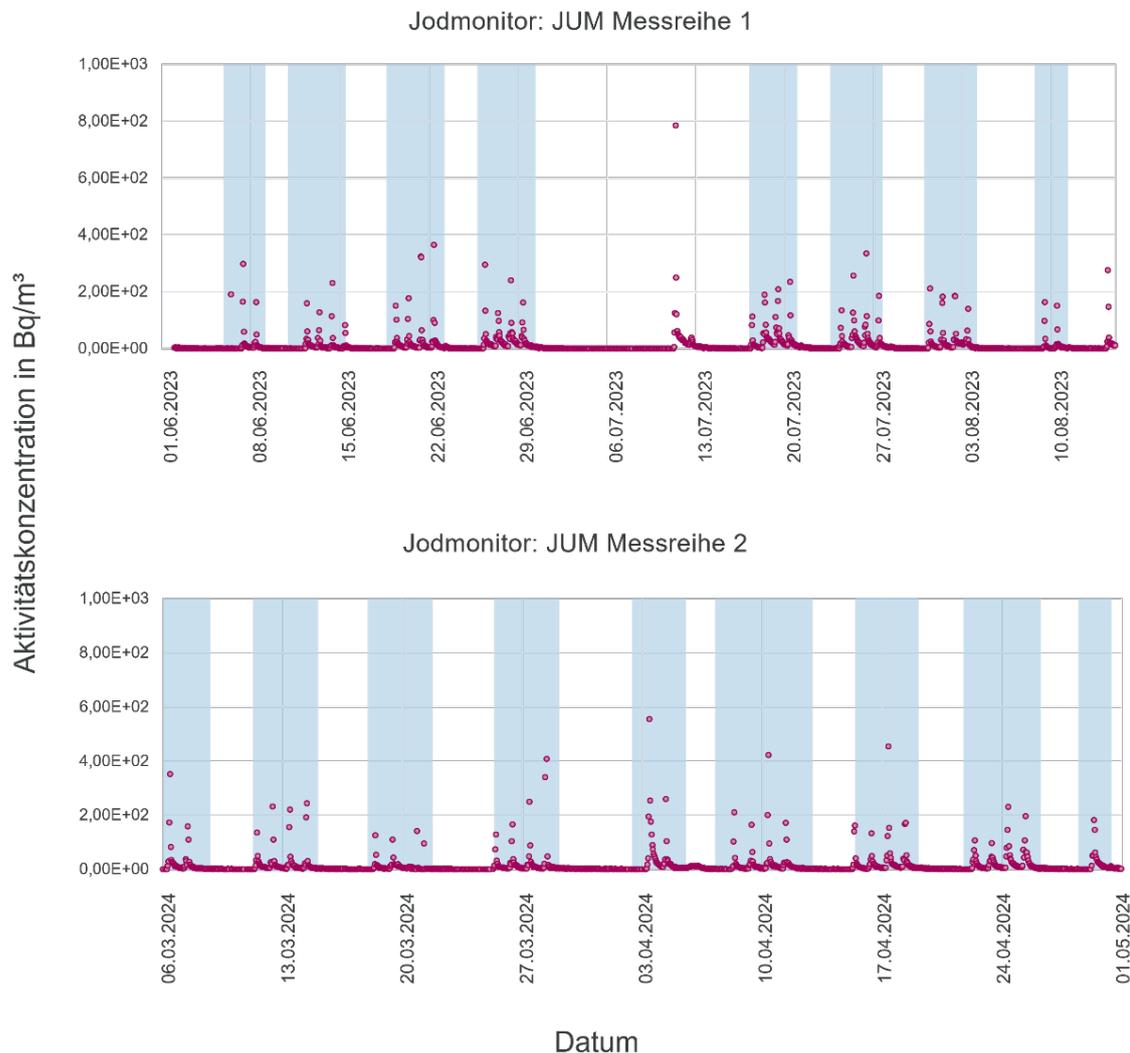


Abbildung 23: Jodmonitoring von JUM während der Messreihe 1 bzw. Messreihe 2.

Bei den Jodmonitormessdaten ist das Signal-zu-Rausch-Verhältnis deutlich niedriger als bei den integralen Messdaten. Bei den betreibereigenen Messungen sind Tage mit hoher Aktivitätskonzentration deutlich erkennbar.

Vergleich der Höhen der Aktivitätskonzentrationen

Bei den betreibereigenen Messungen liegen die aus den Impulshöhenspektren des Jodmonitors ermittelten Aktivitätskonzentrationen im Größenordnungsbereich von $2\text{E}+02$ Bq/m³ bis $4\text{E}+02$ Bq/m³. Für einzelne Tage werden Werte in Höhe von bis zu $8\text{E}+02$ Bq/m³ berichtet. Bei den Messungen mit der integralen Messkammer des BfS liegt das Untergrundsignal ebenfalls in dieser Größenordnung. Aktivitätskonzentrationen bis zu $2,5\text{E}+03$ Bq/m³ bezogen auf den Kalibrierfaktor von Xe-133 werden beobachtet. Ein genauer Vergleich ist nicht möglich, da I-123 und I-125 über Elektroneneinfang zerfallen und daher über keine Betaemissionsenergie verfügen [8]. Die eingesetzte Messtechnik ist nicht auf diese Radionuklide bzw. diese Zerfallsart optimiert.

Bei den Messungen mit der nuklidspezifischen Messkammer liegen die aus den Impulshöhenspektren ermittelten Aktivitätskonzentrationen höher. Für I-125 liegt bereits die NWG der Aktivitätskonzentration bei $4\text{E}+04$ Bq/m³. Fast alle festgestellten Messwerte lagen im Bereich der EKG oder der NWG. Für I-123 ist die NWG deutlich niedriger, sie liegt bei ungefähr $4\text{E}+01$ Bq/m³. Die höchste ermittelte Aktivitätskonzentration beträgt $1,5\text{E}+02$ Bq/m³, was dem Größenordnungsbereich der Messungen aus der Eigenüberwachung entspricht. Es kann geschlussfolgert werden, dass die Messungen mit der nuklidspezifischen Messkammer bei I-123 Ergebnisse im zu erwartenden Bereich liefern und die

Größenordnung der Abgabe richtig abgeschätzt werden kann. Die betreibereigenen Messungen sind den von DORNIER gewonnenen Messdaten in Abbildung 24 gegenübergestellt.

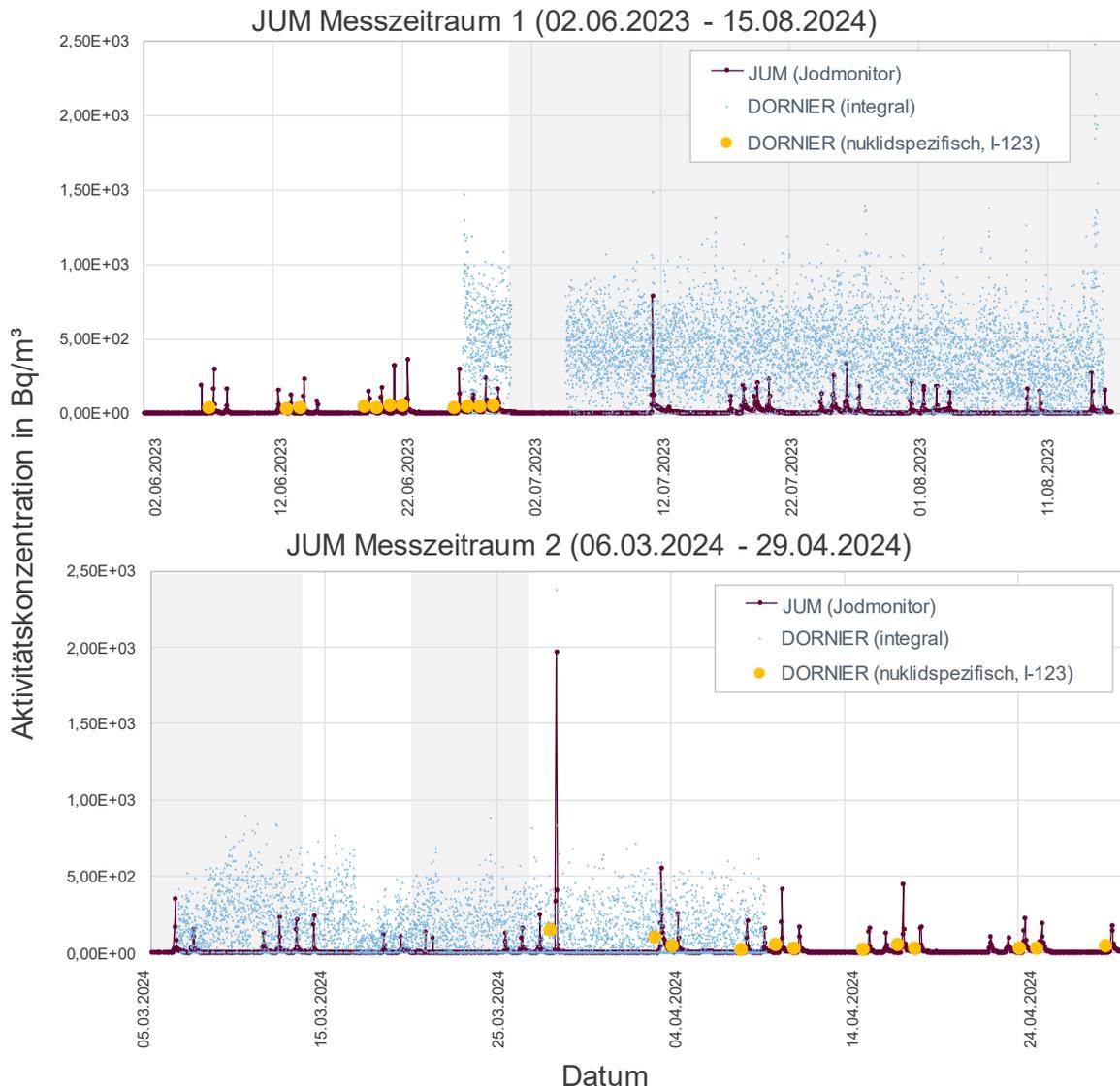


Abbildung 24: Gegenüberstellung der betreibereigenen (JUM) und der durch DORNIER ermittelten Impulshöhenspektren. Zeiträume, in denen die nuklidspezifische Messtechnik nicht in Verwendung war, sind grau unterlegt.

In den betrachteten Messzeiträumen wurde die integrale Messtechnik für wenige Tage abgeschaltet und später abgebaut, sodass die integralen Messdaten nicht den gesamten Messzeitraum abbilden. Das gleiche gilt für die nuklidspezifischen Messdaten. Tage, an denen die nuklidspezifische Messkammer nicht eingeschaltet war, sind in Abbildung 24 grau unterlegt. Für die integralen Messdaten werde die bereinigten Impulse der Fortluft, die in Abbildung 10 dargestellt sind, mit dem Kalibrierfaktor für Xe-133 zu Aktivitätskonzentrationen umgerechnet.

Es ist deutlich zu erkennen, dass weder die integralen noch die nuklidspezifischen Messdaten die Auflösung der Messdaten des Jodmonitors erreichen. Die integralen Messdaten sind durch den hohen Untergrund so verrauscht, dass keine belastbare Aussage zu Ableitungszeiträumen oder der Ableitungshöhe getroffen werden kann. In beiden Messzeiträumen gibt es Tage, an denen keine Produktion stattfand, jedoch hohe Aktivitäten verzeichnet worden sind (beispielsweise am 06.08.2023 oder am 10.03.2024). Anhand der integralen Messdaten ist keine qualitative oder quantitative Aussage über die Abgaben bei JUM möglich. Mit den nuklidspezifischen Messdaten können die Ableitungszeiträume entsprechend der Betreiberangaben und der Daten des Jodmonitors gut verifiziert werden, da die Tage an denen produziert wurde (und an denen mit dem nuklidspezifischen Messsystem

gemessen wurde) verlässlich identifiziert werden. Allerdings lässt sich die Ableitungshöhe oder deren Verlauf entsprechend der Jodmonitordaten nicht reproduzieren. Bildet man aus den JUM-Daten einen Tages-Mittelwert, so sind die Höhen der Abgaben jedoch vergleichbar. Das ist in Abbildung 25 dargestellt.

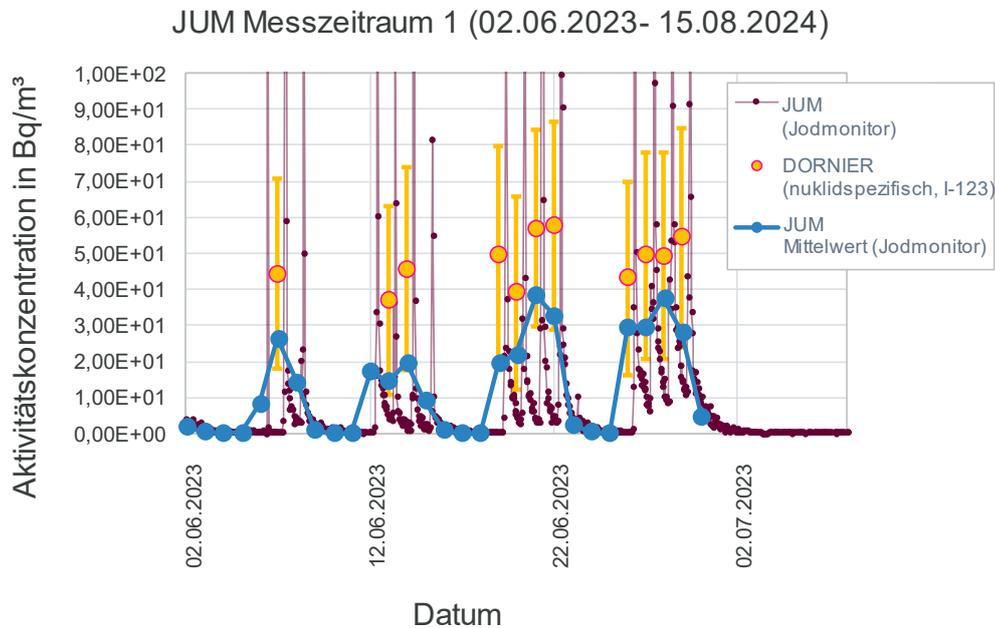


Abbildung 25: Darstellung der Jodabgaben, die von JUM berichtet wurden, gemeinsam mit ihren Tagesmittelwerten im Vergleich zu den Tageswerten, die DORNIER bestimmt hat.

Abbildung 25 zeigt, dass die Daten, die DORNIER mit der nuklidspezifischen Messkammer erhoben hat, innerhalb ihrer Unsicherheiten mit den Daten von JUM übereinstimmen. Es wurde jedoch nicht an allen Tagen, an denen von JUM eine Abgabe festgestellt wurde, auch im nuklidspezifischen Messplatz ein Messsignal zugeordnet. Andererseits gibt es keine Tage, an denen fälschlicherweise eine Abgabe gemessen worden ist, die nicht bestätigt werden konnte. Offenbar ist eine Mindest-Abgabemenge notwendig, damit die Aktivität mit dem nuklidspezifischen Messsystem erfasst werden kann. In Tabelle 6 sind die relevanten Werte aus Abbildung 25 aufgeführt.

Tabelle 6: Gegenüberstellung der Tagesmittelwerte der gemessenen Jodabgaben, durch JUM (Jodmonitor) und durch DORNIER (nuklidspezifische Messkammer, I-123) messtechnisch bestimmt. Die Unsicherheiten bei DORNIER entsprechen den Fehlerangaben aus der Auswertung mit Interwiner. An Tagen, an denen keine Aktivitätskonzentration oberhalb der EKG festgestellt wurde, sind die NWG in Doppelklammern angegeben.

Datum	Tagesaktivität JUM in Bq/m ³	Tagesaktivität DORNIER in Bq/m ³
06.06.2023	8,14E+00	((2,7E+01))
07.06.2023	2,64E+01	(4,4 ± 2,6)E+01
08.06.2023	1,43E+01	((2,6E+01))
12.06.2023	1,73E+01	((2,6E+01))
13.06.2023	1,46E+01	(3,7 ± 2,6)E+01
14.06.2023	1,97E+01	(4,6 ± 2,8)E+01
15.06.2023	9,07E+00	((2,7E+01))
19.06.2023	1,94E+01	(4,9 ± 3,1)E+01
20.06.2023	2,19E+01	(3,9 ± 2,7)E+01
21.06.2023	3,84E+01	(5,7 ± 2,7)E+01
22.06.2023	3,29E+01	(5,8 ± 2,9)E+01
26.06.2023	2,97E+01	(4,3 ± 2,7)E+01
27.06.2023	2,97E+01	(5,0 ± 2,9)E+01
28.06.2023	3,75E+01	(4,9 ± 2,9)E+01
29.06.2023	2,83E+01	(5,4 ± 3,0)E+01

Vergleich der abgegebenen Aktivität mit der gehandhabten Aktivität

Für die Rechnungen wurde das gesamte Volumen des Fortluftstroms von 6020 m³/h für Messreihe 1 und 6360 m³/h für Messreihe 2 herangezogen und anhand der gemessenen Aktivitätskonzentrationen die gesamte abgegebene Aktivität hochgerechnet. Diese Rechnungen sind nur als Abschätzungen gedacht, da nicht bekannt ist, wie hoch der schwebstoffgebundene Anteil des Jods ist und somit der Transmissionsgrad nicht miteinbezogen werden kann.

Während der Messreihe 1 wurde bei JUM 15-mal mit einer I-123-Aktivität von jeweils 100 GBq bis 300 GBq pro Tag umgegangen. Verwendet man die betreibereigenen Daten, so werden in diesen Zeiträumen 13 MBq/h abgegeben. Mit den Ergebnissen des integralen Messsystems werden bis zu 10 MBq/h und mittels der Ergebnisse des nuklidspezifischen Messsystems bis zu 0,35 MBq/h in der Fortluft wiedergefunden. Bei den nuklidspezifischen Daten wurde lediglich die I-123-Aktivität betrachtet.

Während der Messreihe 2 wurde bei JUM 28-mal mit einer I-123-Aktivität von jeweils 1000 MBq/h bis 3000 MBq/h umgegangen. Verwendet man die betreibereigenen Daten, so werden in diesen Zeiträumen 17 MBq/h abgegeben. Davon wurden mittels der Ergebnisse des integralen Messsystems bis zu 45 MBq/h und mittels der Ergebnisse des nuklidspezifischen Messsystems bis zu 0,99 MBq/h in der Fortluft wiedergefunden. Wie schon in der ersten Messreihe wurde auch hier lediglich die I-123-Aktivität aus den gammaspektrometrischen Daten verwendet.

5.1.2 FOR

Die Fortluft von FOR wird mittels eines Gasmonitors und eines C-14-Sammlers überwacht. Die Eigenüberwachungsdaten des Gasmonitors wurden DORNIER von FOR für den Vergleich der Daten zu Verfügung gestellt. In der Abbildung 26 sind die betreibereigene Messung im selben Zeitraum wie die der Messreihen 1-3 dargestellt.

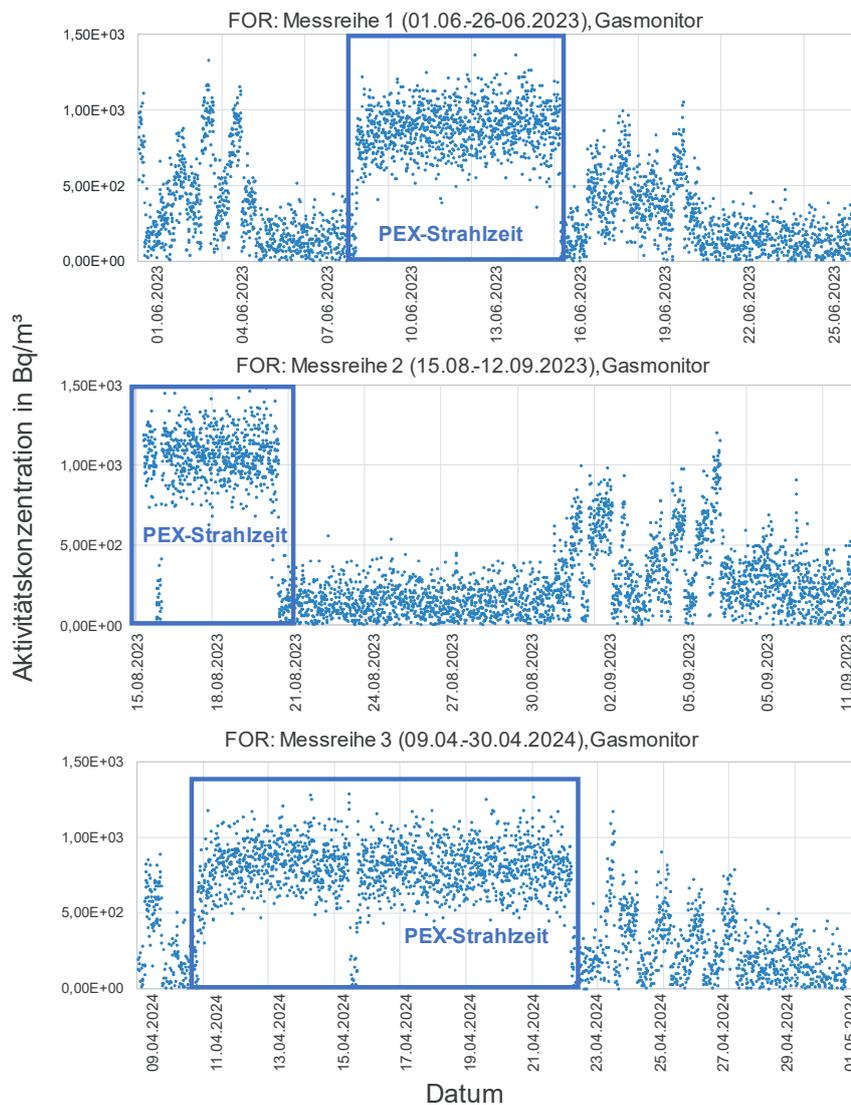


Abbildung 26: Gasmonitordaten von FOR während der Messreihen 1-3.

Bei den Gasmonitor Messungen ist ebenfalls, wie in allen drei Messreihen der DORNIER deutlich ersichtlich, dass während der PEX-Strahlzeit eine erhöhte Aktivitätskonzentration in der Fortluft vorlag. In diesem Zeitraum erhöhte sich die Aktivitätskonzentration plateauartig und bleibt über die gesamte Strahlzeit sehr konstant hoch. Zum Ende der Strahlzeit klingt die Aktivitätskonzentration rapide ab. Auch außerhalb der PEX-Strahlzeit sind die punktuell höhere Aktivitätskonzentrationen in der Fortluft vergleichbar mit den DORNIER Messungen. Im Gegensatz zu den Messungen von DORNIER ist in den Gasmonitormessungen der Betreiberin auch in der dritten Messreihe ein flaches Plateau ohne zusätzliche Struktur erkennbar.

Vergleich der Höhe der Aktivität

In Abbildung 27 sind die Daten aus Messreihe 1 und 3 der integralen Messtechnik (mit dem Kalibrierfaktor von N-13 nach Gleichung 6) und die Messdaten der Eigenüberwachung von FOR mittels Gasmonitor (bezogen auf Ar-41) in einem Diagramm zum Vergleich abgebildet. Zusätzlich sind meteorologische Daten dargestellt, die uns von FOR zur Verfügung gestellt wurden.

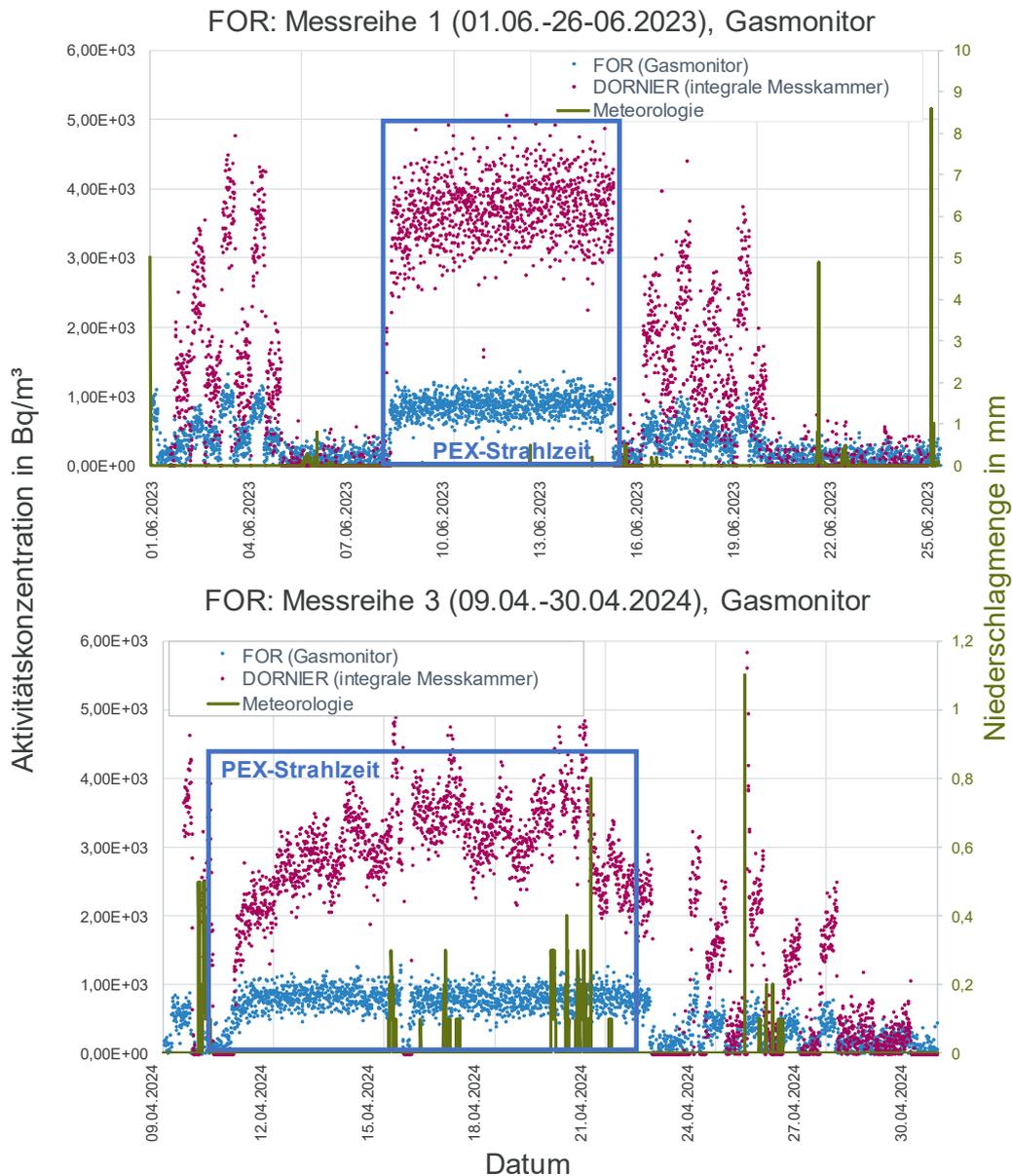


Abbildung 27: Vergleich der Gasmonitor-Messung von FOR mit der integralen Messung für die Messreihen 1 und 3 durch DORNIER von am FOR-Kamin, bezogen auf N-13, sowie Gegenüberstellung mit meteorologischen Daten (Niederschlagsmengen).

In der Abbildung 27 ist deutlich zu erkennen, dass die Aktivitätskonzentration bei der integralen Messtechnik über den gesamten Zeitraum deutlich höher ist als bei den Messdaten des Gasmonitorings.

Der Verlauf der einzelnen Aktivitätskonzentrationserhöhungen bei den Einzelexperimenten und die Abbildung der PEX-Strahlzeit ist in beiden Messungen der ersten Messreihe sehr gut ersichtlic und die Verläufe sind (bis auf die Höhe) sehr ähnlich. Da die gleichen Verläufe der Aktivitätskonzentration aufgezeichnet wurden, ist auszuschließen, dass die integrale Messkammer eine Fehlfunktion ausweist. Die Unterschiede sind also eher in der Auswertung begründet. Die Messwerte unterscheiden sich ungefähr um einen Faktor 4. Die Unsicherheit der berechneten Kalibrierfaktoren beläuft sich allerdings nur auf ca. 25 %. Die Niederschläge, die einen höheren Radon-Anteil in der bodennahen Luft und somit Störungen im Untergrundsignal hervorrufen können, scheinen nicht für die Struktur der Schwankungen verantwortlich zu sein. Die zweite Messreihe (nicht abgebildet) lässt sich analog zur ersten beschreiben.

In der dritten Messreihe gibt es eine Abweichung. Zwar sind wieder die grundsätzlichen Verläufe (Anstieg und Abfall der Aktivitätskonzentrationen) vergleichbar, jedoch ist der Verlauf des Plateaus unterschiedlich. Bei den Gasmonitordaten von FOR verläuft das Plateau flach, wie es auch in den ersten

beiden Messreihen von DORNIER beobachtet wurde. Vor der dritten Messreihe kam es zu einer Stromabschaltung, in deren Folge sich das Messsignal des Schirmzählers, der nach Gleichung 4 für die Berechnung der bereinigten Nettozählrate herangezogen wird, verändert hat. Diese Veränderung (Offset) konnte in den Messdaten korrigiert. Jedoch legt die Gegenüberstellung dieser beiden Messkurven nahe, dass der Schirmzähler kein verwendbares Signal mehr produziert und überprüft werden sollte. Die Rohdaten zum Zeitpunkt der Stromabschaltung sind im Anhang in Abbildung 30 dargestellt.

Vergleich der abgegebenen Aktivität mit der gehandhabten Aktivität

Für die Rechnungen wurde das gesamte Volumen des Fortluftstroms von 16300 m³/h für alle Messreihen herangezogen und anhand der gemessenen Aktivitätskonzentrationen die gesamte abgegebene Aktivität hochgerechnet. Bei der Messreihe 1 konnte in der Fortluft von FOR bis zu 6,8 MBq/h, bei der Messreihe 2 bis zu 8,0 MBq/h und bei der Messreihe 3 bis zu 7,7 MBq/h mittels integralem Messsystem erfasst werden. Hier wurde der Kalibrierfaktor von N-13 verwendet der aufgrund der Methode der Berechnung eine Unsicherheit von ca. 25 % beinhaltet. Die Höhe der gehandhabten Aktivität ist nicht definiert, da bei FOR nicht mit einer festgelegten Aktivität umgegangen wird, sondern stattdessen die Aktivierung der Luft eine Rolle spielt.

5.1.3 IPR

Die Eigenüberwachung der Fortluft des Entwicklungslabors wird von IPR zweimal im Jahr mittels Gammaskopie von Filterproben durchgeführt. Doch im Messzeitraum konnte aufgrund eines Gerätedefekts die Eigenüberwachung im November 2023 nicht erfolgreich durchgeführt werden. Bei der Eigenüberwachungsmessung zuvor und anschließend im März 2024 wurden laut IPR keine Radionuklidaktivität über der EKG auf dem Filter bei der Laboranalyse gefunden. Da Ga-68 eine Halbwertszeit von knapp 1 h hat, ist das Radionuklid auf dem Filter bei einer halbjährlichen Eigenüberwachung nicht nachweisbar. Da keine betriebsbereiten Messdaten vorlagen, konnte kein Vergleich der Messergebnisse vorgenommen werden.

Vergleich der abgegebenen Aktivität mit der gehandhabten Aktivität

Nach Angaben von IPR wird an einem Versuchstag im Entwicklungslabor mit einer Ga-68-Aktivität von ca. 800 MBq für ca. 4 h umgegangen. Diese Handhabung findet ungefähr 10-mal im Monat im Entwicklungslabor statt. Tagesgenaue Angaben zu Handhabungszeiten und Aktivitätshöhen liegen DORNIER nicht vor. Für die Rechnungen wurde das gesamte Volumen des Fortluftstroms von 4140 m³/h für den EG-Kamin und 1390 m³/h für den OG-Kamin herangezogen und anhand der gemessenen Aktivitätskonzentrationen die gesamte abgegebene Aktivität hochgerechnet.

Bei der Messreihe 1 konnte in der Fortluft eine Aktivität von bis zu 20,8 MBq/h mittels integralem Messsystem und bis zu 1510 MBq/h mittels nuklidspezifischem Messsystem erfasst werden. Bei der Messreihe 2 konnte in der Fortluft eine Aktivität von bis zu 21,0 MBq/h mittels integralem Messsystem und bis zu 346 MBq/h mittels nuklidspezifischem Messsystem erfasst werden. Bei der Messreihe 3 konnte in der Fortluft eine Aktivität von bis zu 42,9 MBq/h mittels integralem Messsystem und 218 MBq/h mittels nuklidspezifischem Messsystem erfasst werden. Für die integralen Daten wurde der Kalibrierfaktor für Ga-68 gemäß Gleichung 6 herangezogen.

Die Werte, die von den Messdaten der nuklidspezifischen Messkammer berechnet wurden, sind offensichtlich zu groß, da mehr Aktivität in der Fortluft prognostiziert wird, als im Labor gehandhabt wurde. DORNIER vermutet, dass die Halbwertszeitkorrektur von InterWinner zu überschätzten Aktivitäten führt. Nach Angaben vom Technischen Ingenieurbüro Krüger (TIK, Vertreter von InterWinner) ist die Halbwertszeitkorrektur so ausgelegt, dass die Messwerte auf das Ende der Messung bezogen werden, die Aktivität jedoch auf den Anfang der Messzeit. Das bedeutet, dass bei einer Messzeit von 24 h und einer Halbwertszeit von 1 h der Effekt immens ist.

Das würde erklären, wieso die Aktivitätskonzentrationen, die mit dem nuklidspezifischen Messgerät bestimmt wurden, so viel größer sind als die der integralen Messkammer. Allerdings wurde hier kein 24-h-Spektrum einer einzelnen Probe aufgezeichnet, wie die Auswertung im Sinne von TIK es unterstellt, sondern entsprechend der Auswerterroutine aus Kapitel 4.1.3.2 insgesamt 144 Einzelspektren zu einem Tagesspektrum zusammenaddiert. Die Halbwertszeitkorrektur sollte also nur 10 min betragen und nicht 24 h, dies ließ sich bei InterWinner jedoch nicht einstellen. Weiterhin wurde keine einzelne Probe

gemessen, sondern der kontinuierliche Fortluftstrom, der immer wieder neue Radionuklide enthält, da Ga-68 nicht instantan, sondern über einen gewissen Zeitraum produziert und gehandhabt wurde.

5.1.4 MED

Bei MED werden keine betreibereigenen Messungen der Aktivität der Fortluft durchgeführt. Am Kamin der Jodstation wird mehrmals im Jahr die Aktivität vor und hinter der Filterstrecke bestimmt, um die Filtereffizienz zu verifizieren. Sollte hier eine Unterschreitung der notwendigen Filtereffizienz festgestellt werden, würden die Filter vorzeitig getauscht werden. Andernfalls werden die Filter entsprechend den Herstellerangaben gewechselt. Nach Aussage von MED ist es in den letzten Jahren nicht vorgekommen, dass die Filter vorzeitig getauscht werden mussten. Allerdings erfolgt die Probenentnahme nicht über einen Rechen, der das Ziehen einer repräsentativen Probe garantieren würde.

Am Filter des Kamins des Heißlabors erfolgt lediglich eine Überwachung der Ortsdosisleistung mit einem Dosimeter. Wenn dieses einen bestimmten Wert überschreitet, wird der Filter getauscht. Nach Angaben von MED ist dies noch nicht vorgekommen.

Demzufolge kann kein Vergleich mit betreibereigenen Messungen vorgenommen werden.

Vergleich der abgegebenen Aktivität mit der gehandhabten Aktivität

An den Messtagen am Kamin der Jodstation waren Jod- und Lutetium-Patienten auf der Station. Die Höhe der Aktivitätsgabe an die Patienten sowie die Zeit, die seit der Gabe vergangen ist, sind MED bekannt, jedoch nicht die reale biologische Halbwertszeit, da diese stoffwechselabhängig ist. Demzufolge kann keine Aussage darüber getroffen werden, wie viel Aktivität „gehandhabt“ wurde.

An manchen Messtagen am Kamin des Heißlabors wurde im Heißlabor mit Radionukliden gearbeitet. In manchen Fällen war dies auch einige Tage vor der Messung der Fall. Da nicht bekannt ist, wie lange es dauert, bis die Partikel den Filter passiert haben, sind auch die Handhabungen einige Tage vor der Messung interessant.

Es wurde während der Messzeiträume (Notation wie in Abbildung 21 und Abbildung 22) mit folgenden Aktivitäten umgegangen:

- Fortluft (1) und (2): 75,29 MBq Ac-225 und 676,03 MBq I-131
- Fortluft (3): 12,426 MBq Ra-223 und 10,346 MBq I-131
- Fortluft (4): 3,407 MBq Ra-223 und 435 MBq I-131

In diesen Zeiträumen wurden keine erhöhten Messwerte festgestellt, sodass eine Korrelation nicht bestätigt werden kann.

Nach Gesprächen mit MED wurde begonnen, Aktivitäten, die im Heißlabor unter dem Abzug gemessen wurden, tabellarisch zusammenzufassen und DORNIER zur Verfügung zu stellen. Da diese Gespräche erst lange nach der Auswertung der ersten Messungen stattfanden, liegen nur die Aktivitäten im Labor für den Zeitraum ab dem 17.07.2024 vor. In diesem Zeitraum hatte DORNIER mit dem Aegis-Detektor Messungen an der Abluft (also vor der Filterung der Luft) vorgenommen, um die Fortluft- und Abluftmessungen vergleichen zu können. Die Daten, die mit dem Aegis-Detektor aufgezeichnet wurden, wurden zu Tagesspektren zusammengefasst und wie für die nuklidspezifische Messkammer ausgewertet (beschrieben in Kapitel 4.1.3.2). Für die Auswertung liegt keine gültige Effizienzkalibrierung vor, da nicht mit der Messkammer gemessen wurde. Die Höhen der Aktivitäten und EKG sowie NWG können also nur qualitativ diskutiert werden. Die Ergebnisse der Messungen des Aegis sowie die Angaben von MED zur Aktivitätshöhe im Abzug des Heißlabors sind in Abbildung 28 dargestellt.



Abbildung 28: Darstellung der Aktivitäten, die mit dem Aegis-Detektor am Abluftkanal gemessen wurden, in magenta, sowie der Aktivitäten, die im Abzug des Heißlabors gehandhabt wurden, in blau.

Für alle betrachteten Radionuklide (außer Re-186 und Fr-221) konnten Aktivitäten oberhalb der NWG festgestellt werden. Bei I-131 (Abbildung 28 oben links) ist zudem nach dem 10.08.2024 eine deutliche Aktivität im Abluftkanal erkennbar, die ab dem 13.08.2024 ungefähr mit der Halbwertszeit von I-131 (ca. 8 Tage) abklingt. Dem voran geht die Handhabung von insgesamt ca. 17,2 GBq I-131 an mehreren Proben am 09.08.2024. Die anderen höheren Aktivitäten an I-131 hinterlassen keine so deutlichen Spuren in der Aktivitätsmessung des Abluftkanals. I-131 ist das einzige Radionuklid, bei dem eine Korrelation zwischen der gehandhabten Aktivität im Labor und der gemessenen Aktivität am Abluftkanal hergestellt werden kann. Bei allen anderen Radionukliden ist die vermeintlich gemessene Aktivität im Abluftkanal entweder konstant (Ra-223, Lu-177) oder sie scheint willkürlich zu fluktuieren (I-123, Tc-99m, Bi-213). Es ist denkbar, dass diese Radionuklide nicht signifikant in die Luft übergehen und dadurch in der Abluft schwer detektierbar sind. Es ist aber nicht nachvollziehbar, wieso die Nuklididentifikation bei der Auswertung der Gammaspectren dennoch Peaks bei den Energien dieser Radionuklide findet. Die betrachteten Radionuklide sind zu kurzlebig, um noch von früheren Freisetzungen im Kamin anzuhafte. Ra-223 könnte als NORM-Nuklid vom Aegis-Detektor identifiziert worden sein, da der Detektor ohne Messkammer und somit ohne Blei-Abschirmung eingesetzt wurde.

Ziel dieser Messungen war es, abschätzen zu können, wie lang es dauert, bis die Aktivität den Filter passiert hat (sofern sie nicht zurückgehalten wurde). Nach diesen Messungen ist es nur schwer möglich, eine Korrelation zwischen Freisetzung im Abzug und Detektion im Abluftkanal herzustellen, sodass gefolgert werden kann, dass eine Korrelation zwischen Labor- und Fortluftaktivität noch schwieriger ist. Hierzu wären weiterführende Messungen und Betrachtungen notwendig.

5.2 Unsicherheitsbudgets

Mit dem Unsicherheitsbudget einer Messung ist in der Messtechnik die Zusammenstellung aller Beiträge von Messunsicherheiten zu einer konkreten Messung gemeint. Mithilfe des Unsicherheitsbudgets kann die Unsicherheit eines Messergebnisses ermittelt werden [10]. In diesem Kapitel wird das Unsicherheitsbudget jedes der verwendeten Messsysteme allgemein diskutiert und ggf. für jeden der konkreten Aufstellungsorte weiterführende Betrachtungen angefügt.

Grundlagen zur Berechnung der charakteristischen Größen sind in der DIN EN ISO 11929 [7] beschrieben.

Für die Standardunsicherheit $u(y)$ gilt dabei für zählende Messungen:

$$u(y) = \sqrt{w^2 \cdot \left(\frac{R_b}{t_m} + \frac{f_1^2 \cdot R_0}{t_0} + R_0^2 \cdot u^2(f_1) \right) + y^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(w)} \quad \text{Gleichung 7}$$

- w : Kalibrierfaktor
- R_b : Zählrate des Bruttoeffektes
- t_m : Messdauer bei der Bestimmung des Bruttoeffektes
- f_1 : Abschirmfaktor
- R_0 : Zählrate der Untergrundmessung
- t_0 : Messdauer bei der Untergrundmessung
- $u(f_1)$: Unsicherheit des Abschirmfaktors
- y : primäres Messergebnis (Wert der Ergebnisgröße Y)

Für spektrometrische Messung gilt:

$$u(y) = \sqrt{\frac{w^2}{t} \cdot (u^2(n_b) + u^2(n_0)) + y^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(w)} \quad \text{Gleichung 8}$$

- t : Messdauer
- n_b : Anzahl der gezählten Impulse der Bruttomessung
- n_0 : Anzahl der gezählten Impulse der Untergrundmessung

Für die relative Standardunsicherheit des Kalibrierfaktors $u_{\text{rel}}(w)$ sind alle Parameter, die den Kalibrierfaktor der Messung beeinflussen, zu berücksichtigen. Sollten keine Einflüsse auf den Kalibrierfaktor bestehen, so ist in der Berechnung $w = 1$ und $u_{\text{rel}}^2(w) = 0$ anzunehmen. Sind durch Berechnungen oder durch bekannte Angaben wie bei Kalibrierpräparaten bereits Unsicherheiten angegeben, können diese für das Unsicherheitsbudget hergezogen werden. Andernfalls kann $u_{\text{rel}}^2(w)$ bzw. die eingangsgrößenabhängige Unsicherheit gemäß Gleichung 9 bestimmt werden:

$$u_{\text{rel}}^2(w) = \sum_{i=1}^m \frac{u^2(x_i)}{x_i^2} \quad \text{Gleichung 9}$$

- m : Anzahl der Eingangsgrößen
 x_i : Wert der Eingangsgröße X_i
 $u^2(x_i)$: dem Wert x_i beigeordnete Standardunsicherheit der Eingangsgröße X_i

5.2.1 Allgemein

Unabhängig vom verwendeten Messsystem und vom jeweiligen Aufstellungsort gibt es einige Faktoren, die jede Messungen beeinträchtigen und zu Unsicherheiten im Messergebnis führen können. Dazu zählen bei der Messung selbst:

- **Schlauchlänge und -windungen:** Die Geometrie der Leitungen an den Messaufbauten wurde nur ungefähr erfasst und später bei der Auswertung weiter abgeschätzt. Hier tauchen weitere Unsicherheiten auf. Der Zusammenhang zwischen Schlauchlänge und Übertragungsfaktor ist exponentiell. Der Exponent ist sehr klein ($\ll 1$), daher kann eine lineare Näherung erfolgen. Für senkrecht verlaufende Schläuche beträgt die Abweichung bei den verwendeten Schlauchlängen (ca. 1 m bis 4 m) weniger als 1 %. In diesem Bereich führt jeder weitere Meter zu einer Verringerung des Übertragungsfaktors von ca. 1 %. Die Abweichung ist also gering. Für waagrecht verlaufende Schläuche ist der Exponent immer noch < 1 , aber deutlich größer als für senkrecht verlaufende Schläuche. Im Bereich bis 4 m ist der Verlauf immer noch annähernd linear, es erfolgt eine Verringerung des Übertragungsfaktors von ca. 6 % für jeden zusätzlichen Meter.
- **Anzeige des Luftstroms (bei integralen Messungen):** Schwankungen im Luftstrom werden nicht aufgezeichnet, da die Anzeige lediglich abgelesen, aber nicht gespeichert wird. Die Zuordnung zu Messzeiträumen (für die Hochrechnung der Gesamtaktivität, siehe Abschnitt 6.1) erfolgt anhand einer einzelnen Messung.
- **Raumtemperatur:** Schwankungen der Raumtemperatur können zu einer Veränderung des Untergrunds führen.
- **Luftfeuchtigkeit:** Eine Veränderung der Luftfeuchtigkeit kann sich auf das Ansprechvermögen der Detektoren auswirken.
- **Pumpe (bei IPR):** Bei IPR wurde eine Pumpe verwendet, da der Luftstrom nicht wieder in den Kamin zurückgeführt wird. Die Leistung der Pumpe wurde während der Messung nicht überprüft, Schwankungen sind also nicht auszuschließen.
- **Annahme der Homogenität der Aktivitätsverteilung:** Für die Auswertung wird davon ausgegangen, dass die im Luftstrom vorhandene Aktivität im betrachteten Zeitfenster homogen vorliegt. Dafür gibt es jedoch keine Anhaltspunkte. Inhomogenitäten führen zu abweichenden Messergebnissen.
- **Zeitmessung:** Die Bestimmung der Messdauer stellt einen weiteren Beitrag zum Unsicherheitsbudget dar.

Weitere Faktoren spielen schon im Vorfeld zu den eigentlichen Messungen eine Rolle. Das sind beispielsweise:

- **Schwankungen von Kalibrierpräparaten**
Kalibrierpräparate, die für die Kalibrierung der Messplätze verwendet wurden, verfügen über Unsicherheitsangaben, die sich über die Kalibrierung auf die Messergebnisse fortpflanzen.
- **Effizienz der Messsysteme**
Die Effizienz der Detektoren bzw. die Ansprechvermögen sind unsicherheitsbehaftet.
- **Schwankungsbreiten der Energien der Radionuklide**
Die Zuordnung von Peaks zu Nukliden erfolgt über eine Nuklidbibliothek, aber durch die endliche Breite der Peaks können hier Unsicherheiten entstehen. Diese sind jedoch bereits in der Auswertung mit InterWinner bzw. Genie2000 berücksichtigt.

5.2.2 Integrale Messkammer, standortunabhängig

Bei der integralen Messkammer sind bei der Unsicherheitsbetrachtung folgende Faktoren zu berücksichtigen:

- die Kalibrierung des Detektors: In der Regel wird mit wenigen Prüfpräparaten, die selbst wiederum unsicherheitsbehaftet sind, eine Kalibrierkurve generiert. Weiterhin ist die reale Kurve, die das Ansprechvermögen der Detektoren in Abhängigkeit von der Energie darstellt, möglicherweise durch die Interpolation einzelner Messwerte nicht exakt reproduzierbar. Hier können Abweichungen auftreten. Für eine Durchflussmessung wird die Geometrie abweichen, wenn für die Kalibrierung kein Gas, sondern ein Flächen- oder Punktstrahler verwendet wird. Für den Kalibrierfaktor wurde in dieser Arbeit ein errechneter Wert gemäß Gleichung 6 verwendet. Die den Fitparametern zugrunde liegenden Daten wurden skaliert, dabei entsteht eine Unsicherheit in der Größenordnung von ca. 25 %. Eine grafische Darstellung hierzu ist im Anhang in Abbildung 29 dargestellt.
- die Kalibrierung der Koinzidenzsonden für die Bestimmung des Nulleffekts
- das anhand von Messungen ermittelte Innenvolumen der Messkammer
- der im Vorfeld einer Messung ermittelte Untergrund: Es wird angenommen, dass er über die gesamte Messdauer konstant bleibt.
- Bei der Kalibrierung der Koinzidenzsonden für die Bestimmung des Nulleffekts ist ebenfalls zu beachten, dass hier Unsicherheiten eingehen können.

5.2.3 Nuklidspezifische Messkammer, standortunabhängig

Zusätzlich zu den in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen Unsicherheiten kommen bei der Verwendung der nuklidspezifischen Messkammer nachstehende Betrachtungen hinzu:

- die Positionierung des Detektors: Der Aegis-Detektor wird in die Messkammer hineingeschoben, eine Abweichung von der Positionierung während der Kalibrierung im Millimeterbereich ist hier nicht auszuschließen.
- eine Veränderung im Volumenstrom: Diese kann ein verändertes Strömungsverhalten des Gases in der Messkammer hervorrufen. Der Volumenstrom wurde während der Messungen jedoch nicht kontinuierlich überprüft.
- Ortswechsel: Bei einem Ortswechsel wird die Abschirmung der Messkammer ab- und wieder angeschraubt, dadurch kann sich der Untergrund verändern.
- Produktionsfehler beim Blech auf dem Detektor: Diese sollten mit der Effizienzkalibrierung bereits erfasst sein.

5.2.4 Messkammern standortspezifisch: JUM

Die Probenentnahmeleitungen (Schläuche) wurden möglicherweise während der Messung bewegt, da sich in dem Container noch andere Messgeräte vom Betreiber befinden. Es ist also nicht auszuschließen, dass die Schlauchgeometrie und damit der Übertragungsfaktor während der Messung variiert wurden. Zudem wurden die Schlauchgeometrien nicht exakt erfasst, sondern anhand von Fotos abgeschätzt. Dadurch steigt die Unsicherheit der Größe des Übertragungsfaktors.

Durch die unterschiedlichen Standorte der integralen Messkammer bei den Messreihen ist es möglich, dass der Untergrund abweicht.

5.2.5 Messkammern standortspezifisch: IPR

Die Probenentnahmeleitungen (Schläuche) wurden von IPR zwischen den Messreihen bewegt, da der Schlauch zunächst von dem einen Kamin entfernt und zwei Wochen später an den anderen Kamin angeschlossen wurde. Die Schlauchgeometrie hat sich dadurch allerdings nicht wesentlich geändert. Zudem wurden die Schlauchgeometrien nicht exakt erfasst, sondern anhand von Fotos abgeschätzt. Dadurch steigt die Unsicherheit der Größe des Transmissionsgrads.

Es wurde während der Messung nicht überprüft, ob die verwendete Pumpe mit konstanter Leistung gepumpt hat. Weiterhin ist die Pumpleistung selbst unsicherheitsbehaftet.

Bei IPR erfolgt keine Rückführung des entnommenen Luftstroms in den Kamin, was zu einem veränderten Untergrund führen kann.

5.2.6 Handgehaltene Messtechniken

Bei der handgehaltenen Messtechnik spielt der Faktor Mensch eine viel größere Rolle als bei den Messkammern, da die Messgeräte potenziell vor jeder Messung bewegt werden. Die Reproduzierbarkeit von Ausrichtung und Abstand zum Kamin ist hier eingeschränkt. Weiterhin ist die Messung von Abstand und Winkel unsicherheitsbehaftet.

Da die Messgeräte auf der Jodstation nicht mittig am Kanal, sondern am nur am unteren Ende platziert werden können, ist es außerdem nicht sicher, ob der Volumenstrom sinnvoll erfasst wurde. An dieser Stelle fehlt Kenntnis über den inneren Aufbau des Kamins.

Abweichungen in der Dicke der Abschirmung der Kamine können zu Unsicherheiten führen, wenn das Messgerät an unterschiedlichen Stellen positioniert wird, die unbekannterweise unterschiedliche Dicken aufweisen.

5.2.6.1 Falcon

Für die Auswertung der Falcon-Daten wurde die Software Genie 2000 herangezogen, in der eine Geometrie erstellt wurde. Hier liefert die Abstandsmessung sowie die Winkelmessung den größten Beitrag zur Messunsicherheit.

5.2.6.2 RadHAND

Der RadHAND musste jeden Tag neu positioniert werden, teilweise sogar zwischen den einzelnen Messungen. Es war somit schwierig, wirklich reproduzierbare Messpositionen zu erreichen.

5.3 Charakteristische Grenzen nach DIN ISO 11929

Zur Bewertung des primären Messergebnisses und seiner beigeordneten Unsicherheit sind charakteristische Grenzen heranzuziehen. Die zwei wichtigsten Grenzen stellen dabei die EKG [y^*] sowie die NWG [$y^\#$] dar.

Grundlagen zur Berechnung der charakteristischen Größen sind in der DIN EN ISO 11929-1 [7] beschrieben.

5.3.1 Vertrauensniveau

Im Rahmen der statistischen Betrachtungen ist ein Vertrauensniveau zu definieren. Dieses gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Fehler 1. Art (α) und ein Fehler 2. Art (β) auszuschließen sind. Ein gängiger Wert für das Vertrauensniveau ist 95 %. So ergibt sich für das Eintreten des Fehlers 1. Art ($1 - \alpha$) und 2. Art ($1 - \beta$) jeweils 5 %.

Im Rahmen der Berechnungen werden häufig die Quantile der Standardnormalverteilung der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit verwendet. Diese wird als $k_{1-\alpha}$ bzw. $k_{1-\beta}$ angegeben. Bei dem typischen Vertrauensniveau von 95 % ergibt sich für $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = k = 1,65$.

5.3.2 Erkennungsgrenze

Die Erkennungsgrenze (y^*) beschreibt einen statistischen Wert. Ist das primäre Messergebnis y größer als die Erkennungsgrenze, wird angenommen, dass der der Ergebnisgröße entsprechende physikalische Effekt vorliegt. Wenn der physikalische Effekt nicht vorhanden ist, ist die Wahrscheinlichkeit, die falsche Entscheidung („er ist vorhanden“) zu treffen, gleich dem Fehler 1. Art, α .

Die Erkennungsgrenze wird berechnet als das Produkt aus dem Quantil der Standardnormalverteilung zur Wahrscheinlichkeit des Fehlers 1. Art ($k_{1-\alpha}$) mit der Standardunsicherheit des angenommenen wahren Wertes, mit der Annahme das der Messwert gleich Null ist. [$\tilde{u}(0)$]

$$y^* = k_{1-\alpha} \cdot \tilde{u}(0) \quad \text{Gleichung 10}$$

Der Wert $\tilde{u}(0)$ wird wie die Standardunsicherheit (siehe Kapitel 6.2) abhängig vom Messverfahren ermittelt.

Zählende Messung

$$\tilde{u}(0) = w \cdot \sqrt{\frac{f_1 \cdot R_0}{t_m} + \frac{f_1^2 \cdot R_0}{t_0} + R_0^2 \cdot u^2(f_1)} \quad \text{Gleichung 11}$$

Spektrometrische Messung

$$\tilde{u}(0) = \frac{w^2}{t^2} (n_0 + u^2(n_0)) \quad \text{Gleichung 12}$$

5.3.3 Nachweisgrenze

Die Nachweisgrenze [$y^\#$] beschreibt den kleinsten wahren Wert einer Messgröße, der mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit (Fehler 2. Art) durch das Messverfahren erkannt wird.

Gemäß DIN EN ISO 11929-1 [7] ist die Gleichung 13 als allgemeine implizite Gleichung zur Berechnung der NWG definiert:

$$y^\# = y^* + k_{1-\beta} \cdot \tilde{u}(y^\#) \quad \text{Gleichung 13}$$

Sind alle Größen voneinander unabhängig und gilt für das Vertrauensniveau $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = k = 1,65$, so kann zur Vereinfachung die explizite Gleichung der NWG, Gleichung 14, bei zählenden Messungen angewendet werden. Bei spektrometrischen Messungen ist der Wert t_m mit t zu tauschen.

$$y^\# = \frac{2y^* + k^2 \cdot \frac{w}{t_m}}{1 - k^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(w)} \quad \text{Gleichung 14}$$

5.3.4 Bewertung der Messungen

Die erreichten Nachweisgrenzen werden mit den zulässigen Aktivitätsabgaben nach Anlage 11 Tabelle 6 StrlSchV verglichen, um zu bewerten, ob die Messmethoden grundsätzlich dazu geeignet sind, eine Überschreitung der erlaubten Aktivitätskonzentrationen festzustellen. Für die Messungen mit der

nuklidspezifischen Messkammer wurden die Nachweisgrenzen, die bei der Auswertung mit InterWinner 8 ausgegeben wurden, verwendet. Dabei wurde zwischen stunden- und tageweisen Auswertungen unterschieden. Für die integrale Messkammer wurde anhand der jeweiligen Rohdaten unter Verwendung von Gleichung 10 bis Gleichung 14 Nachweisgrenzen abgeschätzt. Der Abschirmfaktor wurde nicht berücksichtigt. Für die relative Unsicherheit des Kalibrierfaktors wurden konservativ 25 % angenommen. Für die nuklidspezifischen Messdaten von der Messung mit dem handgehaltenen Falcon 5000 wurden die Nachweisgrenzen der Auswertung in Genie 2000 herangezogen. Die Ergebnisse sind jeweils in Tabelle 5, Tabelle 6 und Tabelle 7 dargestellt. Für Fr-221 ist in der Anlage 11 Tabelle 6 StrISchV kein Wert hinterlegt, daher wird der Wert für Fr-222 herangezogen, der den geringsten Wert der anderen Fr-Isotope darstellt.

Tabelle 7: Vergleich der NWG der Messungen mit der nuklidspezifischen Messkammer mit den zulässigen Abgabewerten nach Anlage 11 Tabelle 6 StrISchV.

Radionuklid	Zul. Abgabewert nach Anlage 11 Tabelle 6 StrISchV (Bq/m ³)	NWG (γ, Tag) (Bq/m ³)	NWG (γ, Stunde) (Bq/m ³)	Messmethode geeignet?
I-123	7E+01	5E-01	3E+01	Ja
I-125	5E-01	5E+02	6E+04	Nein
Ga-68	5E+02	3E+02	3E+03	Nur Tagesmessungen
Tc-99m	2E+03	1E+00	5E+01	Ja
Bi-213	1E+00	5E+01	3E+02	Nein
In-111	1E+02	7E-01	5E+01	Ja
Lu-177	3E+01	6E+00	4E+02	Nur Tagesmessungen
Fr-221	3E+00 (Fr-222)	8E+02	3E+03	Nein

Tabelle 8: Vergleich der NWG der Messungen mit der integralen Messkammer mit den zulässigen Abgabewerten nach Anlage 11 Tabelle 6 StrISchV.

Radionuklid	Zul. Abgabewert nach Anlage 11 Tabelle 6 StrISchV (Bq/m ³)	NWG (integral) (Bq/m ³)	Messmethode geeignet?
N-13	2E+03	8,09E+02	Ja
Ar-41	2E+02	7,98E+02	Nein
Ga-68	5E+02	7,79E+02	Nein

Tabelle 9: Vergleich der NWG der Messungen mit der handgehaltenen nuklidspezifischen Messtechnik (Falcon 5000) mit den zulässigen Abgabewerten nach Anlage 11 Tabelle 6 StrISchV.

Radionuklid	Zul. Abgabewert nach Anlage 11 Tabelle 6 StrISchV (Bq/m ³)	NWG (γ, Kurzzeit) (Bq/m ³)	NWG (γ, Langzeit) (Bq/m ³)	Messmethode geeignet?
Tc-99m	2,00E+03	1E+03	6E+02	Ja
I-123	7,00E+01	6E+03	1E+03	Nein
I-131	5,00E-01	5E+03	5E+02	Nein
Lu-177	3,00E+01	5E+04	6E+03	Nein
Re-186	3,00E+01	9E+03	1E+03	Nein
Bi-213	1,00E+00	8E+03	2E+04	Nein
Fr-221	3,00E+00 (Fr-222)	2E+05	1E+06	Nein
Ra-223	4,00E-03	3E+04	4E+03	Nein

6 Zusammenfassung und Ausblick

DORNIER hat im Zeitraum vom 1.11.2022 bis zum 31.10.2024 das FV Fortluft bearbeitet. Im Zuge dessen wurde eine aufwendige Internetrecherche betrieben, um Einrichtungen zu ermitteln, die für Messungen der Fortluft in Frage kommen. Über einen Zeitraum von ca. einem Jahr wurden Messungen bei JUM, FOR und IPR durchgeführt, um die Tauglichkeit der bewährten Messkammern des BfS zu prüfen. Zusätzlich wurden Messungen bei MED durchgeführt, bei denen handgehaltene Messgeräte zum Einsatz kamen. Die Messungen wurden mit betriebeigenen Messungen verglichen, sofern diese vorhanden waren. Das war bei JUM und FOR der Fall.

Die Messkammern des BfS können als „Allrounder“-Messgeräte angesehen werden, da sie ein breites Spektrum an Strahlung detektieren können. Die Einrichtungen, die ihre Abgaben messtechnisch überwachen, verfügen in der Regel über spezialisierte Messtechnik, die auf die spezifischen Abgaben genau dieser Radionuklide ausgerichtet sind. Daher sind die Messergebnisse der Betreiber aussagekräftiger und hochwertiger als die, die DORNIER mit den Geräten des BfS produzieren konnte.

Dennoch sind die Messungen von DORNIER aussagekräftig, da die erwarteten Radionuklide in der Regel zuverlässig identifiziert werden konnten. Nicht immer stimmte die Höhe der ermittelten Aktivitätskonzentration mit den erwarteten Werten überein, dies konnte DORNIER auf eine unvorteilhafte Berechnung der Halbwertszeitkorrektur in InterWinner zurückführen. Die Nachweisgrenzen sind nicht immer ausreichend, um Messergebnisse in der Qualität zu erzeugen, dass eine Überprüfung der einzuhaltenden Ableitungswerte nach Anlage 11 Tabelle 6 StrlSchV für alle betrachteten Radionuklide möglich wäre-

Da nicht nur gasförmige, sondern auch schwebstoffgetragene Aktivität betrachtet wurde, hat DORNIER die Übertragungsfaktoren der jeweiligen Messaufbauten abgeschätzt und dabei Optimierungsspielraum feststellen können.

6.1 Bewertung der verwendeten Messtechnik

Mit der verwendeten nuklidspezifischen Messtechnik konnten alle erwarteten Nuklide nachgewiesen werden. Bei JUM sind das I-125 und I-123, bei IPR Ga-68 und bei MED I-131. Es wurden weitere Radionuklide nachgewiesen, deren Aktivitäten sich jedoch im Bereich der EKG befinden und deren Nachweis daher nicht sicher ist. Das betrifft Bi-213 bei IPR und Ra-223 und Lu-177 bei MED.

Insbesondere bei IPR war der zeitliche Verlauf der Aktivität in der Fortluft auch in den stündlichen Darstellungen gut nachvollziehbar. Auch die zeitliche Korrelation zwischen den Messdaten des integralen und des nuklidspezifischen Messsystem war in der Regel gut nachvollziehbar. Es gab wenige Fälle, in denen eine hohe Abgabe in nur einem Datensatz vorlag.

Obwohl alle erwarteten Nuklide nachgewiesen werden konnten, war der Nachweis nicht immer unproblematisch. Insbesondere bei I-125 gab es Schwierigkeiten, da die niedrige Emissionswahrscheinlichkeit zusammen mit der niedrigen Emissionsenergie im gammaspektrometrischen Messsystem zu einer sehr hohen NWG führen. Weiterhin war eine messtechnische Identifikation der Beta-Plus-Strahler bei FOR nicht möglich. Hier wurde das Nuklid aus Plausibilitätsbetrachtungen heraus bestimmt, jedoch ist dies in anderen Fällen nicht immer möglich. Ein weiteres Problem ergab sich aus den kurzen Halbwertszeiten der nuklearmedizin-typischen Nuklide. Diese führte bei der Auswertung der gammaspektrometrischen Daten zu einer Überbewertung der Aktivität, da sich die Halbwertszeitkorrektur nicht so anpassen ließ, wie es für das FV Fortluft nötig gewesen wäre: 10 min Halbwertszeitkorrektur für ein Spektrum mit beliebiger Messzeit, da dieses aus mehreren addierten 10-min-Spektren zusammengesetzt ist.

Die aktuelle Mess- und Auswerteroutine lässt immer erst im Nachhinein zu, Rückschlüsse auf die Messung zu ziehen, da die Messdaten lokal gespeichert werden und ein Auslesen und Exportieren vor Ort erforderlich ist, um die Messdaten zu bewerten. Es wäre von Vorteil, wenn ein Auslesen der Daten aus der Ferne möglich wäre, beispielsweise über eine Online-Datenbank, so wie es beim RadHAND der Fall war. Hierzu ist allerdings eine Internetverbindung notwendig, die nicht an allen Standorten vorausgesetzt werden kann. Aufgrund des Zeitverzugs, der sich durch das retardierte Auslesen und Auswerten ergab, konnten bestimmte Messwerte nicht mehr mit Ereignissen im Betriebsablauf korreliert werden.

Die verwendeten Schläuche waren teilweise zu lang, sodass die Transmissionsgrade bei IPR zu niedrig waren, um eine belastbare Aussage zu treffen. Ein optimierter Messaufbau würde so wenige Schlauchbögen wie möglich und so kurze waagrecht verlaufende Schläuche wie möglich beinhalten. Dies ist nicht immer möglich. DORNIER gibt zu beachten, dass für das FV Fortluft in erster Linie größere Einrichtungen ausgewählt wurden, die über eine interessante Bandbreite an Nukliden verfügen. Für kleinere Einrichtungen, beispielsweise Arztpraxen, die nuklearmedizinische Behandlungen anbieten, ist der verfügbare Platz vermutlich noch viel kleiner, sodass nicht davon ausgegangen werden kann, dass ein optimierter Aufbau oft möglich sein wird.

Insgesamt ist die Erfahrung bei MED vermutlich für viele kleinere Einrichtungen repräsentativer als die der wenigen, großen Forschungsstandorte wie zum Beispiel FOR. Bei MED wäre eine Installation der Bypass-Messgeräte nur mit unverhältnismäßigem Aufwand möglich gewesen, etwa durch das Hinzuziehen eines Speditionsunternehmens. Zusätzlich hätten bauliche Veränderungen vorgenommen werden müssen, damit eine Probenentnahme überhaupt ermöglicht würde.

Die betreibereigenen Messungen erfolgen oft über Sammlung (Jodmonitor bei JUM, Filter bei IPR und MED, C-14-Sammler beim HDZR), was zu höheren Signalen und damit niedrigeren NWG führt. Bei JUM waren die NWG zu hoch, um wirklich Aussagen über die Aktivität treffen zu können, was an der niedrigen Konzentration in der Luft liegt. Ähnlich wie bei Freigabemessungen steht auch bei der messtechnischen Überwachung der Fortluft die Schwierigkeit in der Herausforderung, sehr niedrige Aktivitäten messtechnisch nachzuweisen. Durch eine Sammlung geht jedoch die zeitliche Auflösung verloren, sodass im Nachhinein nicht mehr bewertet werden kann, ob eine Abgabe sehr hoch in sehr kurzer Zeit oder moderat hoch über längere Zeit erfolgt ist. Der verwendete Aegis-Detektor verfügt über eine relative Effizienz von 40 %. Die gewünschte zeitliche Auflösung war aufgrund der hohen NWG und der geringen Aktivitäten bei JUM ohnehin nicht möglich. Die Informationen aus den Betreiberangaben wurden durch die zusätzlichen Messungen nicht erweitert.

Nach Einschätzung von DORNIER sollte es möglich sein, die Kalibrierkurve für das integrale Messsystem rechnerisch zu bestimmen.

Beim Einsatz der handgehaltenen Messgeräte konnten Radionuklide identifiziert werden. In erster Linie handelt es sich hier um I-131. Es wurden jedoch auch Ra-223 nachgewiesen. Mit dem RadHAND war kein Nachweis von I-131 an der Fortluft möglich (nur an der Abluft und am Filter), was jedoch daran liegt, dass das Gerät nicht für das Finden von kleinen Aktivitäten optimiert ist und ein NaI-Detektorkristall mit geringer Effizienz und höherer Halbwertbreite aufweist. Weiterhin verfügt CaenSyS über eine Umweltsonde, die besser geeignet wäre, die jedoch für den Zeitraum des FV Fortluft nicht zur Verfügung stand. Die Messergebnisse des Falcon haben erstaunlich gute Nachweise der Radionuklide produziert. Die Handhabung des Falcon war etwas aufwändiger als die des RadHAND, aufgrund der Kühlung und der angeschlossenen Hochspannung. Es ist allerdings wichtig anzumerken, dass auch diese Geräte nicht in jeder Einrichtung eingesetzt werden können. Beispielsweise befinden sich die Kamine bei IPR in mehreren Metern Höhe. Der Gang davor ist so schmal, dass eine aufgestellte Leiter oder ein Gerüst, um die handgehaltenen Messgeräte direkt vor dem Kamin zu platzieren, einen Durchgang blockieren würde, sodass der hintere Teil des Raums nicht mehr betreten werden könnte. Es ist davon auszugehen, dass diese baulichen Voraussetzungen noch in anderen Einrichtungen vorliegen. Weiterhin war der zugängliche Teil der Fortluft in den Containern von FOR und JUM in einem so schmalen Rohr, dass er nur einen kleinen Teil des Sichtfensters des Detektors einnehmen würde, sodass die Qualität der Messungen hier weiter abnehmen würde. Ein grundsätzlicher Einsatz von handgehaltener Messtechnik ist also nach Ansicht von DORNIER ebenfalls nicht möglich.

Die Betrachtung der charakteristischen Grenzen in Kapitel 6.3.4 hat gezeigt, dass die NWG für einen Teil der betrachteten Radionuklide niedrig genug sind, um eine Einhaltung der zulässigen Ableitungswerte nach Anlage 11 Tabelle 6 StrlSchV zu überprüfen. Für die Radionuklide Ar-41, I-125 und Bi-213 war das jedoch nicht der Fall. Bei den Radionukliden Ga-68 und Lu-177 waren in der nuklidspezifischen Messkammer die NWG der Tagesspektren ausreichend, die der Stundenspektren jedoch nicht.

6.2 Alternative Messtechnik

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Marktstudie bei gängigen Entwicklern, Herstellern und Vertriebsunternehmen der radiologischen Messtechnikbranche durchgeführt. Dabei war das Ziel, Messsysteme ausfindig zu machen, welche im Rahmen der Fortluftüberwachung eingesetzt werden

können. Dabei lag das Hauptaugenmerk auf der Anwendbarkeit in der Praxis in Bezug auf Funktionalität und Mobilität des Messsystems. Bei der Marktstudie wurden nur Messgeräte in Standardkonfigurationen berücksichtigt.

Dabei zeigte sich, dass viele auf dem Markt vorhandene Messgeräte für den Einsatz in der Fortluftüberwachung vorwiegend als stationäre Geräte vorhanden sind. Dabei gibt es zwei Grundsysteme: einerseits die Sammlung von Aerosolen über einen Filter und die Auswertung des Filters, andererseits den Durchströmungsmonitor, ähnlich der integralen Messkammer gemäß Kapitel 4.1.3.1. Mittlerweile ist es aber bei vielen stationären Geräten möglich, zusätzliche NaI-Detektoren mit einzubauen, sodass eine Identifikation und Zuordnung von gammastrahlenden Nukliden an einem Filter bzw. in einer Messkammer möglich ist. Die stationären Messsysteme sind auf die Messung geringer Aktivitäten ausgelegt und besitzen meist eine Abschirmung, um die Einwirkung des Untergrundes auf die Messung zu reduzieren. Bei den stationären Geräten handelt es sich um Bypass-Systeme.

Einige Hersteller bieten auch mobile Lösungen in verschiedenen Größen an. Das Grundprinzip ist hier in den meisten Fällen das Bestäuben und Messen eines Filters bspw. bei den Kleinstgeräten, wobei die vorhandenen Filter direkt während der Bestäubung gemessen werden. Auch hier handelt es sich bei den meisten Geräten um Bypass-Systeme bzw. Messgeräte, bei denen das Messgerät in Gänze oder Teile des Messgeräts (z. B. eine Entnahmelanze) in den Fortluftstrom gebracht werden müssten. Jedoch gibt es auch hier Systeme, welche eine parallele nuklidspezifische Auswertung liefern können.

Zusammenfassend gilt für den Markt an Messgeräten zu sagen, dass eine Vielzahl verschiedener Messgeräte auf dem Markt verfügbar sind, mit dem eine Vielzahl von Nukliden abgedeckt werden kann. Jedoch sind diese Messsysteme stark spezialisiert, sodass es vorkommen kann, dass zur Erfassung verschiedener Strahlenarten bzw. auch der Art der Aktivität in der Fortluft (Aerosole oder radioaktive Gase) ein spezielles Messgerät benötigt wird. Somit müsste je nach verwendeten Radionukliden ein spezialisiertes oder kombiniertes Messverfahren angewendet werden. Lediglich die Messgeräte mit kombinierten zählenden und spektrometrischen Messungen bieten die Chance möglichst viele Radionuklide mit einem System zu überwachen.

6.3 Weiterführende Untersuchungen

Führend in der Diskussion um eine zukünftige messtechnische Kontrolle der Eigenüberwachung aller Einrichtungen ist die Frage, ob dies überhaupt notwendig ist. Nach Ansicht von DORNIER war die Stichprobe von vier Einrichtungen zu klein, um eine repräsentative Aussage zu treffen. Um den Status Quo von einer anderen Seite zu beleuchten, schlägt DORNIER vor, in einer weiterführenden Studie die Genehmigungen zu beleuchten, die den Einrichtungen erteilt wurden. Hierzu müssten die Genehmigungstexte bei den Landesämtern angefragt und eine Quellenrecherche durchgeführt werden: Wie sind die Genehmigungen aufgebaut? Wie unterscheiden sie sich beispielsweise bei ähnlichen Einrichtungstypen, z.B. großen und kleinen Arztpraxen? Gibt es wesentliche Unterschiede zwischen den Bundesländern und wodurch äußern sie sich?

Weiterhin könnte an einer anderen, noch zu identifizierenden Einrichtung eine Messung mit Bypass- und mit handgehaltenen Messgeräten durchgeführt werden, um die Aussagen beider Messergebnisse zu vergleichen. Die Einrichtung müsste über gammaspektrometrisch gut nachweisbare Nuklide verfügen (z. B. Ga-68) mit einem gut zugänglichen Kamin mit einer Probenentnahmemöglichkeit und einer baulichen Anordnung, die eine handgehaltene Messung möglich macht.

Für die Verwendung der nuklidspezifischen Messkammer sollte die Halbwertszeitkorrektur bei sehr kurzlebigen Radionukliden, deren Halbwertszeit deutlich kleiner ist als der betrachtete Auswertzeitraum, näher untersucht werden. Optimal wäre es, wenn eine Halbwertszeitkorrektur lediglich über einen Zeitraum von zehn Minuten angewandt wird, da die Stunden- und Tagesspektren aus einzelnen Zehnminutenspektren aufaddiert werden. Diese Anwendung ist jedoch sehr speziell, sodass es in InterWinner nach dem Kenntnisstand von DORNIER nicht vorgesehen ist. Es ist nach Ansicht von DORNIER jedoch notwendig, auch nach Abschluss der Messung die Spezifikationen bei der Auswertung entsprechend angeben zu können.

Um die grundsätzliche Einsatzfähigkeit von Bypass-Messkammern zu prüfen, wären Untersuchungen der NWG nötig, die mit den zulässigen Abgabewerten nach Anlage 11 Tabelle 6 StrlSchV verglichen werden. Daraus ließen sich Parameter ableiten, wie beispielsweise eine Mindest-Messdauer. Anhand der Ergebnisse kann abgeschätzt werden, für welche Radionuklide ein anderes Verfahren nötig ist.

Beispielsweise hat Tabelle 5 gezeigt, dass die NWG von I-125 bei den Tagesspektren der nuklidspezifischen Messkammer um den Faktor 1000 größer ist als der zulässige Ableitungswert. Hier ist keine sinnvolle Verlängerung der Messdauer möglich, um die erforderliche Nachweisgrenze zu erreichen.

6.4 Zusammenfassung

DORNIER sieht es nicht als realistisch, dass mit der aktuell verwendeten Messtechnik auch in kleinen Einrichtungen gemessen werden kann.

In vielen Einrichtungen ist die Durchführung von Kontrollmessungen mit Bypass-Messkammern aufgrund des benötigten Aufstellplatzes und der notwendigen Probenentnahmevorrichtung nur schwer möglich. DORNIER erachtet es deshalb als schwierig, Einrichtungen zu finden, in denen Kontrollmessungen überhaupt durchführbar sind. Stattdessen könnten bei Bedarf die Betreiber-eigene Messtechnik überprüft und die Emissionsberichte kritisch analysiert werden. In § 103 Absatz 1 Satz 1 StrlSchV ist zudem vorgesehen, dass bei einer nachgewiesenen Unterschreitung von 10 μSv Dosis auf Einzelpersonen der Bevölkerung im Kalenderjahr von der Überwachungspflicht abgesehen werden kann [2]. Dies wirkt sich auf die Durchführbarkeit von Kontrollmessungen aus, da erwartet werden kann, dass in solchen Einrichtungen die beschriebenen Randbedingungen für die Durchführbarkeit von Kontrollmessungen nicht gegeben sind.

DORNIER schätzt, dass für Kontrollmessungen andere Messtechnik benötigt wird, die ggf. erst angefertigt werden muss. Anforderungen an geeignete Messgeräte wurden in Kapitel 7.2 aufgeführt. Die Verhältnismäßigkeit des Aufwands ist noch zu prüfen. DORNIER erachtet das Anlegen eines Registers für Einrichtungen, in denen Kontrollen durchführbar und sinnvoll sind, als zielführend.

DORNIER hat festgestellt, dass auch bei den Einrichtungen, bei denen eine Aufstellung der Messgeräte ohne größere Probleme möglich war (JUM, IPR) die Verlustfaktoren aufgrund der langen und gebogenen Schläuche hoch waren. Eine Messung von aerosolanhaftender Aktivität ist so nur bedingt möglich. Wenn Messkammern mit Bypass-Messungen verwendet werden sollen, sind kurze Schlauchlängen mit möglichst wenigen Schlauchbögen wichtig.

7 Anhang

7.1 Liste der Einrichtungen

Die Listen der Einrichtungen, die im AP1 erstellt wurden, sind nachfolgend aufgeführt.

7.1.1 Nuklearmedizin

In Tabelle 8 sind alle Einrichtungen aufgeführt, die in der Untersuchung der Nuklearmedizin zugewiesen wurden.

Tabelle 10: Liste aller Einrichtungen der Nuklearmedizin, die bei der Online-Recherche identifiziert wurden. Wenn in der Web-Präsenz der Einrichtung keine Angaben zu gehandhabten Radionukliden zu finden waren, ist der Eintrag in der letzten Spalte "k. A."

Name der Einrichtung	Anschrift	Bundesland	Radionuklide
Nuklearmedizin			
Asklepios Klinik St. Georg - Abteilung für Nuklearmedizin	Lohmühlenstraße 5 20099 Hamburg	Hamburg	k. A.
Christian-Albrechts-Universität Kiel	Arnold-Heller-Straße 3 24105 Kiel	Schleswig- Holstein	F-18, Tc-99m, I-123, I-131, Re-186, Sm- 153, Ra-223, Ga-68, Y-90
Das Universitätsklinikum Brandenburg an der Havel	Johann-Carl-Sybel-Straße 1 14776 Brandenburg a. d. Havel	Brandenburg	k. A.
Forschungszentrum Jülich, Kühlersynchrotron COSY	Wilhelm-Johnen-Straße 52428 Jülich	Nordrhein- Westfalen	C-11, F-18, N-16, N- 13, O-15
Heinrich-Heine-Universität	Moorenstr. 5 40225 Düsseldorf	Nordrhein- Westfalen	Y-90, Tc-99m, Ra-223, I-131, F-18, I-123
Helios Klinikum Bad Saarow	Pieskower Straße 33 15526 Bad Saarow	Brandenburg	Ra-223, I-131, u. a.
Helios Klinikum Berlin-Buch	Schwanebecker Chaussee 50 13125 Berlin	Berlin	k. A.
Helios Klinikum Emil von Behring	Walterhöferstr. 11 14165 Berlin	Berlin	k. A.
Helios Universitätsklinikum Wuppertal	Heusnerstraße 40 42283 Wuppertal	Nordrhein- Westfalen	I-131, Sm-153
Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen (HDZ NRW)	Georgstraße 11 32545 Bad Oeynhausen	Nordrhein- Westfalen	Tc-99m
Klinik für Nuklearmedizin des Universitätsklinikums Gießen und Marburg	Baldingerstraße 35043 Marburg	Hessen	Tc-99m, I-131, I-123, Lu-177, Ga-68, Cu-64
Klinik für Nuklearmedizin Universitätsklinikum Düsseldorf	MNR-Klinik (Gebäude 13.52) Moorenstr. 5 40225 Düsseldorf	Nordrhein- Westfalen	Tc-99m, I-123, F-18, Y-90, Ra-223
Klinik für Nuklearmedizin Universitätsmedizin Göttingen	Bettenhaus 2, Ebene 01 Robert-Koch-Str. 40 37075 Göttingen	Niedersachsen	F-18, Ga-68, Lu-177
Klinik für Nuklearmedizin, Universitätsklinikum Essen	Hufelandstraße 55 45147 Essen	Nordrhein- Westfalen	Lu-177, Ga-68, Y-90, Tc-99m, Sm-153, F-18

Name der Einrichtung	Anschrift	Bundesland	Radionuklide
Nuklearmedizin			
Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, Universitätsklinikum Bonn	Venusberg-Campus 1 A Gebäude 21 53127 Bonn	Nordrhein-Westfalen	Lu-177, Ga-68, F-18, Sm-153, I-131, Ra-223
Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin Universitätsklinikum Hamburg Eppendorf	UKE Abteilung für Nuklearmedizin Gebäude O22 Martinistr. 52 20246 Hamburg	Hamburg	F-18, Ga-68, Lu-177
Klinikum Charité – Universitätsmedizin Berlin, Klinik für Nuklearmedizin	Charitéplatz 1 10117 Berlin	Berlin	Tc-99m, I-123, Y-90, Re-186, Er-169, Ra-223, I-131, Lu-177
Klinikum der Universität München	Marchioninistr. 15 81377 München	Bayern	F-18, Ga-68, I-131, Lu-177, Ra-223, Y-90, Tc-99m
Klinikum Konstanz	Luisenstr. 7 78464 Konstanz	Baden-Württemberg	I-131, F-18, Ga-68, Tc-99m, I-123, Ra-223, Y-90, Lu-177
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Medizinische Fakultät, Abteilung für Nuklearmedizin	Ernst-Grube-Straße 40 06120 Halle (Saale)	Sachsen-Anhalt	F-18, Y-90, Re-186, Lu-177, Sm-153, Ga-68, Tc-99m
Medizinische Hochschule Hannover Klinik für Nuklearmedizin	Carl-Neuberg-Straße 1 30625 Hannover	Niedersachsen	I-131, F-18, Lu-177, Y-90, Ra-223
Nuklearmedizin Uniklinik Köln	Kerpener Str. 62 50937 Köln	Nordrhein-Westfalen	Ga-68, F-18, Lu-177, I-131, Ra-223, Sm-153, In-111
Nuklearmedizinische Klinik und Poliklinik, Klinikum rechts der Isar der TU München	Ismaninger Straße 22 81675 München	Bayern	Ga-68, F-18, I-131, Lu-177, Ra-223, Tc-99m
Städtisches Klinikum Dresden	Friedrichstraße 41 01067 Dresden	Sachsen	k. A.
Städtisches Klinikum Karlsruhe gGmbH	Moltkestraße 90 76133 Karlsruhe	Baden-Württemberg	F-18, Ga-68
Südwestdeutsches PET-Zentrum Stuttgart	Seidenstraße 47 70174 Stuttgart	Baden-Württemberg	k. A.
Universitätsklinikum Aachen (AöR), Klinik für Nuklearmedizin	Pauwelsstraße 30 52074 Aachen	Nordrhein-Westfalen	F-18, Ga-68, Lu-177, Cu-64, Zr-89, Tc-99m, In-111, I-131
Universitätsklinikum AöR	Liebigstraße 18 Haus 3 04103 Leipzig	Sachsen	I-131, Y-90
Universitätsklinikum Carl Gustav Carus Dresden an der Technischen Universität Dresden	Fetscherstraße 74 01307 Dresden	Sachsen	k. A.
Universitätsklinikum des Saarlandes	Kirrberger Straße Gebäude 50 66421 Homburg	Saarland	I-131, Y-90, Re-186, Er-169, Lu-177, Ga-68, Ra-223, Sr-89, Sm-153, Zr-89

Name der Einrichtung	Anschrift	Bundesland	Radionuklide
Nuklearmedizin			
Universitätsklinikum Erlangen, Nuklearmedizinische Klinik	Ulmenweg 18 91054 Erlangen	Bayern	I-123, Tc-99m, Ga-68, F-18, I-131, Lu-177, Y-90, Ra-223
Universitätsklinikum Frankfurt, Klinik für Nuklearmedizin	Theodor-Stern-Kai 7 60596 Frankfurt am Main	Hessen	Ga-68, Tc-99m, F-18, I-123
Universitätsklinikum Heidelberg	Grabengasse 1 69117 Heidelberg	Baden- Württemberg	F-18, Ga-68, Y-90, Lu-177, Ac-225, I-131
Universitätsklinikum Jena	Am Klinikum 1 07747 Jena	Thüringen	I-131, Lu-177
Universitätsklinikum Leipzig, Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin	Liebigstraße 18 Haus 3 04103 Leipzig	Sachsen	I-123, Tc-99m, Y-90, F-18, N-13, O-15, C-11, Ga-68, C-11
Universitätsklinikum Magdeburg	Leipziger Str. 44 39120 Magdeburg	Sachsen- Anhalt	k. A.
Universitätsklinikum Münster, Klinik für Nuklearmedizin	Albert-Schweitzer-Campus 1 Gebäude A1 (ehem.: Albert-Schweitzer-Str. 33) 48149 Münster	Nordrhein- Westfalen	Ra-223, Cr-51, Tc- 99m, F-18, In-111, I- 123
Universitätsklinikum Regensburg, Abteilung für Nuklearmedizin	Franz-Josef-Strauß-Allee 11 93053 Regensburg	Bayern	I-131, F-18, Tc-99m, Lu-177, Ga-68
Universitätsklinikum Ulm, Nuklearmedizin	Albert-Einstein-Allee 23 89081 Ulm	Baden- Württemberg	I-131, Lu-177, Y-90, Ra-223
Universitätsklinikum und Medizinische Fakultät Tübingen	Otfried-Müller-Straße 146 72076 Tübingen	Baden- Württemberg	I-131, Y-90, Tc-99m, Cr-51, Lu-177, Ga-68, Ra-223, Sm-153
Universitätsklinikum Würzburg	Josef-Schneider-Straße 2 97080 Würzburg	Bayern	Sm-153, I-131, Lu- 177, Y-90, F-18, Ga- 68, C-11
Universitätsmedizin Greifswald, Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin	Fleischmannstraße 44 17475 Greifswald	Mecklenburg- Vorpommern	I-131, I-123, Tc-99m, Y-90
Universitätsmedizin Mainz	Langenbeckstraße 1 55131 Mainz	Rheinland- Platz	Lu-177, Ga-68, I-131, Y-90, Re-186
Universitätsmedizin Mannheim	Theodor-Kutzer-Ufer 1-3 68167 Mannheim	Baden- Württemberg	k. A.
Universitätsmedizin Rostock	Gertrudenplatz 1 18057 Rostock (PET-CT Schillingallee 35, EG der CUK)	Mecklenburg- Vorpommern	Ra-223, Sm-153, I- 131, P-32, Y-90, Lu- 177, Tc-99m, I-123
Vivantes Klinikum Friedrichshain	Landsberger Allee 49 10249 Berlin	Berlin	I-123, Tc-99m
Vivantes Klinikum Neukölln	Rudower Str. 48 12351 Berlin	Berlin	Ga-68, Lu-177, I-131, Y-90

7.1.2 Isotopenproduktion

Nachfolgend sind in Tabelle 9 alle Einrichtungen aufgeführt, die in der Untersuchung des AP1 der Isotopenproduktion zugeordnet wurden.

Tabelle 11: Liste aller Einrichtungen der Isotopenproduktion, die bei der Online-Recherche identifiziert wurden. Wenn in der Web-Präsenz der Einrichtung keine Angaben zu gehandhabten Radionukliden zu finden waren, ist der Eintrag in der letzten Spalte "k. A."

Name der Einrichtung	Anschrift	Bundesland	Radionuklide
Isotopenproduktion			
Advanced Accelerator Applications Germany GmbH Im Klinikum der Universität München	Marchioninistraße 15 81377 München	Bayern	Lu-177, Ga-68, F-18, Ac-225
bebig	Robert-Rössle-Str. 10 13125 Berlin	Berlin	k. A.
Campro Scientific GmbH, Deutschland	Webshop Goerzallee 299 14167 Berlin	Berlin	P-32, P-33, S-35, Cl-36, Ca-45, Cr-51, Y-90, I-125, I-126, I-128, I-129, I-130, I-131, In-111, Ra-224, Lu-177, C-14, H-3, S-35
Das Heinz Maier-Leibnitz Zentrum (MLZ)	Lichtenbergstr. 1 85747 Garching	Bayern	Yb-176, Lu-177, Ho-166, Tb-161, Mo- 99
Eckert & Ziegler Strahlen- und Medizintechnik AG	Robert-Rössle-Str. 10 13125 Berlin	Berlin	O-18, Co-60, Te- 123m, F-18, I-123, Lu- 177, Ac-225, P-32, Th- 228, Y-90, Cr-51, Na- 22
Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) Wissenschaftliche Zentralinstitute Technische Universität München - kerntechnische Anlage!	Lichtenbergstr. 1 85747 Garching	Bayern	Co-60, Lu-177, Yb- 176, Ho-166, Tb-161, Tc-99m, Mo-99, Si-30
Forschungszentrum Jülich, Kühlersynchrotron COSY	Wilhelm-Johnen-Straße 52428 Jülich	Nordrhein- Westfalen	C-11, O-15, F-18, Ar-41, N-13, O-19
GE Healthcare	Gieselweg 1 38110 Braunschweig	Niedersachse n	I-123, I-131, Tc-99m, Se-75, F-18
GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH	Planckstraße 1 64291 Darmstadt	Hessen	k. A.
Herz- und Diabeteszentrum Nordrhein-Westfalen (HDZ NRW)	Georgstraße 11 32545 Bad Oeynhausen	Nordrhein- Westfalen	F-18, O-15, N-13, C- 11, Ga-68, Tc-99m
ITM Isotope Technologies Munich SE	Walther-von-Dyck-Str. 4 85748 Garching / München	Bayern	Lu-177, Ga-68, Tb- 161, Sm-153, Ho-166, Ac-225, Sc-44, In-111, Bi-213, F-18
IUT Institut für Umwelttechnologien GmbH	Justus-von-Liebig-Straße 6 12489 Berlin	Berlin	C-14, Kr-85

Name der Einrichtung	Anschrift	Bundesland	Radionuklide
Isotopenproduktion			
Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Kernphysik	Johann-Joachim-Becher-Weg 45 D 55128 Mainz	Rheinland-Pfalz	F-18, C-11, Ge-68, Rb-82, Cu-62, As-72, Sc-44, Nb-90, Tc-99m, N-13, O-15
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Medizinische Fakultät, Abteilung für Nuklearmedizin	Ernst-Grube-Straße 40 06120 Halle (Saale)	Sachsen-Anhalt	F-18, Y-90, Er-169, Re-186, Lu-177, Sm-153, Ga-68, Tc-99m
Medizinische Hochschule Hannover Klinik für Nuklearmedizin	Carl-Neuberg-Straße 1 30625 Hannover	Niedersachsen	F-18, Ga-68
Nuklearmedizinische Klinik und Poliklinik, Klinikum rechts der Isar der TU München	Ismaninger Straße 22 81675 München	Bayern	Ga-68, F-18, Lu-177, Ac-225, C-11
ROTOP Pharmaka GmbH	Bautzner Landstraße 400 01328 Dresden	Sachsen	I-123, Tc-99m
Technische Universität Dortmund, DELTA Zentrum für Synchrotronstrahlung	Maria-Goeppert-Mayer-Str. 2 44227 Dortmund	Nordrhein-Westfalen	k. A.
Universitätsklinikum Leipzig, Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin	Liebigstraße 18 Haus 3 04103 Leipzig	Sachsen	F-18, N-13, O-15, C-11, Zr-89
Universitätsklinikum Münster	Albert-Schweitzer-Campus 1 Gebäude A1 (ehem.: Albert-Schweitzer-Str. 33) 48149 Münster	Nordrhein-Westfalen	F-18, C-11, N-13, O-15, Ge-68/Ga-68
Universitätsklinikum Ulm, Nuklearmedizin	Albert-Einstein-Allee 23 89081 Ulm	Baden-Württemberg	F-18, Ga-68, C-11, N-13, Lu-177
Universitätsklinikum Würzburg	Josef-Schneider-Straße 2 97080 Würzburg	Bayern	F-18, C-11, I-124
Vivantes Klinikum Am Urban	Dieffenbachstraße 1 10967 Berlin	Berlin	Ga-68, Lu-177
WITEGA Laboratorien Berlin-Adlershof GmbH, Deutschland	James-Franck-Straße 4 12489 Berlin	Berlin	C-13, N-15
ZAG Zyklotron AG	Hermann-von-Helmholtz-Platz 1 76344 Eggenstein-Leopoldshafen	Baden-Württemberg	I-123, Rb-81, F-18, Be-7, Zr-89, Cu-64, Fe-57, V-48
Zyklotron PETtrace (Uniklinik Tübingen)	Röntgenweg 15 72076 Tübingen	Baden-Württemberg	k. A.
Zyklotron PETtrace (Uniklinik Ulm)	Altert-Einstein-Allee 23 89081 Ulm	Baden-Württemberg	F-18, Ga-68, C-11, N-13, Lu-177

7.1.3 Großforschung

Die nachfolgend in Tabelle 10 aufgeführten Einrichtungen sind in der Untersuchung im AP1 der Großforschung zugeordnet worden.

Tabelle 12: Liste aller Einrichtungen der Großforschung, die bei der Online-Recherche identifiziert wurden. Wenn in der Web-Präsenz der Einrichtung keine Angaben zu gehandhabten Radionukliden zu finden waren, ist der Eintrag in der letzten Spalte "k. A."

Name der Einrichtung	Anschrift	Bundesland	Radionuklide
Großforschung			
Advanced Accelerator Applications Germany GmbH Im Klinikum der Universität München	Marchioninistraße 15 81377 München	Bayern	Lu-177, Ga-68, Ac-225, F-18, Y-90, Ra-223, I-131, Tc-99m, C-11, Cu-64
Das Deutsche Krebsforschungszentrum (dkfz), Heidelberger Institut für Radioonkologie	Im Neuenheier Feld 280 69120 Heidelberg	Baden-Württemberg	Rn-222, Co-60
Das Heinz Maier-Leibnitz Zentrum (MLZ) TU München	Lichtenbergstr. 1 85747 Garching	Bayern	Mo-99, Tc-99m
DESY	Notkestr. 85, 22607 Hamburg	Hamburg	k. A.
Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) Wissenschaftliche Zentralinstitute Technische Universität München	Lichtenbergstr. 1 85747 Garching	Bayern	Eu-152, Eu-152m, Lu-177, Ir-192
Forschungs-Zentrum Jülich mit Landessammelstelle / Institut für Neurowissenschaften und Medizin (INM)	Wilhelm-Johnen-Straße 52428 Jülich	Nordrhein-Westfalen	Ra-226, Rn-222, Am-241, Cm-244, Ba-133, Cs-137, Eu-152, I-129
GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt	Planckstraße 1 64291 Darmstadt	0	k. A.
Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, BESSY II	Albert-Einstein-Straße 15 12489 Berlin	Berlin	H-3
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf	Bautzner Landstraße 400 01328 Dresden	Sachsen	F-18, C-11, Th-99m, Lu-177, Ac-225, Rn-222, La-133, Ga-68,
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung, Abteilung Ionenstrahlzentrum	Bautzner Landstraße 400 01328 Dresden	Sachsen	Br-80, Pt-190, Pt-198, Ta-181, Ce-141, Na-22, Tl-204, Be-10, Pu-242, Rb-87, H-3
Institut für Radioonkologie - OncoRay, OncoRay – National Center for Radiation Research in Oncology	Fetscherstr. 74 PF 41 01307 Dresden	Sachsen	F-18
Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Kernphysik	Johann-Joachim-Becher-Weg 45 D 55128 Mainz	Rheinland-Pfalz	Ni-68
Klinikum Charité – Universitätsmedizin Berlin, Klinik für Nuklearmedizin	Charitéplatz 1 10117 Berlin	Berlin	F-18, Tc-99m, C-11, I-124

Name der Einrichtung	Anschrift	Bundesland	Radionuklide
Großforschung			
Leibniz-Universität Hannover, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz	Herrenhäuser Str. 2 Gebäude 4113 30419 Hannover	Niedersachsen	Tc-99, I-129, I-125, Ra-226, Pa-234m, Pu-241
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg Medizinische Fakultät Abteilung für Nuklearmedizin	Ernst-Grube-Straße 40 06120 Halle (Saale)	Sachsen-Anhalt	k. A.
Max-Planck-Institut für Kernphysik	Saupfercheckweg 1 Gebäude: Gentnerlabor Raum 134 69117 Heidelberg	Baden-Württemberg	k. A.
Medizinische Hochschule Hannover Klinik für Nuklearmedizin	Carl-Neuberg-Straße 1 30625 Hannover	Niedersachsen	F-18, Ga-68
Nuklearmedizinische Klinik und Poliklinik, Klinikum rechts der Isar der TU München	Ismaninger Straße 22 81675 München	Bayern	Lu-177, Ra-223, F-18, Ga-68
PTB	Bundesallee 100 38116 Braunschweig	Niedersachsen	k. A.
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Physikalisches Institut der Universität Bonn, ELSA	Nussallee 12 53115 Bonn	Nordrhein-Westfalen	k. A.
Technischen Universität Darmstadt.	Schloßgartenstraße 9 64289 Darmstadt	Hessen	k. A.
the karlsruhe institute of technology	Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen	Baden-Württemberg	H-3, Kr-83m
Universität Hamburg, Institut für Experimentalphysik	Luruper Chaussee 149 22761 Hamburg	Hamburg	k. A.
Universitätsklinikum Heidelberg	Grabengasse 1 69117 Heidelberg	Baden-Württemberg	F-18, Ga-68, I-131, Lu-177, Tc-99m, I-123
Universitätsklinikum Leipzig, Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin	Liebigstraße 18 Haus 3 04103 Leipzig	Sachsen	Y-90, Lu-177, I-131, F-18, C-11
Universitätsklinikum Münster Klinik für Nuklearmedizin	Albert-Schweitzer-Campus 1 Gebäude A1 (ehem.: Albert-Schweitzer-Str. 33) 48149 Münster	Nordrhein-Westfalen	F-18, Ga-68, Tc-99m, Lu-177,
Universitätsklinikum Ulm, Nuklearmedizin	Albert-Einstein-Allee 23 89081 Ulm	Baden-Württemberg	Zr-89, Lu-177, Ra-223, I-123, Br-77, Y-90, F-18
Wendelstein 7-X im IPP-Teilinstitut Greifswald	Wendelsteinstr. 1 17491 Greifswald	Mecklenburg-Vorpommern	Aktivierungsprodukte im Beton/Stahl
ZAG Zyklotron AG	Hermann-von-Helmholtz-Platz 1 76344 Eggenstein-Leopoldshafen	Baden-Württemberg	F-18, Te-121m, Te-121, I-123

7.2 Bewertungsmatrizes

Nachfolgend werden die Bewertungsmatrizes gezeigt, die zur Einordnung der in Abschnitt 8.1 dargestellten Einrichtungen herangezogen wurden. Tabelle 11 zeigt die Bewertungsmatrix für Einrichtungen vom Typ Nuklearmedizin. In Tabelle 12 ist die Bewertungsmatrix für Einrichtungen der Isotopenproduktion gezeigt. Die Einrichtungen der Großforschung sind gemäß Tabelle 13 bewertet worden.

Tabelle 13: Bewertungsmatrix und Gewichte für die Bewertungen der nuklearmedizinischen Einrichtungen, die in der Internetrecherche identifiziert wurden.

Nuklearmedizin			
Kriterium	Beschreibung	Mögl. Punktzahl	Gewicht
Anzahl der Radionuklide	Die Anzahl verschiedener gehandhabter Radionuklide wird anhand von Informationen auf der Homepage abgeschätzt.	1..5	5
Dosiskoeffizienten	Die Liste aller in der Online-Recherche gefundenen Radionuklide wird anhand der Dosiskoeffizienten für Gammasubmersion in Quintile aufgeteilt. Das höchste für eine Einrichtung zutreffende Quintil bestimmt die Punktzahl.	1..5	5
Vielfalt der Diagnose- und Therapiearten	Werden neben PET, Radioiodtherapie und Strahlentherapie auch andere Diagnose- und Therapiearten angewandt?	1..5	4
Räumliche Entfernung zur Dornier Group	Wie kurz wäre eine Fahrt zur Einrichtung von Berlin oder Dresden (Standorte der Dornier Group) mit öffentlichen Verkehrsmitteln?	1..5	3
Kombination mit Isotopenproduktion	Werden eigene Isotope vor Ort hergestellt?	0..1	2
Kombination mit Forschung	Handelt es sich um eine Universitätsklinik oder findet anderweitig Forschung statt?	0..1	2
Persönlicher Kontakt vorhanden?	Hat die Dornier Group oder das BfS bereits einen persönlichen Kontakt zur Einrichtung, was die Kontaktierung erleichtern kann?	0..1	5

Tabelle 14: Bewertungsmatrix und Gewichte für die Bewertungen der Einrichtungen im Bereich Isotopenproduktion, die in der Internetrecherche identifiziert wurden.

Isotopenproduktion			
Kriterium	Beschreibung	Mögl. Punktzahl	Gewicht
Anzahl der Radionuklide	Die Anzahl verschiedener gehandhabter Radionuklide wird anhand von Informationen auf der Homepage abgeschätzt.	1..5	5
Dosiskoeffizienten	Die Liste aller in der Online-Recherche gefundenen Radionuklide wird anhand der Dosiskoeffizienten für Gammasubmersion in Quintile aufgeteilt. Das höchste für eine Einrichtung zutreffende Quintil bestimmt die Punktzahl.	1..5	5
Beschleuniger vorhanden?	Ist ein Beschleuniger (z. B. Zyklotron) vorhanden?	0..1	5
Räumliche Entfernung zur Dornier Group	Wie kurz wäre eine Fahrt zur Einrichtung von Berlin oder Dresden (Standorte der Dornier Group) mit öffentlichen Verkehrsmitteln?	1..5	3
Kombination mit Forschung	Wird vor Ort geforscht?	0..1	2
Kombination mit Medizin	Ausschlusskriterium! Bei Kombination mit Medizin wird die Einrichtung nicht weiter betrachtet (Gesamtpunktzahl 0).	0..1	2
Persönlicher Kontakt vorhanden?	Hat die Dornier Group oder das BfS bereits einen persönlichen Kontakt zur Einrichtung, was die Kontaktierung erleichtern kann?	0..1	5

Tabelle 15: Bewertungsmatrix und Gewichte für die Bewertungen der Einrichtungen im Bereich Großforschung, die in der Internetrecherche identifiziert wurden.

Großforschung			
Kriterium	Beschreibung	Mögl. Punktzahl	Gewicht
Anzahl der Radionuklide	Die Anzahl verschiedener gehandhabter Radionuklide wird anhand von Informationen auf der Homepage abgeschätzt.	1..5	1
Dosiskoeffizienten	Die Liste aller in der Online-Recherche gefundenen Radionuklide wird anhand der Dosiskoeffizienten für Gammasubmersion in Quintile aufgeteilt. Das höchste für eine Einrichtung zutreffende Quintil bestimmt die Punktzahl.	1..5	5
Beschleuniger vorhanden?	Ist ein Beschleuniger (z.B. Zyklotron) vorhanden?	0..1	3
Vielfalt der Forschungsgebiete	An wie vielen unterschiedlichen Themen wird geforscht?	1..5	2
Räumliche Entfernung zur Dornier Group	Wie kurz wäre eine Fahrt zur Einrichtung von Berlin oder Dresden (Standorte der Dornier Group) mit öffentlichen Verkehrsmitteln?	1..5	3
Kombination mit Isotopenproduktion	Werden eigene Isotope vor Ort hergestellt?	0..1	2
Kombination mit Medizin	Handelt es sich um eine Uniklinik oder finden anderweitig medizinische Anwendungen statt?	0..1	2
Persönlicher Kontakt vorhanden?	Hat die Dornier Group oder das BfS bereits einen persönlichen Kontakt zur Einrichtung, was die Kontaktierung erleichtern kann?	0..1	5

7.3 Kalibrierfaktor

In Kapitel 4.1.3.1 wird beschrieben, wie der Kalibrierfaktor für die integrale Messkammer rechnerisch bestimmt worden ist. Das Ergebnis ist in Form der erhaltenen Kalibrierkurve in Abbildung 2 dargestellt. Daten für das energieabhängige Ansprechvermögen bei den mittleren Betaenergien einiger gängiger Radionuklide wurden der DIN 25457-1 entnommen und so skaliert, dass ein sigmoidaler Fit (siehe Gleichung 6) den Wert enthält, den das BfS für Xe-133 am integralen Messplatz bestimmt hat. Die Wahl der Skalierung ist damit stark abhängig von der Richtigkeit des Werts für Xe-133. Wenn die Daten jedoch nur per Augenmaß an den Xe-133-Wert skaliert werden, ohne die Zusatzinformation des Fits, dann sind auch andere Skalierungsfaktoren denkbar. In Abbildung 29 sind neben der im Hauptdokument verwendeten Skalierung zwei extreme Darstellungen gezeigt: „Kleine Skalierung“ bezeichnet die Skalierung mit einem recht kleinen Faktor, „große Skalierung“ die Skalierung mit einem recht großen Faktor. In allen drei Datensätzen ist der Wert für Xe-133 (in Abbildung 29 durch eine magentafarbene Raute dargestellt) nicht als signifikanter Ausreißer zu identifizieren.

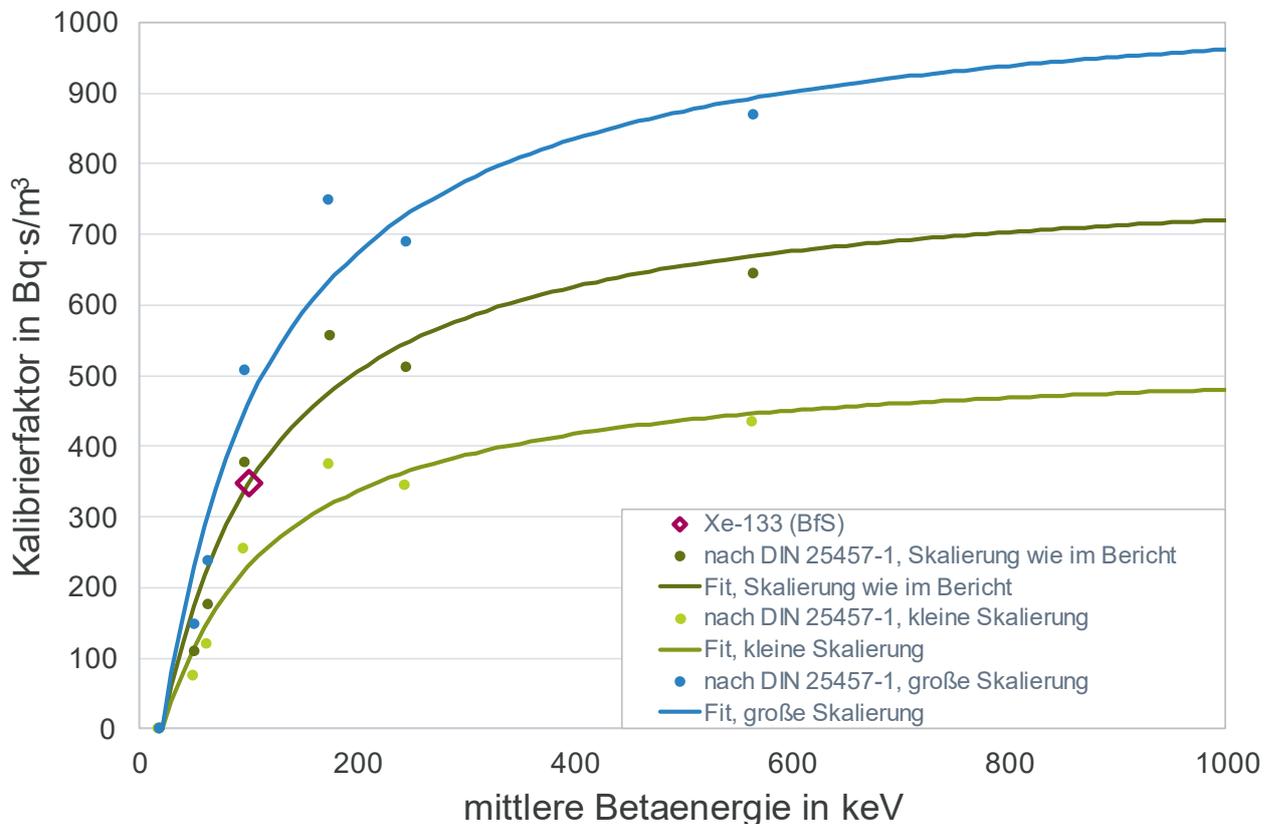


Abbildung 29: Variierung der Skalierung beim Anpassen der Messdaten an die bekannte Kalibrierung (Xe-133, durch eine dunkelrote Raute gekennzeichnet).

7.4 Rohdaten des Schirmzählers SZ2 der integralen Messkammer

Nach der Stromabschaltung im JUM-Container am 21.03.2024 kam es zu einem Problem mit dem Schirmzähler SZ2 der integralen Messkammer. Die Daten enthielten einen Offset, der durch ein elektronisches Problem (Veränderung der Verstärkung) erklärt werden könnte. Die Messdaten konnten im Nachhinein korrigiert werden, jedoch zeigt der Vergleich mit den betriebsbereiten Ergebnissen der Messreihe 3 bei FOR (vgl. Abschnitt 6.1.2), dass ein weiteres Problem vorliegt. In Abbildung 30 sind die Rohdaten des betroffenen Schirmzählers dargestellt. Es ist ein deutlicher Sprung zum Zeitpunkt der Stromabschaltung erkennbar.

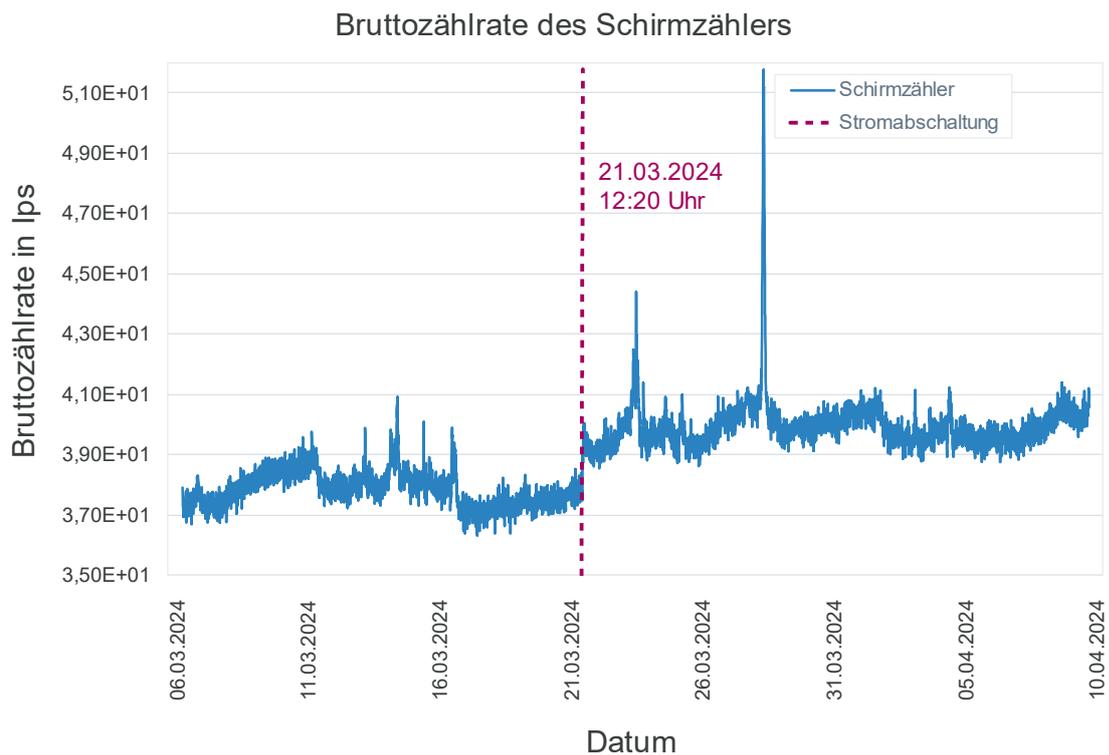


Abbildung 30: Verlauf der Rohdaten des Schirmzählers SZ2 der integralen Messkammer. Ab dem Zeitpunkt der Stromabschaltung (als gestrichelte Linie gekennzeichnet) ist ein deutlicher Offset zu sehen.

7.5 Weiterführende grafische Auswertungen von Messdaten

In Kapitel 5 wurde eine Auswahl der Messergebnisse gezeigt. In diesem Abschnitt werden einige ergänzende Messdaten dargestellt.

7.5.1 Weitere nuklidspezifische Daten von JUM

In Kapitel 5.1.2 wurden die Messergebnisse von JUM gezeigt, dabei beschränkt sich der Umfang der nuklidspezifischen Ergebnisse auf die Radionuklide I-123 und I-125. In Abbildung 31 sind außerdem die Daten für K40 dargestellt.

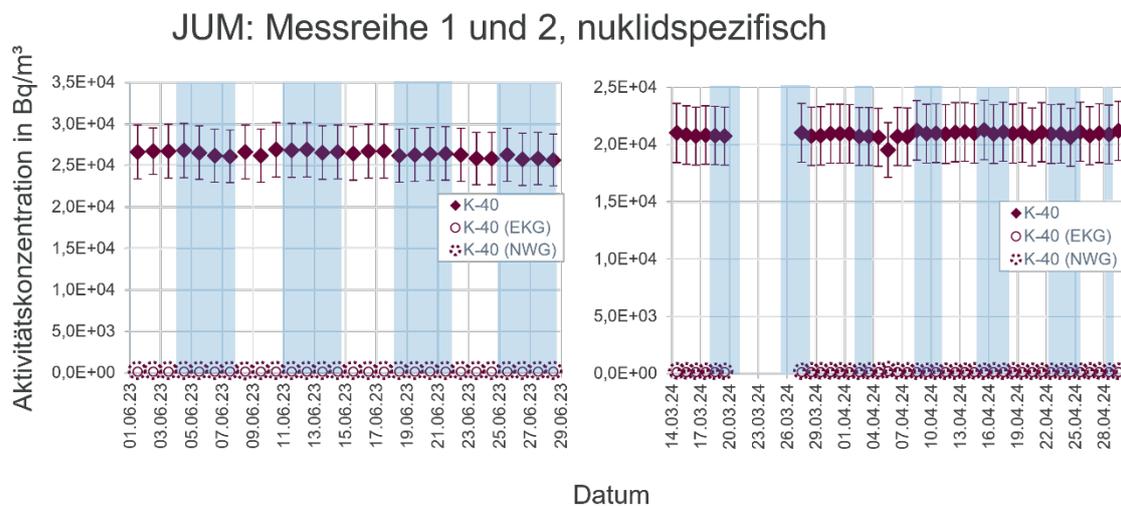


Abbildung 31: Messreihe 1 (links) und Messreihe 2 (rechts) bei JUM mit der nuklidspezifischen Messkammer. Aktivitätskonzentrationen (volle Rauten), NWG (gestrichelte leere Kreise) und EKG (kleine leere Kreise) von K-40.

7.5.2 Weitere nuklidspezifische Daten von IPR

In Kapitel 5.3.25.1.2 wurden die Messergebnisse von IPR gezeigt. Der Umfang beschränkt sich bei den nuklidspezifischen Ergebnissen auf das Radionuklid Ga-68. In Abbildung 32 sind außerdem die Daten für K-40 dargestellt sowie die EKG aller Radionuklide aus der Nuklidtabelle, die gemäß Tabelle 3 in die Auswertung einbezogen wurden.

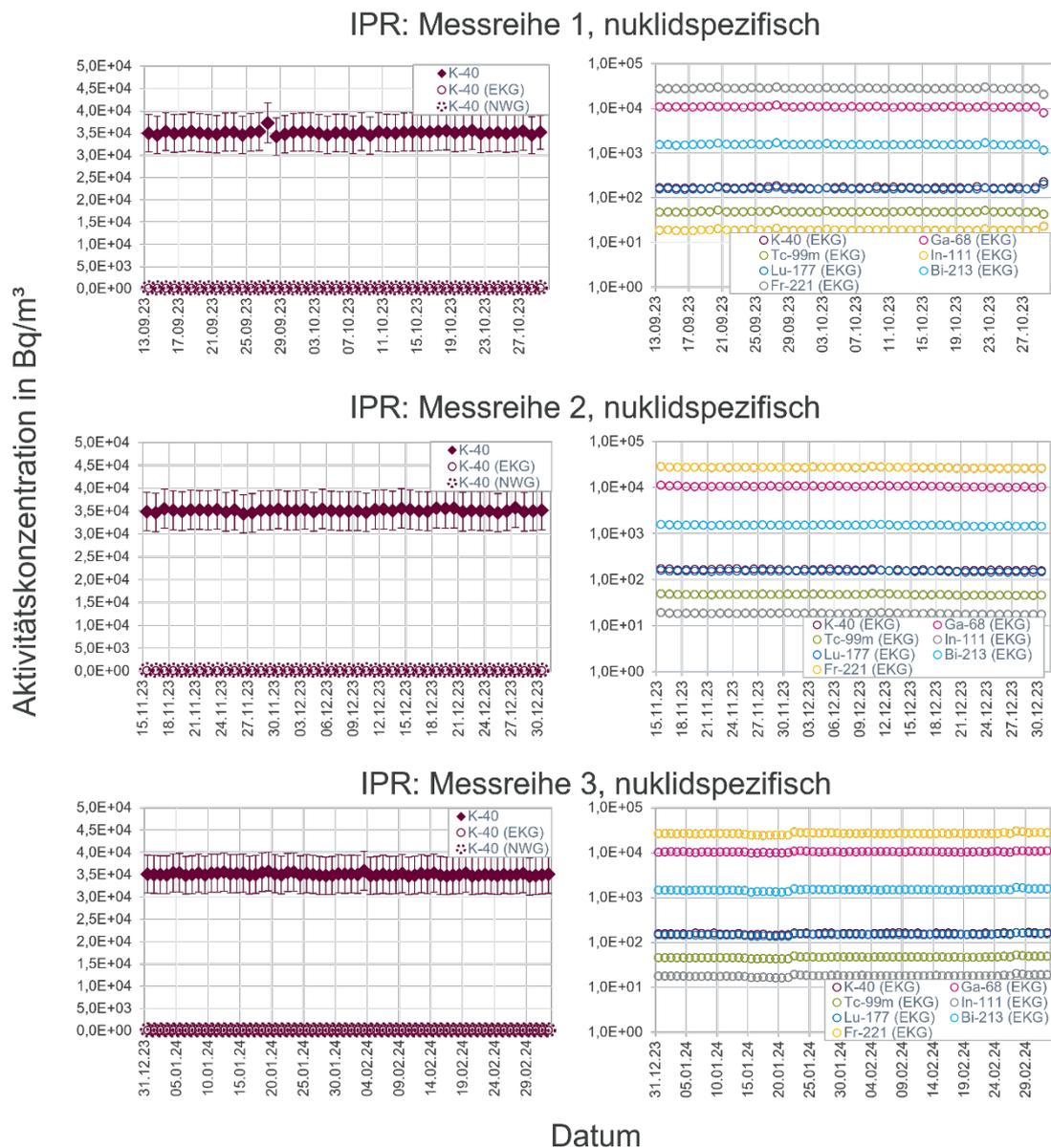


Abbildung 32: Messreihe 1 (oben), 2 (mittig) und 3 (unten) bei IPR mit der nuklidspezifischen Messtechnik. Aktivitätskonzentrationen (volle Rauten), NWG (gestrichelte leere Kreise) und EKG (kleine leere Kreise) des Radionuklides K-40 (rechts) und links EKG aller betrachteten Radionuklide.

7.5.3 Anstieg des Messsignals bei IPR am 14.-15.10.2023

In der Nacht vom 14.10. auf den 15.10.2023 kam es in der Zeit von ca. 22:30 Uhr bis 3 Uhr morgens zu einem erhöhten Messsignal im integralen Messsystem. Wie aus der linken Grafik in Abbildung 33 ersichtlich ist, zeigt dieses Messsignal einen starken Anstieg und einen anschließenden Abfall, der augenscheinlich exponentiell abnimmt. Das deutet auf eine tatsächliche Abgabe hin und nicht auf eine zufällige, zeitlich begrenzte Störung des Messsystems. In den gammaspektrometrischen Daten der nuklidspezifischen Messkammer konnte jedoch kein erhöhtes Signal festgestellt werden, wie auf der rechten Seite von Abbildung 33 erkenntlich ist. Daher wird vermutet, dass die Abgabe nicht durch Ga-68 zustande gekommen ist. Ein Umgang mit Y-90 wurde von IPR nicht bestätigt. Auch ist die Uhrzeit der Abgabe sehr merkwürdig. Von IPR wurde überprüft und bestätigt, dass zu dieser Zeit keine Arbeiten im Labor oder auf den Gängen stattgefunden haben. Ein Problem mit der Lüftung konnte ebenfalls ausgeschlossen werden. Zu Niederschlag kam es in der Nacht ebenfalls nicht. Das Phänomen konnte nicht aufgeklärt werden.

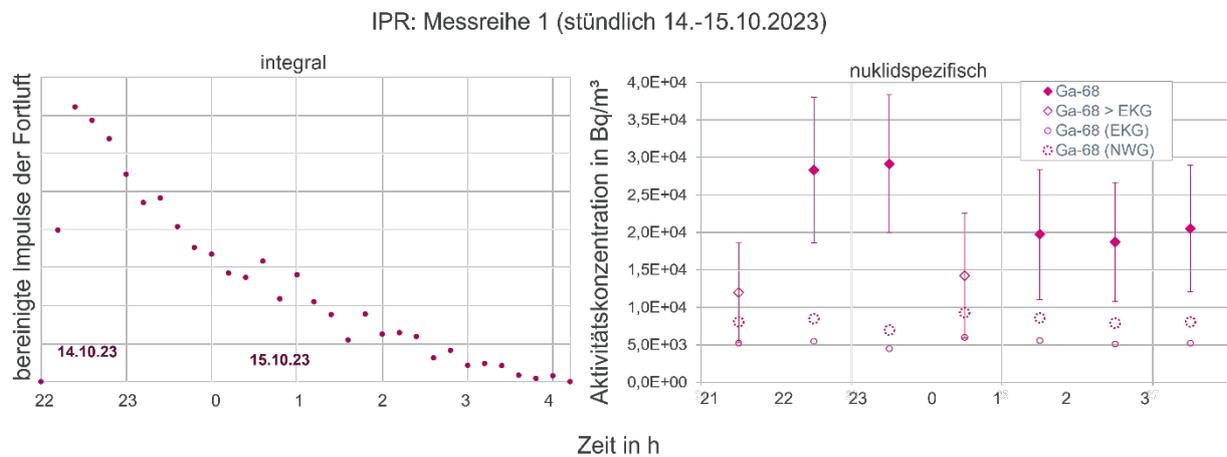


Abbildung 33: Links: integrale Messdaten vom 14.10-15.10.2023, rechts: nuklidspezifische Messdaten für Ga-68 vom 14.10-15.10.2023. Anstieg der Abgabe in der Fortluft im integralen Messsystem nicht korrigierbar mit den nuklidspezifischen Daten.

7.5.4 Weitere nuklidspezifische Daten von MED

In Kapitel 5.4.2 wurden nuklidspezifische Daten für die Radionuklide K-40 und I-131 gezeigt. Darüber hinaus sind in Abbildung 34 Messergebnisse der Jodstation für Lu-177 und Ra-223 dargestellt sowie die EKG aller betrachteten Nuklide gemäß Tabelle 4. In Abbildung 35 folgt die analoge Darstellung für die Messungen am Kamin des Heißlabors.

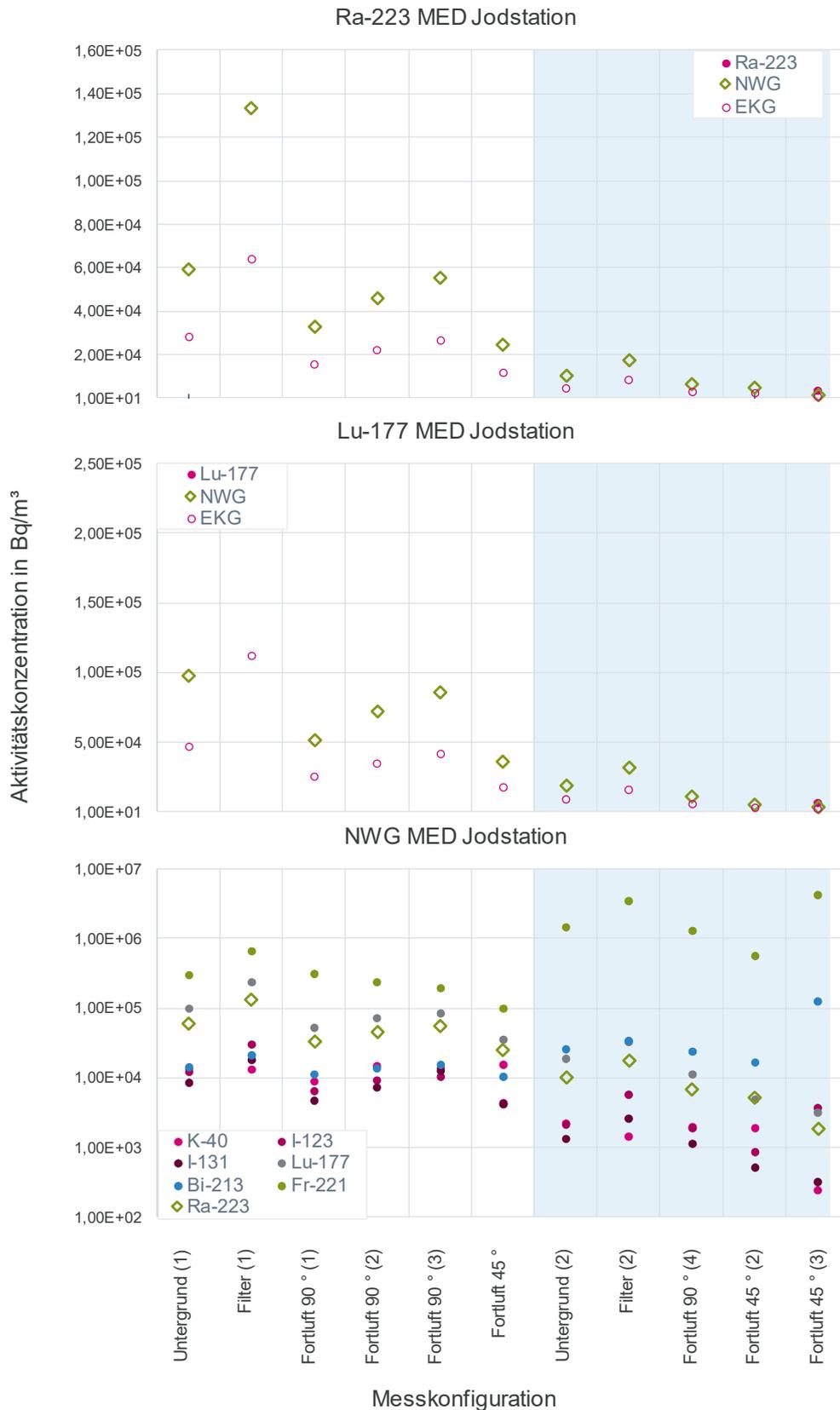


Abbildung 34: Messwerte für Ra-223 (oben), Lu-177 (mittig) sowie die NWG aller betrachteten Radionuklide (unten) am Kamin der MED-Jodstation. Messzeiträume, in denen Langzeitmessungen vorgenommen wurden, sind in den Grafiken blau unterlegt.

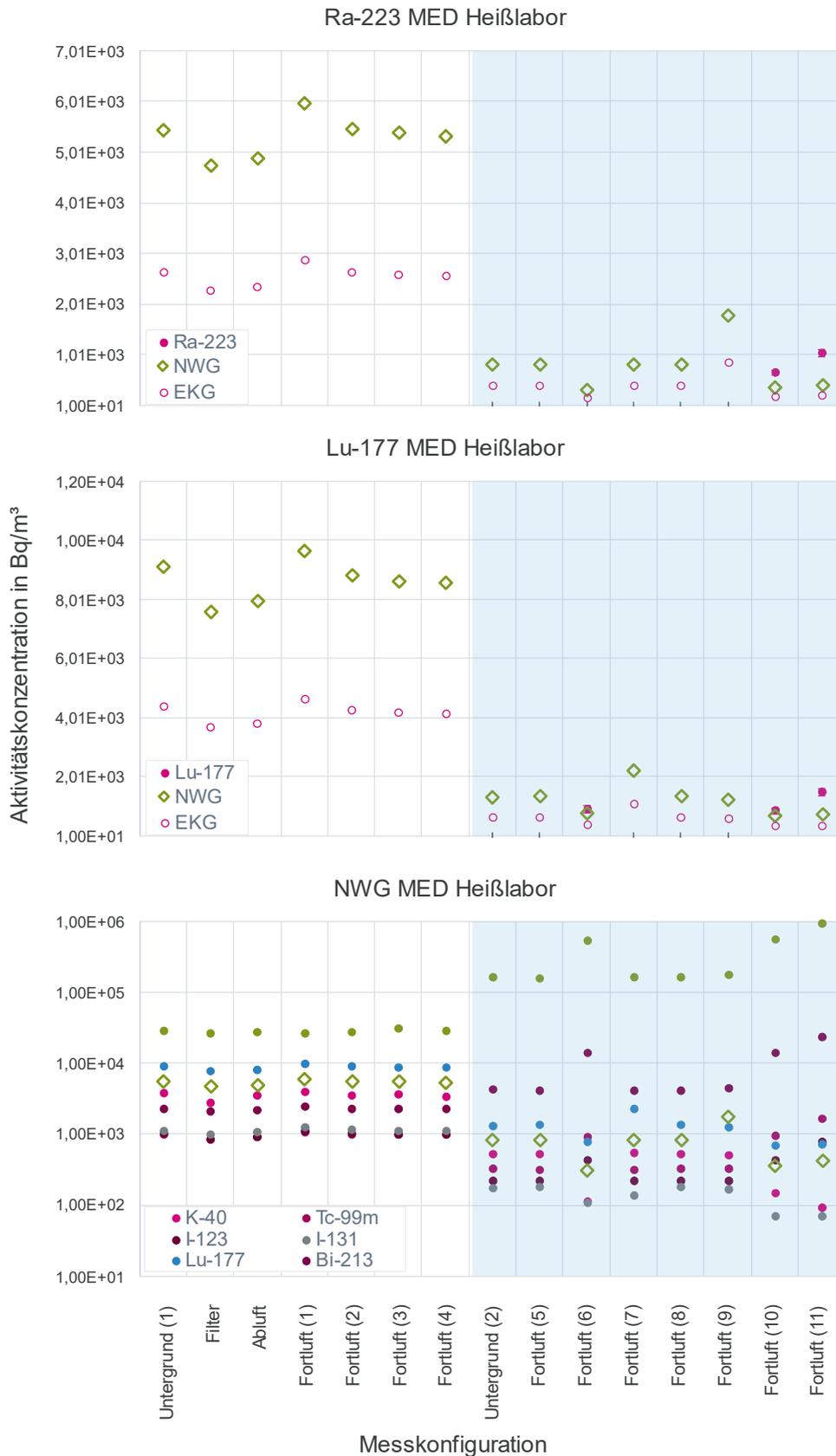


Abbildung 35: Messwerte für Ra-223 (oben), Lu-177 (mittig) sowie die NWG aller betrachteten Radionuklide (unten) am Kamin des MED-Heißlabors. Messzeiträume, in denen Langzeitmessungen vorgenommen wurden, sind in den Grafiken blau unterlegt.