

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6728

**Inkorporationsüberwachung auf Transurane durch
Messung der Aktivitätskonzentration in der Raumluft
mit festinstallierten Aerosolsammlern**

H. Doerfel

Hauptabteilung Sicherheit

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2002

Impressum der Print-Ausgabe:

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

ISSN 0947-8620

Zusammenfassung

Zur routinemässigen Inkorporationsüberwachung auf Transurane werden im Forschungszentrum Karlsruhe Aerosolsammler eingesetzt, die an repräsentativen Stellen in allen Bereichen mit potenziellen α -Kontaminationen installiert sind. Die Sammler saugen die Raumluft mit Durchsatzraten zwischen $15 \text{ m}^3/\text{h}$ und $70 \text{ m}^3/\text{h}$ über ein Aerosolfilter mit einem Durchmesser von 20 cm. Die Filter werden arbeitstäglich oder wöchentlich gewechselt und in dreistufigen Proportionalzählersystemen zur Bestimmung der gesammelten α - und β -Aktivität ausgewertet. Hierbei wird zur Diskriminierung der von der natürlichen Aktivität verursachten Untergrundkomponente die sogenannte Pseudokoinzidenz-Technik angewandt. Die untere Nachweisgrenze des Messverfahrens hängt von der Luftdurchsatzrate der Aerosolsammler, der Abklingzeit zwischen Beaufschlagung und Auswertung sowie von der Messzeit bei der Auswertung der Aerosolfilter ab. Bei der Standard-Luftdurchsatzrate von $25 \text{ m}^3/\text{h}$, einer Abklingzeit von mindestens 6 Tagen und einer Filter-Messzeit von etwa 1000 s entspricht die untere Nachweisgrenze einer α -Aktivitätskonzentration in Höhe von $1,8 \text{ mBq/m}^3$.

Nach den Vorgaben der neuen Strahlenschutzverordnung bzw. den Vorgaben der entsprechenden Richtlinien müssen die Verfahren zur Inkorporationsüberwachung auf Transurane in der Lage sein, eine jährliche Aktivitätszufuhr in Höhe von 31 Bq Pu-239 nachzuweisen. Bei Zugrundelegung einer durchschnittlichen Atemrate von $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$ und einer jährlichen Arbeitszeit in den Kontrollbereichen von 2000 h entspricht dies einer α -Aktivitätskonzentration in Höhe von 13 mBq/m^3 . Eine Aktivitätskonzentration in dieser Höhe kann mit der Raumluftüberwachung im Prinzip ohne Schwierigkeiten nachgewiesen werden.

Bei der Bestimmung der täglichen Aktivitätszufuhr wird die Aufenthaltszeit der einzelnen Beschäftigten in den überwachten Bereichen sowie der Maximalwert der in den betreffenden Bereichen an dem betreffenden Tag jeweils gemessenen Aktivitätskonzentration zugrundegelegt. Mit diesem Verfahren kann bei täglicher Überwachung eine repräsentative Abschätzung der jährlichen Gesamtzufuhr gewährleistet werden, wobei die einzelnen Tageswerte allerdings eine hohe Unsicherheit aufweisen.

In Hinblick auf die Zufuhrbestimmung ist die Raumluftmessung wesentlich empfindlicher als die Messung der Aktivitätsausscheidung im Urin. Demgegenüber bietet die Ausscheidungsmessung den Vorteil, dass sie eine direkte Information über die individuelle systemische Dosis liefert. Insgesamt gesehen sind daher beide Verfahren von großer Bedeutung für die Inkorporationsüberwachung auf Transurane im Forschungszentrum Karlsruhe.

Incorporation monitoring for Transuranium radionuclides by measuring the room air activity concentration using stationary aerosol samplers

Abstract

In the Forschungszentrum Karlsruhe aerosol sampling devices are applied for routine monitoring of the staff for incorporation of Transuranium radionuclides. The sampling devices, being installed at representative locations in all areas with potential α -contamination, collect the aerosols from the air on 20 cm diam. filters with air flow rates ranging from 15 m³/h up to 70 m³/h. The filters are changed in a daily or weekly mode and evaluated with three-stage proportional counting systems using the pseudo-coincidence technique for discrimination of the natural background. The lower detection limit of the method depends on the air flow rate, the delay time in between the collection and the evaluation of the filters, and on the counting time of the proportional counting system. For the standard collection and evaluation parameters (i.e. air flow rate 25 m³/h, delay time at least 2 days, counting time around 1000 s) the lower detection limit corresponds to an α activity concentration of 1.8 mBq/m³.

According to the requirements of the new German Radiation Protection Regulations, the sensitivity of the procedures for routine incorporation monitoring for Transuranium radionuclides should ensure to detect an intake by inhalation of 31 Bq Pu-239 per year. Assuming standard parameters (i.e. average breathing rate 1,2 m³/h, 2000 hrs working time per year in controlled areas) the new requirement corresponds to a lower detection limit of 13 mBq/m³, in terms of room air concentration of Pu-239, which in principal can be reached easily by the room air monitoring procedure.

The estimation of the daily intake is based on the time spent by the individual workers in the controlled areas and on the maximum room air concentration measured on that day in the respective areas. This procedure results in a reasonable estimate of the annual intake. The individual results, however, may differ significantly from the actual intake.

With respect to the estimation of intake, room air monitoring is much more sensitive than urinary excretion monitoring. On the other hand, urinary excretion monitoring may provide direct information on the systemic exposure of the individuals. So on the whole, both monitoring procedures are very important for routine incorporation monitoring for Transuranium radionuclides in the Forschungszentrum Karlsruhe.

Inhalt

1.	Grundlagen der Inkorporationsüberwachung.....	5
1.1.	Dosisgrenzwerte.....	5
1.2.	Neue biokinetische Modelle.....	6
1.2.1.	Lungendynamik.....	6
1.2.2.	Systemisches Verhalten von Plutonium und Americium.....	8
1.2.3.	Dosiskoeffizienten.....	9
1.3.	Abgeleitete Zufuhrgrenzwerte.....	10
1.4.	Erfordernis der Überwachung.....	11
1.5.	Auswahl des Überwachungsverfahrens.....	12
2.	Stationäre Aerosolsammler.....	13
2.1.	Aufbau und Wirkungsweise.....	13
2.2.	Positionierung im Raum.....	15
3.	Bestimmung der Alpha-Aktivität auf den Luftfiltern.....	15
3.1.	Detektorsystem.....	15
3.2.	Pseudokoinzidenz-Messtechnik.....	17
3.3.	Nulleffekt.....	24
3.4.	Wirkungsgrad.....	25
4.	Bestimmung der Raumlufaktiviätskonzentration.....	26
4.1.	Bestimmungsverfahren.....	26
4.2.	Erkennungs- und Nachweisgrenze.....	27
5.	Bestimmung der Aktivitätszufuhr.....	29
5.1.	Bestimmungsverfahren.....	29
5.2.	Atemschutz.....	32
5.2.1.	Schwellenwerte.....	32
5.2.2.	Schutzfaktoren.....	33
6.	Diskussion.....	34
7.	Referenzen.....	37
8.	Anhänge.....	40
8.1.	Messung von Leerfiltern.....	40
8.2.	Definition der Erkennungs- und Nachweisgrenze.....	44
8.3.	Aufstellungsorte der Aerosolsammler.....	47
8.3.1.	Bereich Institute Nord.....	47
8.3.2.	Bereich HDB.....	50
8.3.3.	Bereich MZFR.....	56
8.3.4.	Gebäudepläne.....	57

1. Grundlagen der Inkorporationsüberwachung

1.1. Dosisgrenzwerte

Mit der Novellierung der deutschen Strahlenschutzverordnung hat sich für die Inkorporationsüberwachung eine neue Situation ergeben. So werden in der neuen Fassung [StrlSchV2000] keine Grenzwerte der Aktivitätszufuhr, sondern nur noch Grenzwerte der effektiven Dosis und der Organdosis angegeben. So gelten nun nach § 55 (Schutz bei beruflicher Strahlenexposition) für beruflich strahlenexponierte Personen die in Tab. 1.1.1 aufgeführten Grenzwerte. Die Grenzwerte der Organdosis haben sich gegenüber der alten Strahlenschutzverordnung nicht verändert, während der Grenzwert der effektiven Dosis von 50 mSv auf 20 mSv gesenkt wurde. Der Grenzwert der Berufslebensdosis beträgt nach wie vor 400 mSv. Diese Grenzwerte gelten für äussere und innere Strahlenexposition, wobei bei der inneren Strahlenexposition die gesamte Folgedosis wie bisher dem Jahr der Aktivitätszufuhr zugeschlagen wird.

Aufgrund dieser neuen Situation muss man bei der Inkorporationsüberwachung nun über die Aktivitätszufuhr hinaus in jedem Fall auch die resultierende effektive Folgedosis sowie die Folgedosen in allen relevanten Organen und Geweben bestimmen. Der Verzicht auf fest vorgegebene Zufuhr Grenzwerte bringt allerdings den erheblichen Vorteil mit sich, dass man jetzt mit den am besten angepassten biokinetischen Modellen durchgängig vom Messwert über die Zufuhr bis hin zur Dosis rechnen kann. Damit entfallen die bisher beim Abweichen von den Standardparametern aufgetretenen Inkonsistenzen zwischen den Zufuhr- und Dosisgrenzwerten bzw. die parameterspezifischen Korrekturen der Zufuhr Grenzwerte.

Tab. 1.1.1: Grenzwerte der effektiven Dosis und der Organdosis in einigen ausgewählten Organen und Geweben nach der novellierten Strahlenschutzverordnung [StrlSchV2001]

	Grenzwert GJD in mSv pro Jahr
Effektive Dosis	20
Organdosis in	
Keimdrüsen und Knochenmark	50
Knochenoberfläche	300
Lunge und Leber	150

Gleichzeitig mit den neuen Dosisgrenzwerten wurden auch neue Dosiskoeffizienten definiert. Diese Dosiskoeffizienten basieren auf den im folgenden erläuterten neuen biokinetischen Modellen der ICRP.

1.2. Neue biokinetische Modelle

1.2.1. Lungendynamik

Das neue Lungenmodell wird in ICRP Publikation 66 [ICRP1994] ausführlich beschrieben. Im folgenden werden lediglich diejenigen Aspekte dargestellt, die für die Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumlufaktivität von Bedeutung sind.

In Tab. 1.2.1.1 sind die Referenzwerte für das Atemvolumen und die Atemrate bei beruflicher Tätigkeit aufgeführt. Dabei wird zwischen leichter und schwerer Arbeit unterschieden. Bei der Inkorporationsüberwachung im Forschungszentrum wird im Allgemeinen angenommen, dass die überwachten Personen einer leichten Arbeit im Sinne von ICRP 66 nachgehen. Demnach wird im Allgemeinen eine mittlere Atemrate von $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$ zugrundegelegt.

Tab. 1.2.1.1: Referenzwerte für das Atemvolumen und die Atemrate bei beruflicher Tätigkeit nach dem neuen Lungenmodell der ICRP Publikation 66[ICRP1994]

Berufliche Tätigkeit	Atemvolumen in m^3	Mittlere Atemrate in m^3/h
Leichte Arbeit (5,5 h leichte Tätigkeit + 2,5 h Ruhe)	9,6	1,2
Schwere Arbeit (7 h leichte + 1 h schwere Tätigkeit)	13,5	1,7

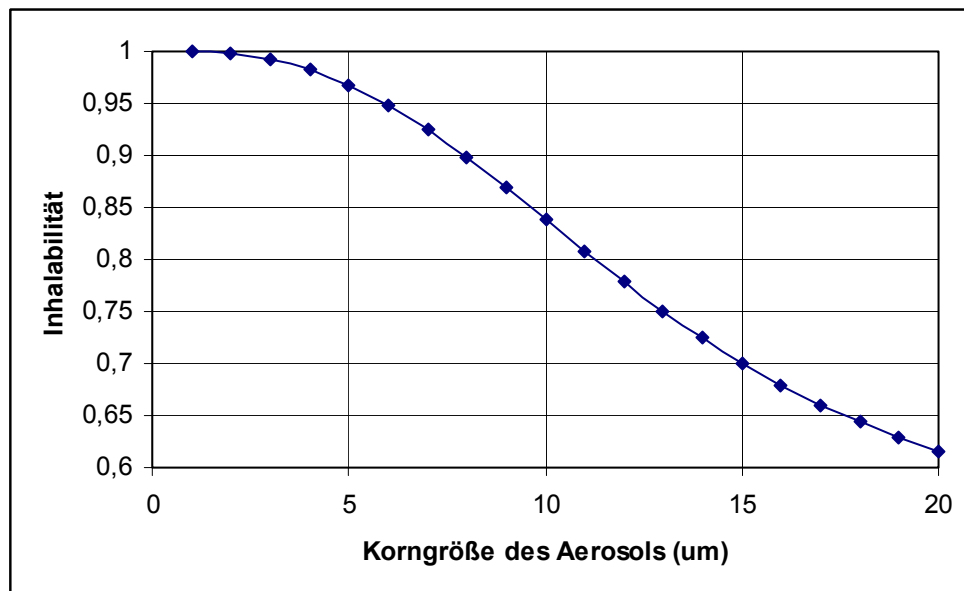


Abb. 1.2.1.1: Inhalabilität von Aerosolen in Abhängigkeit von der Korngröße nach dem neuen ICRP-Lungenmodell [ICRP1994]

Im neuen Lungenmodell wird als neuer Parameter die sogenannte Inhalabilität (Inhalability) eingeführt. Dieser Parameter gibt an, welcher Anteil der in der Atemluft vor Eintritt in den Körper enthaltenen Aerosole tatsächlich inhaliert wird. Die Inhalabilität nimmt mit zunehmender Korngrösse ab. Ausserdem hängt die Inhalabilität auch von der Windgeschwindigkeit ab. Allerdings ist diese Abhängigkeit bei den hier interessierenden Korngrössen bis zu Windgeschwindigkeiten von 10 m/s vernachlässigbar klein. Die Abb. 1.2.1.1 zeigt die nach ICRP Publikation 66 berechnete Inhalabilität in Abhängigkeit von der Korngrösse. Bei der Korngrösse 5 µm beträgt die Inhalabilität 0,97 und bei 10 µm 0,84. Diese Werte gelten für Windgeschwindigkeiten bis zu 5 m/s.

Tab. 1.2.1.2: Primärdeposition von Aerosolen im Atemtrakt bei Nasenatmung mit einer Atemrate von 1,2 m³/h nach dem neuen ICRP-Lungenmodell [ICRP1994]; ET(1) vorderer extrathorakaler Raum, ET(2) hinterer extrathorakaler Raum, BB+bb bronchialer und bronchiolarer Raum, AI alveolares Interstitium

Korngrösse in µm AMAD	Aktivitätsdeposition in %				
	ET(1)	ET(2)	BB+bb	AI	Gesamt
0,1	3,2	3,2	5,5	21	32,9
0,2	5,5	6,1	3,7	15	30,3
0,5	8,9	11	3,0	12	34,9
0,7	12	15	2,9	11	40,9
1	17	21	2,9	11	51,9
2	25	32	3,2	9,2	69,4
3	30	37	3,2	7,7	77,9
5	34	40	2,9	5,3	82,2
7	35	40	2,4	3,8	81,2
10	35	38	1,9	2,4	77,3
15	33	36	1,3	1,2	71,5
20	32	33	0,91	0,72	66,6

Die inhalierten Aerosole verteilen sich entsprechend der Korngrösse auf die verschiedenen Bereiche des Atemtrakts. Im neuen Lungenmodell wird hierbei zwischen dem extrathorakalen und dem intrathorakalen Bereichen unterschieden. Der extrathorakale Raum unterteilt sich in die Bereiche ET₁ (vorderer Nasenraum) und ET₂ (hinterer Nasenraum und Rachenraum). Der intrathorakale Raum unterteilt sich in die Bereiche BB (Bronchialbereich), bb (Bronchiolarbereich) und AI (alveolares Interstitium). Die Tab. 1.2.1.2 zeigt die prozentuale

Verteilung der inhalierten Aerosole auf diese Bereiche, wobei die Bereiche BB und bb zusammengefasst wurden. Das Verteilungsmuster unterscheidet sich ganz wesentlich von dem Muster des alten Lungenmodells. So ist der in AI deponierte Anteil bei allen Korngrößen nur etwa halb so gross wie der im Pulmonalbereich des alten Lungenmodells deponierte Anteil.

Im neuen Lungenmodell wird für die Korngrösse ein Standardwert von 5 μm empfohlen. Dieser Standardwert soll bei allen Berechnungen zugrunde gelegt werden, sofern keine speziellen Informationen über die im Einzelfall vorliegende Korngrösse verfügbar sind. Bei diesem Standardwert werden 34 % der inhalierten Aktivität im vorderen Nasenraum, 40 % im hinteren Nasenraum und im Rachenraum, 2,9 % im Bronchial- und im Bronchiolarraum und 5,3 % im alveolaren Interstitium deponiert. Demnach ist die Deposition im alveolaren Interstitium nahezu um den Faktor 5 kleiner als die entsprechende Deposition bei der Standardkorngrösse des alten Lungenmodells.

Die im Atemtrakt deponierte Aktivität wird durch biomechanische Transportmechanismen (Mukozyliartransport, Phagozytose etc.) und biochemische Transportmechanismen (systemische Absorption) abgebaut. Das neue Lungenmodell unterscheidet sich im wesentlichen dadurch vom alten Lungenmodell, dass explizit zwischen den biomechanischen und den biochemischen Transportmechanismen unterschieden wird. Für die biomechanischen Transportmechanismen wird bei allen Nukliden und Verbindungen die gleiche Kinetik angenommen, während für die biochemischen Transportmechanismen drei Absorptionsklassen F (fast), M (moderate) und S (slow) definiert werden. Die Absorptionstypen entsprechen grob den Retentionsklassen D, W und Y des alten Lungenmodells, allerdings werden sie nicht über die biologische Halbwertszeit der Aktivität im pulmonalen Bereich definiert, sondern über die Zeitkonstanten der Absorptionsprozesse.

Bei den im Forschungszentrum auftretenden Pu-Verbindungen wird aufgrund der bisherigen Erfahrungen eine mässige Löslichkeit (Retentionsklasse W bzw. Absorptionstyp M) angenommen. Für die Korngrösse der Pu-haltigen Aerosole wird der in ICRP 66 vorgeschlagene Standardwert von 5 μm AMAD angenommen.

1.2.2. *Systemisches Verhalten von Plutonium und Americium*

Die neuen systemischen Modelle für Plutonium und Americium [ICRP1993] sind wesentlich komplexer als die bisherigen Modelle [ICRP1993, ICRP1986]. Während die bisherigen Modelle nur vier Kompartimente (Blut, Skelett, Leber, Gonaden) umfassten, bestehen die neuen Modelle aus insgesamt 16 Kompartimenten. Die Modelle von Plutonium und Americium haben nahezu die gleiche Struktur, sie unterscheiden sich im wesentlichen nur in einigen Übergangswahrscheinlichkeiten. Die Abb. 1.2.2.1 zeigt als Beispiel das neue systemische Modell von Plutonium in Verbindung mit dem Modell des Magen-Darm-Trakts. Das Modell des Magen-Darm-Trakts stammt noch aus den alten Empfehlungen der ICRP Publikation 30 [ICRP1979]; mit einer Überarbeitung in den nächsten Jahren ist zu rechnen.

Die neuen systemischen Modelle von Plutonium und Americium unterscheiden zwischen den Bereichen Blut, Skelett (bestehend aus jeweils drei Kompartimenten für Oberfläche, Volumen und Mark des kortikalen und des trabekulären Knochens), Leber (bestehend aus zwei Kompartimenten für den schnellen und den langsamen Transfer), Weichgewebe (bestehend aus drei Kompartimenten für den schnellen, moderaten und langsamen Transfer), Gonaden,

Nieren und Urinausscheidungspfad (bestehend aus zwei Kompartimenten für den Ableitungsweg und die Harnblase). Ein bemerkenswerter Unterschied zwischen den systemischen Modellen von Plutonium und Americium besteht darin, dass bei Plutonium ein direkter Übergang der Aktivität aus dem moderaten Weichgewebe-Kompartiment (ST1) in die Harnblase angenommen wird. Dieser Übergang wurde eingeführt, um eine bessere Konsistenz zwischen dem Modell und der Beobachtung zu erzielen. Er ist allerdings physiologisch nicht nachvollziehbar. Es kann gezeigt werden, dass bei Modifikation einiger Modellparameter auch ohne diesen Übergang eine gute Modellkonsistenz der beobachteten Ausscheidungsfunktionen erzielt werden kann [LU2000a]. Diese Modifikation ist allerdings von der ICRP noch nicht aufgegriffen worden.

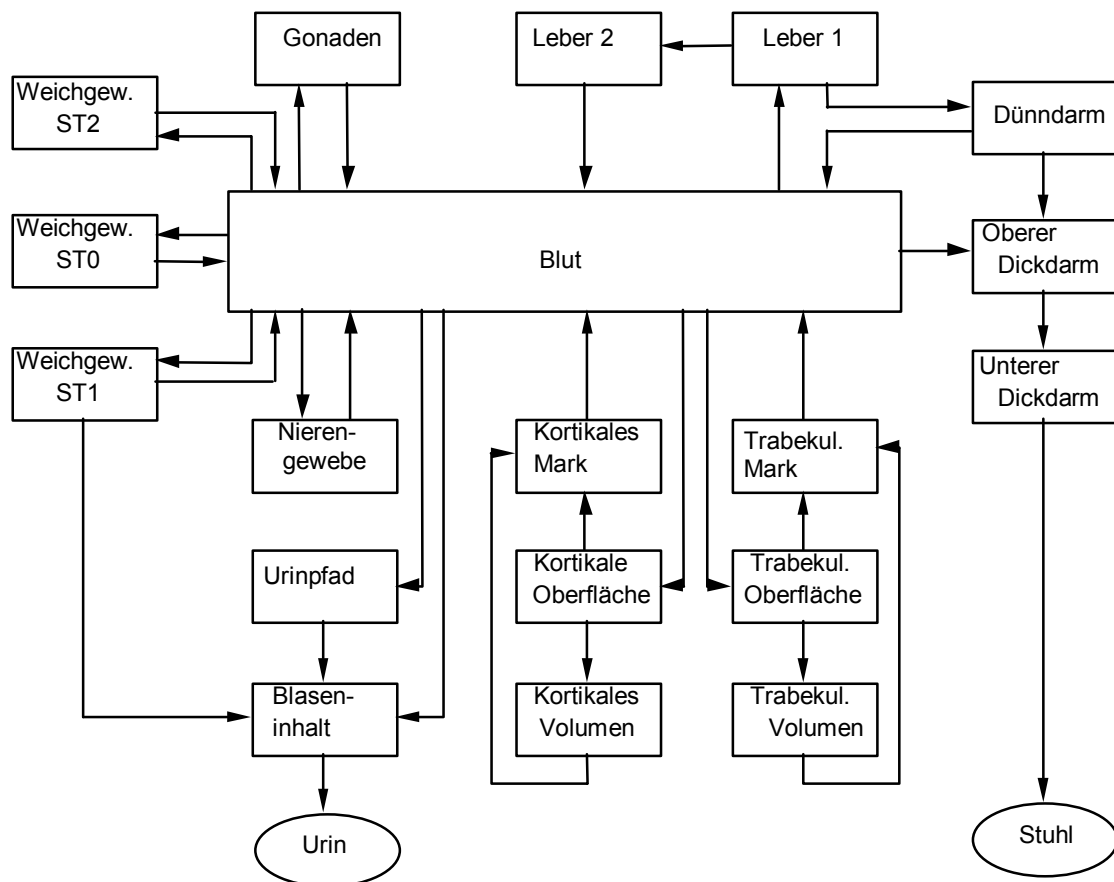


Abb. 1.2.2.1: Das neue systemische Modell für Plutonium [ICRP1993] in Verbindung mit dem Modell des Verdauungstrakts [ICRP1979]

1.2.3. Dosiskoeffizienten

Mit dem neuen Lungenmodell und den neuen systemischen Modellen ergeben sich für Pu-239 die in Tab. 1.2.3.1 aufgeführten Dosiskoeffizienten. Die Koeffizienten beziehen sich auf Inhalation von Aerosolen der Korngröße 5 µm AMAD durch den "Reference worker" der ICRP.

Tab. 1.2.3.1: Dosiskoeffizienten für Inhalation von Pu-239-haltigen Aerosolen der Korngrösse 5 µm AMAD [StrlSchV2001a]

	Dosiskoeffizient ε in Sv/Bq	
	Absorptionstyp M f ₁ = 5 · 10 ⁻⁴	Absorptionstyp S f ₁ = 10 ⁻⁵
Lunge	2,1 · 10 ⁻⁵	4,7 · 10 ⁻⁵
Knochenoberfläche	1,0 · 10 ⁻³	9,1 · 10 ⁻⁵
Rotes Knochenmark	4,8 · 10 ⁻⁵	4,5 · 10 ⁻⁶
Leber	2,1 · 10 ⁻⁴	1,9 · 10 ⁻⁵
Effektiv	3,2 · 10 ⁻⁵	8,3 · 10 ⁻⁶

1.3. Abgeleitete Zufuhrgrenzwerte

Mit Hilfe der Dosis-Koeffizienten lassen sich aus den Dosisgrenzwerten operative Zufuhrgrenzwerte für die Raumluftüberwachung ableiten. Hierbei wird zunächst für jede Parameterkombination und für jede Dosiskategorie nach Gl. (1.3.1) die grenzwertbezogene Aktivitätszufuhr berechnet. Die hierbei ermittelten Werte sind in Tab. 1.3.1 zusammengestellt.

$$Z_{\text{GJD}}(\text{AT}, \text{AMAD}) = \frac{\text{GJD}_i}{\epsilon(\text{AT}, \text{AMAD})} \quad (1.3.1)$$

mit

Z _{GJD} (AT,AMAD)	grenzwertbezogene Aktivitätszufuhr in Bq
AT	Absorptionstyp des inhalierten Aerosols nach dem neuen Lungenmodell (M bzw. S)
AMAD	Korngrösse des inhalierten Aerosols in µm AMAD
GJD _i	Grenzwert der Jahresdosis für die Dosiskategorie i (Effektive Dosis bzw. Organdosen)
ε(AT,AMAD)	Dosis-Koeffizient für Inhalation von Aerosolen der entsprechenden Parameter

Tab. 1.3.1: Grenzwertbezogene Aktivitätszufuhr für Inhalation von Pu-239-haltigen Aerosolen der Korngrösse 5 µm AMAD nach Rundung auf 3 signifikante Stellen

	Grenzwertbezogene Aktivitätszufuhr in kBq Pu-239	
	Absorptionstyp M $f_1 = 5 \cdot 10^{-4}$	Absorptionstyp S $f_1 = 10^{-5}$
Lunge	7140	3190
Knochenoberfläche	300	3300
Rotes Knochenmark	1040	11100
Leber	714	7890
Effektiv	625	2410

Im zweiten Schritt wird dann für jede Parameterkombination gemäss

$$GJAZ_{OP} = \text{MIN}(Z_{GJD}(AT, AMAD)) \quad (1.3.2)$$

das Minimum der grenzwertbezogenen Aktivitätszufuhr (Tab. 1.3.1) als operativer Grenzwert $GJAZ_{OP}$ der jährlichen Aktivitätszufuhr festgelegt. Dabei ergeben sich für die Korngrösse 5 µm AMAD die folgenden Werte:

$$\begin{aligned} \text{Absorptionstyp M: } & GJAZ_{OP} = 300 \text{ Bq Pu-239} \\ \text{Absorptionstyp S: } & GJAZ_{OP} = 3300 \text{ Bq Pu-239} \end{aligned}$$

Folglich kann man bei den im Forschungszentrum Karlsruhe auftretenden plutoniumhaltigen Aerosolen (Absorptionstyp M; 5 µm AMAD) einen operativen Zufuhr Grenzwert in Höhe von 300 Bq Pu-239 annehmen. Da die Dosisfaktoren für die anderen Pu-Isotope und für Am-241 kleiner oder höchstens genau so gross wie die Dosisfaktoren für Pu-239 sind, kann man den Wert von 300 Bq auch als konservativen Zufuhr Grenzwert für die Gesamt- α -Aktivität eines beliebigen Pu/Am-Gemischs annehmen.

1.4. Erfordernis der Überwachung

Gemäss der bisher geltenden Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosen [RiPhyKo1994] ist eine regelmässige Inkorporationsüberwachung erforderlich, wenn nicht auszuschliessen ist, dass 10 % des Grenzwertes der jährlichen Aktivitätszufuhr inkorporiert werden können. Nach der Novellierung der Strahlenschutzverordnung wird diese Richtlinie zur Zeit überarbeitet. In der

überarbeiteten Version orientiert sich das Erfordernis generell an der Effektivdosis. Und zwar wird künftig eine regelmässige Inkorporationsüberwachung erforderlich sein, wenn nicht auszuschliessen ist, dass die inkorporationsbedingte effektive Folgedosis grösser als 5 % des Grenzwertes oder die inkorporationsbedingte Organdosis grösser als 10 % des jeweiligen Grenzwertes ist. Im Fall von Pu-239 des Absorptionstyps M und der Korngrösse 5 μm führt eine Zufuhr von 30 Bq zu einer Knochenoberflächendosis in Höhe von 30 mSv entsprechend 10 % des Grenzwertes. Unterstellt man ausschliesslich inhalationsbedingte Zufuhren, so bedeutet dies, dass eine regelmässige Inkorporationsüberwachung in allen Bereichen erforderlich ist, in denen nicht ausgeschlossen werden kann, dass die über das Jahr gemittelte Raumlufaktivitätskonzentration von α -strahlenden Pu- und Am-Isotopen grösser als 12,5 mBq/m³ ist. Dieser Wert orientiert sich an einer jährlichen Arbeitszeit von 2000 h und einer mittleren Atemrate von 1,2 m³/h.

1.5. Auswahl des Überwachungsverfahrens

Zur Inkorporationsüberwachung können prinzipiell die drei folgenden Messverfahren angewandt werden:

- Messung der Aktivität im Körper (Direktmessung)
- Messung der Aktivität in den Ausscheidungen (Ausscheidungsmessung)
- Messung der Aktivitätskonzentration in der Raumluf am Arbeitsplatz (Raumlufüberwachung)

Die Direktmessung ist nur bei solchen Radionukliden möglich, die eine hinreichend intensive Photonenstrahlung emittieren. Diese Voraussetzung ist bei Plutonium nicht gegeben. Zwar emittieren die Plutonium-Isotope eine charakteristische Röntgen-Strahlung, allerdings ist die Energie (im Mittel ca. 17 keV) und die Emissionswahrscheinlichkeit (bei Pu-239 ca. 4 Photonen pro 100 Zerfälle) so gering, dass die Strahlung ausserhalb des Körpers nur bei relativ hohen Körperaktivitäten nachweisbar ist. So liegt die untere Nachweisgrenze der besten z. Zt. verfügbaren Messeinrichtungen für Pu-239 in der Lunge je nach Stärke und Fettanteil der Brustwand zwischen etwa 1 und 10 kBq [DO1993]. Bei Am-241 wird der α -Zerfall von der Emission einer γ -Strahlung begleitet, deren Energie (ca. 60 keV) und Emissionswahrscheinlichkeit (ca. 36 Photonen pro 100 Zerfälle) für die Direktmessung ausreicht. Hier liegt die untere Nachweisgrenze je nach Körperproportionen zwischen etwa 5 und 9 Bq Am-241 in der Lunge [DO1993].

Bei der Ausscheidungsmessung wird die Aktivität im Tagesurin bzw. im Tagesstuhl gemessen. Bei dem im Routinebetrieb üblichen Messverfahren (radiochemische Abtrennung und Elektrodeposition des zu messenden Elements mit anschliessender α -Spektrometrie über ca. 1000 min) können in den Proben etwa 0,5 mBq α -Aktivität nachgewiesen werden. Allerdings ist die tägliche Ausscheidungsrate ernährungs- und stoffwechselbedingten Schwankungen unterworfen, so dass im Rahmen der Inkorporationsüberwachung die Ergebnisse mehrerer aufeinanderfolgender Tage (im allgemeinen drei Tage) gemittelt werden müssen. Bei Zusammenfassung der drei Tagesproben zu einer Probe reduziert sich die untere Nachweisgrenze für den Mittelwert der täglichen Ausscheidungsrate auf etwa 0,17 mBq α -Aktivität. Diese Werte beziehen sich allerdings jeweils auf ein bestimmtes α -strahlendes Isotop. Bei einem Gemisch von mehreren α -Strahlern muss sinngemäss eine Summenformel angewandt werden. Bei den im Forschungszentrum vorkommenden Nuklidgemischen stellt

im allgemeinen Am-241 mindestens 50 % der gesamten α -Aktivität. Wählt man Am-241 als Leitnuklid, so entspricht die Nachweisgrenze von 0,17 mBq Am-241 einer Gesamt- α -Nachweisgrenze in Höhe von 0,34 mBq.

Das dritte Verfahren zur Inkorporationsüberwachung besteht in der Messung der Aktivitätskonzentration in der Raumluft am Arbeitsplatz. Hierbei handelt es sich im Gegensatz zu den beiden vorgenannten Verfahren um kein personenspezifischen sondern um ein arbeitsplatzspezifisches Überwachungsverfahren. Das Verfahren basiert auf der Messung der α -Aktivitätskonzentration in der Raumluft mit Aerosolsammlern, die an repräsentativen Stellen in allen Arbeitsbereichen mit potenziellen α -Kontaminationen installiert sind. Die Aerosolfilter der Sammler werden täglich oder wöchentlich gewechselt und mit Proportionalzählern ausgewertet. Zur Diskriminierung des natürlichen α -Untergrundes in der Raumluftaktivität wird das Pseudo-Koinzidenzverfahren angewandt. Dieses Verfahren wird im vorliegenden Bericht näher beschrieben und in Hinblick auf die Anforderungen der neuen Strahlenschutzverordnung bewertet.

Nach der bisher geltenden Richtlinie zur Physikalischen Strahlenschutzkontrolle [RiPhyKo] muss das Messverfahren der Inkorporationsüberwachung in der Lage sein, eine jährliche Aktivitätszufuhr in Höhe von 3 % der Grenzwerte nachzuweisen. Vorzugsweise sollen personenbezogene Messverfahren (d.h. Direktmessung und Ausscheidungsmessung) eingesetzt werden. Wenn die Empfindlichkeit der personenbezogenen Verfahren zum Nachweis von 3 % der Grenzwerte nicht ausreicht oder wenn diese Verfahren aus anderen Gründen nicht praktikabel sind, dann ist die Raumluftmessung anzuwenden. Diese Voraussetzung war bisher gegeben.

Es ist allerdings damit zu rechnen, dass bei der Überarbeitung der Richtlinie das Empfindlichkeitskriterium - wie das Erforderniskriterium - an einer effektiven Folgedosis in Höhe von 5 % des Grenzwertes bzw. an einer Organfolgedosis in Höhe von 10 % des Grenzwertes festgemacht wird. Demnach sollten die Messverfahren nun in der Lage sein, eine inkorporationsbedingte Knochenoberflächendosis in Höhe von 30 mSv nachzuweisen. Im Fall von Pu-239 des Absorptionstyps M und der Korngrösse 5 μm entspricht dieser Wert einer Zufuhr von 30 Bq, und damit dem zehnfachen des bisher geltenden Schwellenwerts von 3 Bq. Dadurch stellt sich die Inkorporationsüberwachung auf Plutonium in einem vollkommen neuen Licht dar (siehe Abschn. 6).

2. Stationäre Aerosolsammler

2.1. Aufbau und Wirkungsweise

Die stationären Aerosolsammler bestehen aus einem Sammelkopf mit Filterhalterung, einem Luftabführungsschlauch oder -rohr sowie einer Luftsaugpumpe (Abb. 2.1.1). Die Höhe des Sammelkopfes über Boden beträgt ca. 1,2 m. Die im Forschungszentrum verwendeten Sammelköpfe arbeiten mit Filtern mit 200 mm \varnothing bei Luftdurchsatzraten von zwischen 15 und 70 m^3/h . Diese Durchsatzraten entsprechen Einstömgeschwindigkeiten an der Filteroberfläche zwischen etwa 14 cm/s und 62 cm/s.

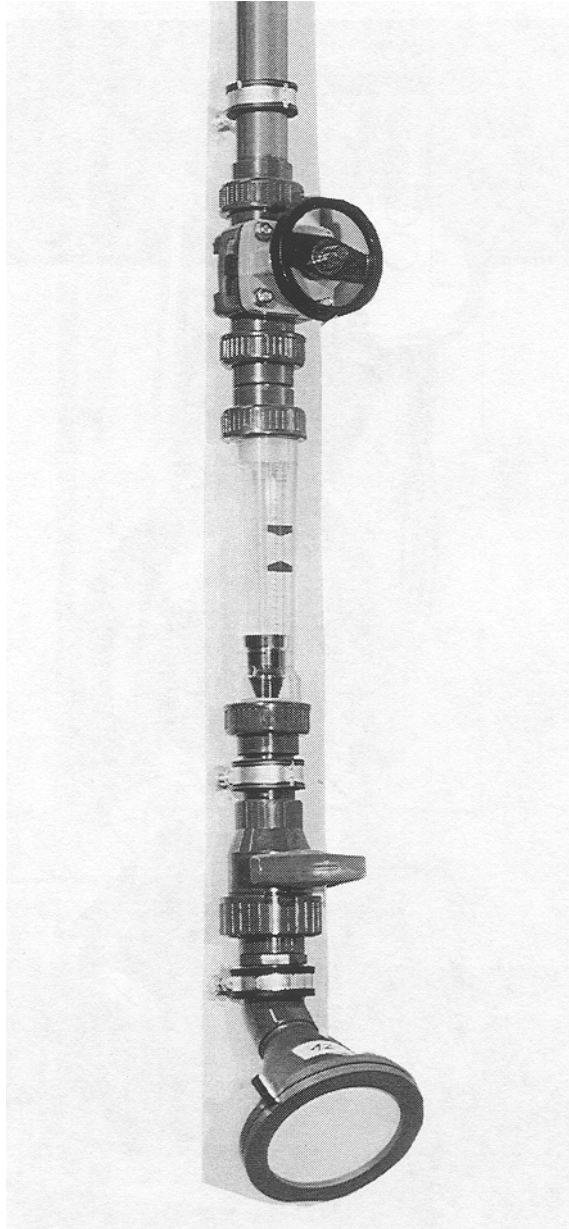


Abb. 2.1.1: Festinstallierter Aerosolsammler

Die Aerosolsammler sammeln die Aerosole aus einem Umkreis bis zu etwa 20 cm. Untersuchungen bei einem Luftdurchsatz von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ haben gezeigt, dass der Ansaugeneffekt im Abstand von 15 cm bis zu 20 cm noch Luftströmungen mit Geschwindigkeiten zwischen 1 cm/s und 5 cm/s bewirkt [BR1997]. Der Abstand von 20 cm stellt etwa die Grenze des direkten Ansaugbereiches dar. Untersuchungen mit einem Rauchgasprüfrohr bestätigen diese Ergebnisse. So wird eine Rauchwolke 20 cm oberhalb des Filters vom Aerosolsammler noch teilweise angezogen, während im Abstand von 25 cm keine Ansaugwirkung mehr festgestellt werden kann [BR1997]. Bedingt durch die Diffusion der Aerosole in der Luft sowie durch die Luftbewegung im Raum haben die Aerosolsammler allerdings einen grösseren Einzugsbereich. Im Forschungszentrum werden alle Arbeitsräume, in denen mit offener Radioaktivität umgegangen wird, zwangsbelüftet und durch Absaugung auf einen Unterdruck von einigen mbar gehalten. Die Belüftung sorgt für etwa 6 bis 10 Luftwechsel pro Stunde. Die Ausdehnung des Einzugsbereichs der Aerosolsammler hängt folglich auch von der

Sammelzeit ab. So werden beispielsweise für eine Sammelzeit von einer Stunde Einzugsradien zwischen 1,7 m und 2,6 m angegeben [DI1994].

In den Sammlern werden Rundfilter der Fa. Schleicher & Schüll verwendet. Die Filter mit der Typenbezeichnung GF8 bestehen aus Borosilikatglasfasern mit einem Faserdurchmesser zwischen 0,75 und 1,5 μm (Herstellerangaben). Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen allerdings, dass die Fasern durchaus auch einen Durchmesser bis zu etwa 5 μm haben können. Aufgrund von Messungen des Staubforschungsinstituts des Hauptverbands der gewerblichen Berufsgenossenschaften haben die Filter GF8 für Aerosole mit einer Korngrösse von mehr als 0,3 μm AMAD nach DIN 24 184 einen mittleren Abscheidegrad von 99,99 % [BG1973]. Dieser Wert bezieht sich auf eine Anströmgeschwindigkeit von 0,34 m/s entsprechend einem Luftdurchsatz von 38,5 m^3/h . Bei diesem Luftdurchsatz haben die Filter einen mittleren Durchflusswiderstand von etwa 2800 N/m^2 . Die Filterbelegung mit Staub beträgt ca. 7 μg pro Tag nach einem Durchsatz von ca. 500 m^3 Luft [DI1994].

2.2. Positionierung im Raum

Für die Positionierung der Aerosolsammler gelten die folgenden allgemeinen Grundsätze [BR1995]:

- Die Sammler sollten in der Nähe der potenziellen Kontaminationsquellen aufgestellt werden.
- Der Sammlerkopf sollte sich in der erwartungsgemäss am höchsten belasteten Atemzone des jeweiligen Arbeitsplatzes befinden.
- Die Ausrichtung des Sammlerkopfes in der Atemzone bezüglich Anströmung des Messfilters sollte so erfolgen, dass in Abhängigkeit von der Luftströmungsrichtung und der Höhe eine maximale Bestäubung des Messfilters erfolgt.

Bei nicht fixierten Arbeitsplätzen werden die Sammler unter Beachtung von Einbauten und Geräten gleichmässig im Raum verteilt. Im Durchschnitt ist pro 100 m^2 Grundfläche ein stationärer Aerosolsammler installiert. Eine detaillierte Zusammenstellung der Aufstellungsorte befindet sich in in Anhang 8.3.

3. Bestimmung der Alpha-Aktivität auf den Luftfiltern

3.1. Detektorsystem

Das Detektorsystem zur Bestimmung der α - und β -Aktivität auf den Luftfiltern besteht aus einem dreistufigen Proportionalzähler (FH 407 P) mit drei Vorverstärkern (FHT 640 D 13/14) und einem automatischen Probenwechsler (FHT 770 E) in einer Stahlabschirmung (Abb. 3.1.1).

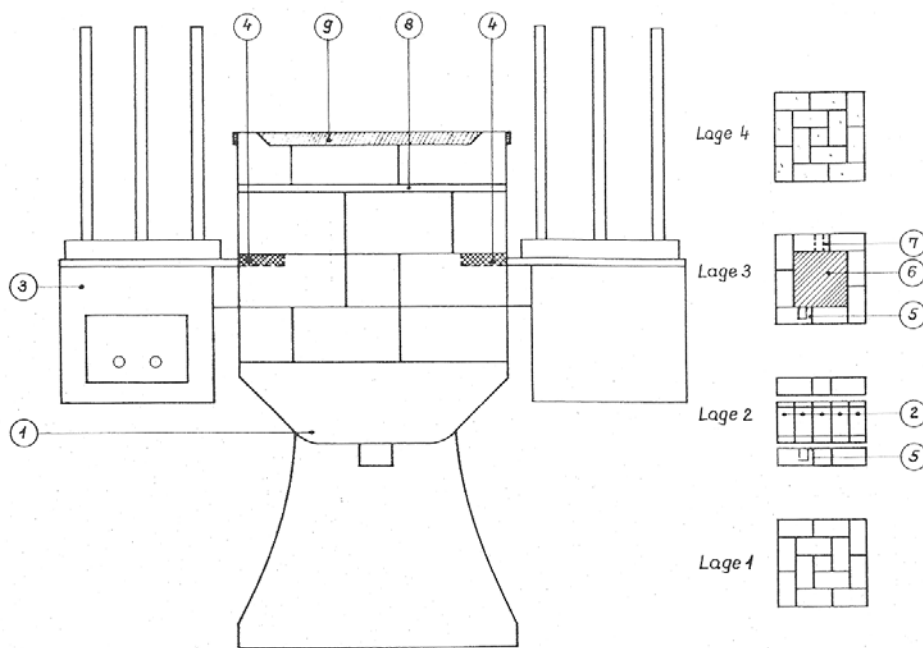


Abb. 3.1.1: Probenwechsler mit Bleiabschirmung zur Bestimmung der α - und β -Aktivität auf den Luftfiltern mit einem dreistufigen Proportionalzähler; (1): Aluminiumtisch, (2), (4), (5), (7): Spezialsteine, (3): Probenwechsler, (6) Zählrohr, (8): Platte, (9) Abdeckblech

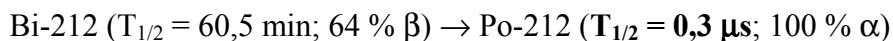
Aufbau und Wirkungsweise des Probenwechslers sind im Betriebshandbuch [FAG1977] sowie in einer Diplomarbeit [Sch1989] genauer beschrieben.

Der Detektor FH 407 P ist eine Kombination aus drei übereinander liegenden Grossflächen-Proportionalzählern, von denen der unterste dem Nachweis der α -Strahlung, der mittlere dem Nachweis der β -Strahlung und der oberste als Schirmzähler dem Nachweis der γ -Strahlung dient. Die Zähler werden mit Hilfe von zwei Hochspannungsversorgungen im α - bzw. im β -Plateau betrieben, wobei als Zählgas Argon-Methan verwendet wird. Die ursprünglich verwendeten Zähler haben eine quadratische Grundfläche. Bei einem der vier im Einsatz befindlichen Probenwechsler (Maschine 3) wurde der Detektor zwischenzeitlich durch ein flächengleiches Dreistufen-Zählersystem mit kreisförmiger Grundfläche ersetzt. Der α -Zähler hat ein Strahleneintrittsfenster aus aluminiumbeschichteter Kunststoffolie mit einem Flächengewicht von $0,3 \text{ mg/cm}^2$. Der darüberliegende β -Zähler ist vom α -Zähler durch eine etwas stärkere Folie mit einem Flächengewicht von 10 mg/cm^2 getrennt. Der oberste Schirmzähler ist durch ein Stahlblech vom β -Zähler getrennt, und daher nur für γ -Strahlung zugänglich.

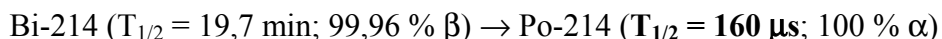
Zur Unterdrückung des durch die natürliche Radon-Aktivität bedingten Untergrundes wird die im folgenden beschriebene Pseudokoinzidenz-Messtechnik angewandt.

3.2. Pseudokoinzidenz-Messtechnik

Das natürliche Radon wird auf den Filtern nicht zurückgehalten, wohl aber die an Aerosole gebundenen Folgeprodukte der beiden Radon-Isotope Rn-220 und Rn-222. Beide Isotope haben in ihrer Zerfallsreihe einen β -Zerfall, bei dem ein sehr kurzlebiger α -Strahler gebildet wird. In der Rn-220-Reihe ist dies der Zerfall



und in der Rn-222-Reihe der Zerfall



Demnach kann man aus der Anzahl der β -Zerfälle, die innerhalb eines entsprechend kurzen Zeitfensters von einem α -Zerfall gefolgt werden, auf die Anzahl der Zerfälle von Bi-212 bzw. Bi-214, und damit auch auf die Zerfälle der übrigen Nuklide der beiden Zerfallsreihen schließen. Dies setzt allerdings voraus, dass die Aktivitätsverhältnisse der natürlichen Nuklide auf dem Filter bekannt sind. Bei Aerosolmonitoren mit kontinuierlicher Messung ist diese Voraussetzung weitgehend erfüllt, da hier nur das Aktivitätsverhältnis von Rn-220 zu Rn-222 in der Raumluft von Bedeutung ist. Bei Aerosolsammlern hängen die Aktivitätsverhältnisse allerdings darüberhinaus auch von der Zeitspanne zwischen der Beaufschlagung und der Messung ab.

Bei dem im Forschungszentrum Karlsruhe verwendeten Filtermesssystem wird die Pseudokoinzidenz-Messtechnik in der folgenden Form angewandt: Die β -Impulse werden in einer Verzögerungskette um $240 \mu s$ verzögert und danach einem Gate zugeführt, das von den unverzögerten α -Impulsen jeweils für die Dauer von $250 \mu s$ geöffnet wird. Wenn das Gate also von einem α -Teilchen aus einem Zerfall von Po-212 geöffnet wird, dann erreicht der Impuls des dazugehörigen β -Zerfalls von Bi-212 - sofern dieser nachgewiesen wird - das Gate $10 \mu s$ vor dem Ende der Öffnungszeit. Somit tragen alle Ereignisse, bei denen sowohl das β -Teilchen aus dem Zerfall eines Bi-212-Atoms als auch das α -Teilchen aus dem Zerfall des gebildeten Po-212-Atoms nachgewiesen werden, zur Koinzidenzrate bei. Wenn das Gate dagegen von einem α -Teilchen aus einem Zerfall von Po-214 geöffnet wird, dann erreicht der korrespondierende β -Impuls das Gate nur dann innerhalb der Öffnungszeit, wenn der α -Zerfall des Po-214-Atoms spätestens $240 \mu s$ nach dem β -Zerfall des Bi-214-Atoms stattgefunden hat. Aufgrund der Halbwertszeit von $160 \mu s$ erfolgt der α -Zerfall des Po-214-Atoms mit etwa 65 %-iger Wahrscheinlichkeit innerhalb dieser Zeitspanne; folglich erreicht der korrespondierende β -Impuls das Gate mit etwa 65 %-iger Wahrscheinlichkeit innerhalb der Öffnungszeit.

Zur Bestimmung der Anzahl der zufälligen Koinzidenzen wird ein Parallelzweig betrieben, bei dem die β -Impulse unverzögert auf das von den α -Impulsen gesteuerte Gate gegeben werden. Da die β -Zerfälle stets vor den korrespondierenden α -Zerfällen stattfinden, können die in diesem Zweig nachgewiesenen Koinzidenzen folglich nur zufälliger Natur sein.

Tab. 3.2.1: Impulszahlen bei wiederholter Messung eines inaktiv bestaubten Luftfilters mit Maschine 3 (Beaufschlagungszeit 24 h)

Effektiver Messzeitpunkt ¹⁾ in min	Messzeit in s	Impulse pro Messzeit				
		Zählerkanäle			Koinzidenzkanäle	
		α -gesamt (N_1)	β -gesamt (N_2)	γ -gesamt (N_3)	KK1 Pseudo + Zufall (N_3)	KK2 Zufall (N_4)
22	1044	30737	70187	4159	12649	779
40	1044	22316	52257	4234	8884	479
70	1043	16805	41103	4164	6668	316
100	1044	13804	35535	4148	5481	267
130	1044	12205	31898	4166	4862	233
160	1044	11160	29903	4112	4318	202
190	1044	10540	28743	4167	4013	197
220	1044	9478	26640	4114	3650	185
281	1044	9002	25105	4093	3331	185
341	1044	8220	23717	4175	3065	170
402	1044	7760	22410	4139	2821	114
456	1044	7415	21700	4217	2743	106
1275	1044	3185	11521	4103	1325	49
1716	1044	1836	8609	3926	684	24
2292	1044	991	6593	3988	416	13

1) Zeitdifferenz zwischen dem Ende der Beaufschlagung und der Mitte des Messintervalls

Die Anzahl der Pseudokoinzidenzen ist in erster Linie ein Mass für die Aktivität von Bi-212. In geringerem Umfang trägt auch die Aktivität und Bi-214 zu den Pseudokoinzidenzen bei. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Halbwertszeiten der Vorläufer von Bi-212 und Bi-214 verschieben sich die Aktivitätsverhältnisse mit zunehmender Beaufschlagungszeit bzw. mit zunehmender Wartezeit nach der Beaufschlagung in Richtung auf Bi-212. So werden bei einer Beaufschlagungszeit von 24 h die Pseudokoinzidenzen bereits unmittelbar nach Beaufschlagungsende praktisch ausschliesslich von Bi-212 bestimmt.

Zur Illustration zeigt Tab. 3.2.1 die Impulszahlen von Maschine 3 bei wiederholter Messung eines inaktiv beaufschlagten Luftfilters. Die Impulsraten lassen sich jeweils durch die folgende Beziehung darstellen:

$$R_i(t) = R_{i0}({}^{212}\text{Pb}) \cdot \exp\left(-\frac{\ln(2) \cdot t}{T_{1/2}({}^{212}\text{Pb})}\right) + R_{i0}({}^{214}\text{Pb}) \cdot \exp\left(-\frac{\ln(2) \cdot t}{T_{1/2}({}^{214}\text{Pb})}\right) + R_{i0} \quad (3.2.1)$$

Dabei ist

$R_i(t)$	die Impulsrate in Imp/s
i	der Impulsraten-Index
t	die Abklingzeit in min
$R_{i0}({}^{212}\text{Pb})$	die Anfangs-Impulsrate der Pb-212-Komponente (Tab. 3.2.2)
$T_{1/2}({}^{212}\text{Pb})$	die Halbwertszeit der Pb-212-Komponente (636 min)
$R_{i0}({}^{214}\text{Pb})$	die Anfangs-Impulsrate der Pb-214-Komponente (Tab. 3.2.2)
$T_{1/2}({}^{214}\text{Pb})$	die Halbwertszeit der Pb-214-Komponente (26,8 min)
R_{i0}	die Nulleffekt-Impulsrate in Imp/s (Tab. 3.2.2)

Die Anfangs- und Nulleffektwerte zur Berechnung der Impulsraten nach Gl. 3.2.1 sind in Tab. 3.2.2 zusammengestellt. Die Nulleffektwerte entsprechen dabei den mittleren Impulsraten bei Messung von nichtbestaubten Leerfiltern (Tab. 3.3.1).

Tab. 3.2.2: Anfangs- und Nulleffektwerte zur Berechnung der Impulsraten nach Gl. 3.2.1

Impulsraten-Index	Impulsrate in Imp/s		
	$R_{i0}({}^{212}\text{Pb})$	$R_{i0}({}^{214}\text{Pb})$	R_{i0}
1	11,9	31,9	0,039
2	25,9	68,5	4,34
3	4,79	12,9	0,01
4	0,19	1,03	0,0002

Die Abb. 3.2.1 zeigt als Beispiel die nach Gl. 3.2.1 für die α -Impulsrate R_I berechneten Impulsraten im Vergleich zu den jeweiligen Messwerten. Eine ähnlich gute Übereinstimmung ergibt sich auch für die Pseudokoinzidenz- und die Zufallskoinzidenz-Impulsraten.

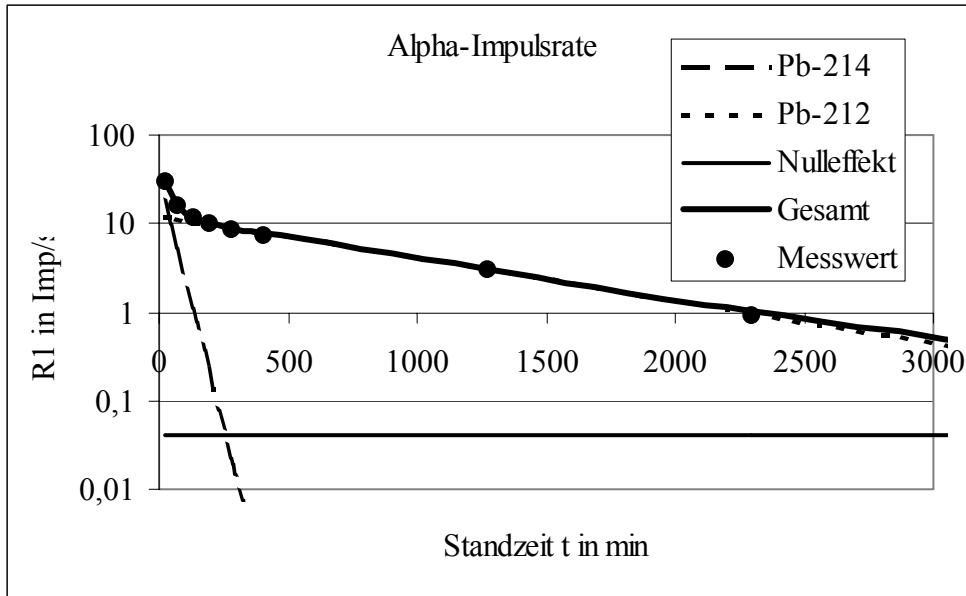


Abb. 3.2.1: Komponentenerlegung der α -Impulsrate R_1 als Funktion der Abklingzeit

Bei der Pseudokoinzidenz-Messtechnik wird die Pseudokoinzidenzrate zur Abschätzung des Beitrages der natürlichen Aktivität zur Gesamtimpulsrate im α -Kanal bzw. im β -Kanal herangezogen. Dies geschieht nach der folgenden Beziehung:

$$R_{\alpha nat} = F_{\alpha} \cdot (R_{PK} - R_{PK0}) = F_{\alpha} \cdot [(R_3 - R_{30}) - (R_4 - R_{40})] \quad (3.2.2)$$

Dabei ist

- $R_{\alpha nat}$ die durch die natürliche α -Aktivität bedingte Impulsrate im α -Kanal
- F_{α} der α -Kompensationsfaktor
- R_{PK} die Impulsrate der Pseudokoinzidenzen
- R_{PK0} die Nulleffekt-Impulsrate der Pseudokoinzidenzen
- R_3 die Impulsrate im Koinzidenzkanal 1 (Pseudo + Zufall)
- R_{30} die Nulleffekt-Impulsrate im Koinzidenzkanal 1 (Pseudo + Zufall)
- R_4 die Impulsrate im Koinzidenzkanal 2 (Zufall)
- R_{40} die Nulleffekt-Impulsrate im Koinzidenzkanal 2 (Zufall)

Die Nulleffekt-Impulsraten beziehen sich dabei auf die Messung von nichtbestaubten Leerfiltern (Abschn. 3.3). Der durch Gl. (3.2.2) definierte α -Kompensationsfaktor

$$F_{\alpha} = \frac{R_{\alpha nat}}{(R_3 - R_{30}) - (R_4 - R_{40})} \quad (3.2.3)$$

kann aus den Impulsraten von inaktiv bestaubten Filtern (Tab. 3.2.1) ermittelt werden. Dabei ergeben sich die in Tab. 3.2.3 aufgeführten Werte.

Tab. 3.2.3: α -Kompensationsfaktor aufgrund wiederholter Messung eines inaktiv bestaubten Luftfilters mit Maschine 3 (Beaufschlagungszeit 24 h)

Effektiver Messzeitpunkt ¹⁾ in min	α -Kompensationsfaktor	
	Absolutwert F_α	Zählstatistische Schwankungsbreite $\sigma(F_\alpha)$
22	2,59	0,03
40	2,65	0,04
70	2,64	0,04
100	2,65	0,05
130	2,63	0,05
160	2,71	0,05
190	2,79	0,05
220	2,73	0,06
281	2,86	0,06
341	2,84	0,06
402	2,86	0,07
456	2,81	0,07
1275	2,48	0,09
1716	2,76	0,13
2292	2,42	0,15
Mittelwert	2,69 ± 0,13	

1) Zeitdifferenz zwischen dem Ende der Beaufschlagung und der Mitte des Messintervalls

Die Absolutwerte F_α zeigen eine wechselnde Tendenz, die durch das Abklingverhalten der natürlichen Aktivität auf dem Filter nicht erklärt werden kann. Insgesamt gesehen sind die zeitlichen Schwankungen von F_α allerdings relativ gering. Die aus den einzelnen Werten von F_α empirisch ermittelte Schwankungsbreite beträgt 0,13. Die nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz aus der zählstatistischen Schwankungsbreite der einzelnen Impulsraten berechnete zählstatistische Schwankungsbreite $\sigma(F_\alpha)$ liegt zwischen 0,03 zu Beginn und 0,15 am Ende des erfassten Zeitbereichs. Demnach kann die beobachtete Schwankung von F_α zumindest in der Anfangsphase nicht auf die zählstatistischen Schwankungen zurückgeführt werden. Vermutlich liegt die Ursache in elektronischen Instabilitäten sowie in den Schwankungen der natürlichen Aktivität im Bereich des Filtermessplatzes.

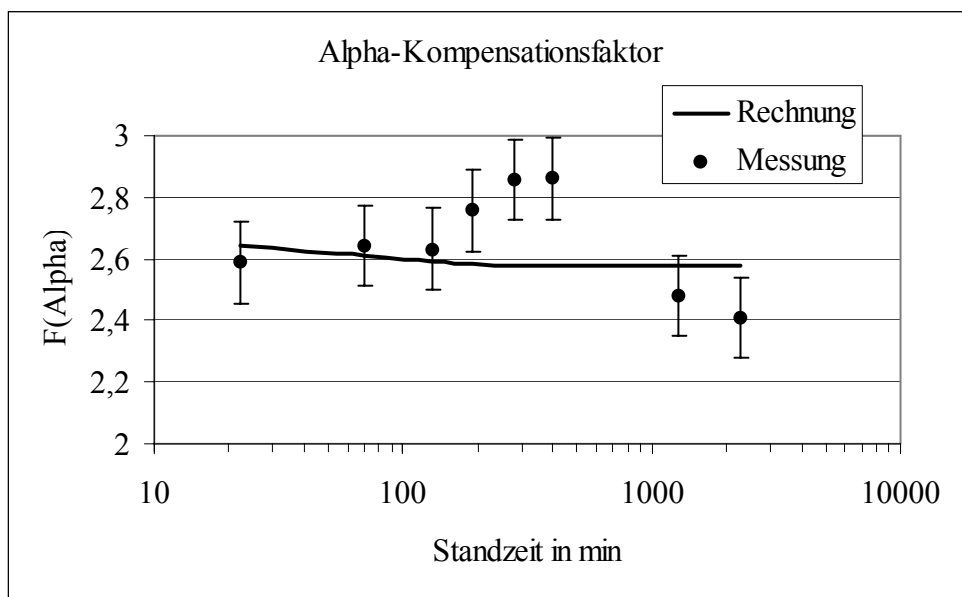


Abb. 3.2.2: Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten α -Kompensationsfaktoren nach Tab. 3.2.3

Die Abb. 3.2.2 zeigt die gemessenen α -Kompensationsfaktoren im Vergleich zu dem nach den Gln. 3.2.1 und 3.2.3 berechneten Verlauf. Aufgrund dieses Verlaufs kann man in dem betrachteten Zeitraum von einem konstanten α -Kompensationsfaktor in Höhe von $F_\alpha = 2,69 \pm 0,13$ ausgehen. Dies überrascht insofern, als bei früheren Untersuchungen eine Zeitabhängigkeit des α -Kompensationsfaktor beobachtet wurde [Sch1989]. Und zwar lag nach diesen Untersuchungen der α -Kompensationsfaktor nach Beaufschlagungsende zunächst bei etwa 3,4 und näherte sich danach mit zunehmender Abklingzeit asymptotisch den bei den vorliegenden Untersuchungen ermittelten Wert an. Allerdings sind die früheren Untersuchungen nicht in jeder Hinsicht mit den jetzigen Untersuchungen vergleichbar. So wurden die früheren Untersuchungen mit den quadratischen Zählern unter Verwendung einer älteren Elektronik durchgeführt. Ausserdem wurde bei den früheren Untersuchungen zur Nulleffektbestimmung ein separater Vergleichszähler benutzt.

In Analogie zum α -Kompensationsfaktor kann nach der folgenden Beziehung der β -Kompensationsfaktor definiert werden:

$$R_{\beta_{nat}} = F_{\beta} \cdot (R_{PK} - R_{PK0}) = F_{\beta} \cdot [(R_3 - R_{30}) - (R_4 - R_{40})] \quad (3.2.4)$$

Dabei ist

- $R_{\beta_{nat}}$ die durch die natürliche β -Aktivität bedingte Impulsrate im β -Kanal
- F_{β} der β -Kompensationsfaktor
- R_{PK} die Impulsrate der Pseudokoinzidenzen
- R_{PK0} die Nulleffekt-Impulsrate der Pseudokoinzidenzen
- R_3 die Impulsrate im Koinzidenzkanal 1 (Pseudo + Zufall)
- R_{30} die Nulleffekt-Impulsrate im Koinzidenzkanal 1 (Pseudo + Zufall)
- R_4 die Impulsrate im Koinzidenzkanal 2 (Zufall)
- R_{40} die Nulleffekt-Impulsrate im Koinzidenzkanal 2 (Zufall)

Der durch Gl. (3.2.4) definierte β -Kompensationsfaktor

$$F_{\beta} = \frac{R_{\beta_{nat}}}{(R_3 - R_{30}) - (R_4 - R_{40})} \quad (3.2.5)$$

hängt wie der α -Kompensationsfaktor vom Verhältnis der Aktivitäten von Rn-220 und Rn-222 sowie von der Beaufschlagungszeit und von der Wartezeit nach Beaufschlagungsende ab. Bei einer Beaufschlagungszeit von 24 h kann man allerdings auch hier von einem konstanten Kompensationsfaktor ausgehen. Aus den in Tab. 3.2.3 aufgeführten Werten ergibt sich für den betrachteten Zeitraum ein β -Kompensationsfaktor in Höhe von $F_{\beta} = 6,15 \pm 0,43$.

Tab. 3.2.4: β -Kompensationsfaktor aufgrund wiederholter Messung eines inaktiv bestaubten Luftfilters mit Maschine 3 (Beaufschlagungszeit 24 h)

Effektiver Messzeitpunkt ¹⁾ in min	β -Kompensationsfaktor	
	Absolutwert F_{β}	Zählstatistische Schwankungsbreite $\sigma(F_{\beta})$
22	5,54	0,06
40	5,68	0,07
70	5,77	0,08
100	5,97	0,10

Tab. 3.2.4 (Forts.): β -Kompensationsfaktor aufgrund wiederholter Messung eines inaktiv bestaubten Luftfilters mit Maschine 3 (Beaufschlagungszeit 24 h)

Effektiver Messzeitpunkt ¹⁾ in min	β -Kompensationsfaktor	
	Absolutwert F_β	Zählstatistische Schwankungsbreite $\sigma(F_\beta)$
130	5,93	0,10
160	6,20	0,11
190	6,37	0,12
220	6,42	0,13
281	6,59	0,14
341	6,66	0,14
402	6,65	0,15
456	6,52	0,15
1275	5,59	0,19
1716	6,68	0,33
2292	5,76	0,42
Mittelwert	$6,15 \pm 0,43$	

1) Zeitdifferenz zwischen dem Ende der Beaufschlagung und der Mitte des Messintervalls

3.3. Nulleffekt

Zur Bestimmung der Nulleffekts des Detektorsystems wurden 10 nichtbestaubte Leerfilter an 10 verschiedenen Tagen in den verschiedenen Messanordnungen ausgewertet. Die Messzeit wurde über ein Abbruchkriterium auf 1043 ± 10 s eingestellt. Die Tab. 8.1.1-4 im Anhang 8.1 zeigen als Beispiel die Ergebnisse der Leerfiltermessungen der vier Maschinen für jeweils einen ausgewählten Tag. Bildet man für jeden Tag jeweils die Mittelwerte und empirischen Standardabweichungen der Ergebnisse der 10 Leerfiltermessungen, so erhält man für die vier Maschinen die in den Tab. 8.2.5-8 aufgeführten Werte. Es zeigt sich, dass die Maschine 3 mit dem neuen runden Proportionalzählersystem in allen drei Kanälen einen nur etwa halb so grossen Nulleffekt hat wie die drei anderen Maschinen mit dem alten quadratischen Proportionalzählersystem. Aus diesem Grund wurde beschlossen, auch die letztgenannten Maschinen auf die neuen runden Proportionalzähler umzurüsten. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich daher ausschliesslich auf die Werte der Maschine 3.

Tab. 3.3.1: Impulsraten bei Messung von nichtbestaubten Leerfiltern mit Maschine 3

	Mittelwert (Imp/s)	Empirische Standardabweichung der Tagesmittelwerte (Imp/s)	Zählstatistische Standardabweichung der Tagesmittelwerte (Imp/s)
R_1 (α -Zählrohr)	0,039	0,007	0,002
R_2 (β -Zählrohr)	4,34	0,023	0,020
R_γ (γ -Zählrohr)	4,01	0,026	0,20
R_3 (Pseudokoinzidenz)	0,010	0,002	0,010
R_4 (Zufallskoinzidenz)	0,0002	0,0003	0,0001

Mittelt man die Impulszahlen über alle 10 Leerfilter und alle 10 Messtage, so erhält man für Maschine 3 die in der zweiten Spalte von Tab. 3.3.1 aufgeführten Werte. Die dritte Spalte zeigt die empirische Standardabweichung der Tagesmittelwerte. Da die Tagesmittelwerte aus 10 Leerfiltermessungen gewonnen wurden, gilt für die zählstatistische Standardabweichung der Tagesmittelwerte die Beziehung

$$\sigma_{stat} = \sqrt{\frac{Z}{10}} \quad (3.3.1)$$

Die nach dieser Beziehung berechneten Werte sind in der letzten Spalte von Tab. 3.3.1 aufgeführt. Ein Vergleich dieser Werte mit den empirisch ermittelten Standardabweichungen zeigt, dass die Impulszahlen des β -Zählrohrs und des γ -Zählrohrs praktisch ausschliesslich von der Zählstatistik bestimmt werden, während bei den Impulszahlen des α -Zählrohrs und der beiden Koinzidenzkanäle noch eine signifikante Streukomponente hinzukommt. Diese zusätzliche Streukomponente ist vermutlich elektronische Instabilitäten sowie auf die täglichen Schwankungen der Radon-Aktivitätskonzentration im Bereich der Messanordnung zurückzuführen. Sie ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die Ursache für die beobachtete Schwankung des α -Kompensationsfaktors (Abschn. 3.2).

3.4. Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad der Proportionalzähler für die Aktivität auf den Luftfiltern wurde mit Flächenpräparaten in gleicher Geometrie bestimmt. Bei den Präparaten handelt es sich um runde Metallplatten mit einem Durchmesser von 20 cm, auf die die α -Aktivität (Pu-238) bzw. die β -Aktivität (Sr-90) homogen aufgebracht ist. Die Aktivitätsdeposition wird von einer Eloxal-Schicht geschützt. Die Absorption der Strahlung in der Eloxal-Schicht ist vernachlässigbar gering.

Mit diesen Präparaten wurden für die Maschine 3 die folgenden Wirkungsgradwerte ermittelt [BU2001]:

$\varepsilon_{\alpha} = 0,116$ Impulse im α -Kanal pro α -Zerfall

$\varepsilon_{\beta} = 0,136$ Impulse im β -Kanal pro β -Zerfall

Der α -Wirkungsgrad ist etwa 15 % und der β -Wirkungsgrad etwa 30 % geringer als die entsprechenden Werte der alten Detektorsysteme mit quadratischen Proportionalzählern. Dieser Nachteil wird jedoch durch den geringeren Nulleffekt sowie die bessere Stabilität des neuen Systems wettgemacht.

4. Bestimmung der Raumlufaktivitätskonzentration

4.1. Bestimmungsverfahren

Zur Bestimmung der α -Aktivitätskonzentration in der Raumluf wird die folgende Beziehung angewandt:

$$c_{\alpha} = \frac{R_1 - R_{10} - F_{\alpha} \cdot (R_3 - R_{30} - R_4 + R_{40})}{\varepsilon_{\alpha} \cdot \dot{V} \cdot t_s} \quad (4.1.1)$$

Hierbei ist

c_{α}	die α -Aktivitätskonzentration in der Raumluf in Bq/m ³
R_1	die Impulsrate im α -Kanal in Imp/s
R_{10}	die Nulleffekt-Impulsrate im α -Kanal ($R_{10} = 0,039$ Imp/s)
R_3	die Impulsrate im Pseudokoinzidenzkanal in Imp/s
R_{30}	die Nulleffekt-Impulsrate im Pseudokoinzidenzkanal ($R_{30} = 0,010$ Imp/s)
R_4	die Impulsrate im Zufallskoinzidenzkanal in Imp/s
R_{40}	die Nulleffekt-Impulsrate im Zufallskoinzidenzkanal ($R_{40} = 0,0002$ Imp/s)
F_{α}	der α -Kompensationsfaktor ($F_{\alpha} = 2,692$)
ε_{α}	der α -Wirkungsgrad ($\varepsilon_{\alpha} = 0,116$ Imp/s pro Bq)
\dot{V}	der Luftdurchsatz in m ³ /h
t_s	die Sammelzeit in h

Die Netto-Impulsraten ergeben sich aus den gemessenen Impulsraten nach Abzug des Nulleffekts von nichtbeaufschlagten Leerfiltern (Abschn. 3.3). Für die Bestimmung der β -Aktivitätskonzentration in der Raumluf gilt eine analoge Beziehung.

Die Luftfilter werden täglich bzw. wöchentlich gewechselt. Die täglich gewechselten Filter werden 24 h beaufschlagt. Bei der Bestimmung der Aktivitätskonzentration geht man davon aus, dass nur während der eigentlichen Arbeitszeit eine Aktivitätsbeaufschlagung erfolgt. Aus diesem Grund wird für die Sammelzeit t_s grundsätzlich ein Wert von 8 h angenommen. Damit erhält man nach Gl. (4.1.1) einen fiktiven Mittelwert der Raumlufaktivitätskonzentration bezogen auf eine Arbeitszeit von 8 h. Die möglicherweise ausserhalb der Arbeitszeit

auftretende Aktivitätsbeaufschlagung wird auf diese Weise dem fiktiven Mittelwert zugeschlagen, was insgesamt gesehen zu einer konservativen Abschätzung führt.

4.2. Erkennungs- und Nachweisgrenze

Nach Anhang 8.2 gilt für die Erkennungsgrenze für die α -Aktivitätskonzentration in der Raumluft

$$c_{\alpha}^* = \frac{k_{1-\alpha}}{\varepsilon_{\alpha} \cdot \dot{V} \cdot t_s} \cdot \sqrt{u^2(F_{\alpha}) \cdot (R_3 - R_{30} - R_4 + R_{40})^2 + \frac{R_1 + F_{\alpha}^2 \cdot (R_3 + R_4)}{t_m} + \frac{R_{10} + F_{\alpha}^2 \cdot (R_{30} + R_{40})}{t_0}} \quad (4.2.1)$$

Hierbei ist

c_{α}^*	Erkennungsgrenze für die α -Aktivitätskonzentration in der Raumluft in Bq/m ³
$k_{1-\alpha}$	Quantil der standardisierten Normalverteilung zur Wahrscheinlichkeit $1-\alpha$, wobei α die Wahrscheinlichkeit für den Fehler erster Art angibt
$u(F_{\alpha})$	Standardunsicherheit des α -Kompensationsfaktors ($u(F_{\alpha}) = 0,131$)
R_1	Impulsrate im α -Kanal in Imp/s
R_{10}	Nulleffekt-Impulsrate im α -Kanal in Imp/s
R_3	Impulsrate im Pseudokoinzidenzkanal in Imp/s
R_{30}	Nulleffekt-Impulsrate im Pseudokoinzidenzkanal in Imp/s
R_4	Impulsrate im Zufallskoinzidenzkanal in Imp/s
R_{40}	Nulleffekt-Impulsrate im Zufallskoinzidenzkanal in Imp/s
t_m	Messzeit zur Bestimmung der Impulsrate R_i in s
t_0	Messzeit zur Bestimmung der Impulsrate R_{i0} in s
F_{α}	α -Kompensationsfaktor ($F_{\alpha} = 2,69$)
ε_{α}	α -Wirkungsgrad ($\varepsilon_{\alpha} = 0,116$ Imp/s pro Bq)
\dot{V}	Luftdurchsatz
t_s	Sammelzeit

Nach DIN 25482-10 [DIN2000] sollte für α stets der Wert 0,05 gewählt werden. Damit ist $k_{1-\alpha} = k_{0,95} = 1,65$. Für die Standardunsicherheit des α -Kompensationsfaktors wird der Wert $u(F_{\alpha}) = 0,131$ angenommen, entsprechend der empirischen Standardabweichung des α -Kompensationsfaktors bei wiederholter Messung eines inaktiv bestaubten Luftfilters (Tab. 3.2.2). Mit diesen Werten ergeben sich nach Gl. (4.2.1) bei Zugrundelegung der bei wiederholter Messung eines inaktiv bestaubten Luftfilters ermittelten Impulsraten (Tab. 3.2.2) und der bei wiederholter Messung von nichtbestaubten Leerfiltern ermittelten Nulleffekt-Impulsraten (Tab. 3.3.2) die in Tab. 4.2.1 aufgeführten Werte der Erkennungsgrenze in Abhängigkeit von der Abklingzeit zwischen dem Beaufschlagungsende und dem Beginn der Filtermessung. Die Werte beziehen sich dabei auf eine Sammelzeit von $t_s = 8$ h bei einem Luftdurchsatz von 25 m³/h sowie auf eine Filtermesszeit von $t_m = t_0 = 1043$ s. In der letzten Zeile von Tab. 4.2.1 ist als Grenzfall die für ein nichtbestaubtes Leerfilter ermittelte Erkennungsgrenze aufgeführt.

Tab. 4.2.1: Erkennungsgrenze für die α -Aktivitätskonzentration in der Raumluft in Abhängigkeit von der Abklingzeit zwischen Ende der Beaufschlagung und Beginn der Luftfiltermessung (Filtermesszeit $t_m = t_0 = 1043$ s)

Abklingzeit in min	Erkennungsgrenze c_α^* in mBq/m ³
22	93
70	51
130	37
190	31
281	26
402	23
1275	12
2292	4,8
Leerfilter	0,89

Für die β -Aktivitätskonzentration gilt in Analogie zur α -Aktivitätskonzentration

$$c_\beta^* = \frac{k_{I-\alpha}}{\varepsilon_\beta \cdot \dot{V} \cdot t_s} \cdot \sqrt{u^2(F_\beta) \cdot (R_3 - R_{30} - R_4 + R_{40})^2 + \frac{R_2 + F_\beta^2 \cdot (R_3 + R_4)}{t_m} + \frac{R_{20} + F_\beta^2 \cdot (R_{30} + R_{40})}{t_0}}$$

(4.2.2)

Hierbei ist

- c_β^* Erkennungsgrenze für die β -Aktivitätskonzentration in der Raumluft in Bq/m³
- $u(F_\beta)$ Standardunsicherheit des β -Kompensationsfaktors ($u(F_\beta) = 0,425$)
- R_2 Impulsrate im β -Kanal in Imp/s
- R_{20} Nulleffekt-Impulsrate im β -Kanal in Imp/s
- F_β β -Kompensationsfaktor ($F_\beta = 6,15$)
- ε_β β -Wirkungsgrad ($\varepsilon_\beta = 0,136$ Imp/s pro Bq)

Damit ergeben sich für die Erkennungsgrenze der β -Aktivitätskonzentration in der Raumluft die in Tab. 4.2.2 aufgeführten Werte.

Tab. 4.2.2: Erkennungsgrenze für die β -Aktivitätskonzentration in der Raumluft in Abhängigkeit von der Abklingzeit zwischen Ende der Beaufschlagung und Beginn der Luftfiltermessung (Filtermesszeit $t_m = t_0 = 1043$ s)

Abklingzeit in min	Erkennungsgrenze c_β^* in mBq/m ³
22	296
70	160
130	117
190	97
281	81
402	70
1275	35
2292	14
Leerfilter	5,8

Die Nachweisgrenzen sind nach Anhang 8.2 jeweils etwa doppelt so groß wie die Erkennungsgrenzen. Für die Leerfilter ergeben sich somit Nachweisgrenzen von $\xi_\alpha = 1,8$ mBq/m³ bzw. $\xi_\beta = 12$ mBq/m³. Diese Werte stellen die bei einem Luftdurchsatz von 25 m³/h erreichbaren Mindestwerte dar. Eine Verringerung der Nachweisgrenzen ist unter den gegebenen Umständen nur durch eine Erhöhung des Luftdurchsatzes oder durch eine Erhöhung der Filtermesszeit möglich.

5. Bestimmung der Aktivitätszufuhr

5.1. Bestimmungsverfahren

Die Bestimmung der α -Aktivitätszufuhr erfolgt personen- und anlagenspezifisch auf der Basis der folgenden Beziehung:

$$Z_\alpha = \frac{c_\alpha(\max) \cdot B \cdot t_A}{F_{AS}} \quad (5.1.1)$$

Dabei ist

Z_α	α -Aktivitätszufuhr einer bestimmten Person an einem bestimmten Tag in einer bestimmten Anlage (Bq/d)
$c_\alpha(max)$	Maximalwert der an dem betreffenden Tag in der betreffenden Anlage gemessenen α -Aktivitätskonzentration in der Raumluft (Bq/m ³)
B	Atemrate ($B = 1,2 \text{ m}^3/\text{h}$)
t_A	Aufenthaltszeit der betreffenden Person in der betreffenden Anlage (h)
F_{AS}	Atemschutzfaktor ($F_{AS} = 1$ bei Tätigkeit ohne Atemschutz, ansonsten Werte nach Abschn. 5.2.2)

Dieses Verfahren basiert auf der empirischen Erfahrung, dass bei Zugrundelegung des Maximalwerts der α -Aktivitätskonzentration eine wesentlich bessere Konsistenz mit den Ergebnissen der Ausscheidungsmessungen erzielt wird als bei Zugrundelegung des Mittelwerts. Dies wurde in einer Studie an einem Kollektiv von etwa 70 in der HDB beschäftigten Personen anhand von Messungen aus den Jahren 1999 und 2000 nochmals verifiziert [DI2001]. Bei diesen Personen wurde zunächst nach dem durch Gl. (5.1.1) gegebenen Verfahren die Aktivitätszufuhr über einen Zeitraum von einem Monat bestimmt. Im zweiten Schritt wurde die aus dieser Zufuhr am Ende des betrachteten Monats zu erwartende Aktivitätsausscheidung im Stuhl ermittelt und mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen. Die Tab. 5.1.1 zeigt eine Gegenüberstellung der bei diesem Vergleich ermittelten Werte für diejenigen Personen, bei denen die Aktivitätsausscheidung im Stuhl über der Nachweisgrenze lag.

Tab. 5.1.1: Gegenüberstellung der aus den Ergebnissen der Raumluftüberwachung abgeschätzten Erwartungswerte der Aktivitätsausscheidung im Stuhl ($E_F(RL)$) und der bei den betreffenden Personen gemessenen Aktivitätsausscheidungen (E_F)

Person	$E_F(RL)$ in mBq/d	E_F in mBq/d	$E_F/E_F(RL)$
1	0,04	1,10	29,8
2	0,04	1,16	29,6
3	0,05	1,86	37,4
4	0,12	1,34	10,9
5	0,18	1,00	5,5
6	0,21	5,52	26,2
7	0,52	3,20	6,2
8	0,88	1,11	1,3
9	1,00	13,3	13,3
10	1,26	1,65	1,3
11	1,53	2,10	1,4

Tab. 5.1.1 (Forts.): Gegenüberstellung der aus den Ergebnissen der Raumlufüberwachung abgeschätzten Erwartungswerte der Aktivitätsausscheidung im Stuhl ($E_F(RL)$) und der bei den betreffenden Personen gemessenen Aktivitätsausscheidungen (E_F)

Person	$E_F(RL)$ in mBq/d	E_F in mBq/d	$E_F/E_F(RL)$
12	1,74	1,00	0,57
13	1,82	1,20	0,66
14	4,74	4,83	1,0
15	5,16	2,22	0,43
16	5,55	6,06	1,1
17	6,64	37,5	5,7
18	8,58	2,24	0,26
19	9,11	8,01	0,88
20	9,98	1,00	0,10
21	11,6	3,78	0,33
22	15,8	1,69	0,11
23	15,9	16,9	1,1
24	43,7	3,94	0,09
25	54,8	5,94	0,11
26	74,4	201	2,7
Mittelwert	12,7	10,6	6,84

Die Mittelwerte von $E_F(RL)$ und E_F von 12,7 mBq/d bzw. 10,6 mBq/d stimmen gut miteinander überein. Man kann unterstellen, dass das Verhältnis $E_F/E_F(RL)$ bei dem untersuchten Kollektiv repräsentativ für das Verhältnis $Z/Z(RL)$ der tatsächlichen Aktivitätszufuhr Z zu der aus der Raumlufüberwachung abgeschätzten Aktivitätszufuhr $Z(RL)$ ist. Demnach kann mit der Raumlufüberwachung bei dem hier angewandten Verfahren (Zugrundelegung des Maximalwerts der Aktivitätskonzentration) durchaus eine repräsentative Zufuhrabschätzung für das Gesamtkollektiv gewährleistet werden.

Die in Tab. 5.1.1 aufgeführten Verhältniszahlen $E_F/E_F(RL)$ lassen sich in guter Näherung durch eine logarithmische Normalverteilung mit einem geometrischen Mittelwert von 1,6 und

einer geometrischen Standardabweichung von einem Faktor 6,6 darstellen. Angesichts dieser grossen Standardabweichung ist die Abweichung des geometrischen Mittelwerts von 1 vernachlässigbar gering. Dies bestätigt die Repräsentativität der Raumlufüberwachung für das Gesamtkollektiv.

Bei der individuellen Abschätzung der Zufuhr für eine Einzelperson an einem bestimmten Tag muss allerdings die Schwankungsbreite des Verhältnisses $Z/Z(RL)$ berücksichtigt werden. Man kann jedoch davon ausgehen, dass sich die Schwankungen des Verhältnisses $Z/Z(RL)$ bei täglicher Überwachung einer Einzelperson über einen längeren Zeitraum bis zu einem gewissen Grad herausmitteln, so dass die über diesen Zeitraum für die betreffende Person aufsummierte Gesamtzufuhr - ähnlich wie die für bestimmtes Kollektiv aufsummierte Gesamtzufuhr - näher an die tatsächliche Zufuhr herankommt als die Einzelwerte. Allerdings muss man bei der Bewertung der Ergebnisse grundsätzlich berücksichtigen, dass es sich bei der Raumlufmessung um ein arbeitsplatzspezifisches Überwachungsverfahren handelt, das - ähnlich wie die Ortsdosimetrie bei externer Strahlenexposition - prinzipiell nur Schätzwerte der individuellen Exposition liefern kann.

5.2. Atemschutz

5.2.1. Schwellenwerte

Bei Arbeiten, bei denen Aktivitätskonzentrationen von mehr als 40 mBq/m^3 auftreten können, ist das Tragen von Atemschutz vorgeschrieben. Dieser Schwellenwert orientiert sich an dem Zufuhrgrenzwert der alten Strahlenschutzverordnung (100 Bq Pu-239 der Lungenretentionsklasse W für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A). Orientiert man sich an der neuen Strahlenschutzverordnung bzw. dem neuen Lungenmodell, so ergibt sich nach

$$K_{AS} = \frac{GJAZ_{OP}}{B \cdot I \cdot T_j} \quad (5.2.1.1)$$

mit

K_{AS}	Schwellenwert der Raumlufaktivitätskonzentration für das Tragen von Atemschutz (Bq/m^3)
$GJAZ_{OP}$	operativer Grenzwert der jährlichen Aktivitätszufuhr (300 Bq Pu-239)
B	Atemrate ($1,2 \text{ m}^3/\text{h}$)
I	Inhalabilität ($0,97$ bei $5 \mu\text{m AMAD}$)
T_j	maximale jährliche Arbeitszeit (2000 h)

ein Schwellenwert von $K_{AS} = 0,125 \text{ Bq/m}^3$.

Aufgrund der bisherigen Regelungen wurde bei α -Aktivitätskonzentrationen von mehr als 40 mBq/m^3 eine Maske mit Partikelfilter getragen. Die Schwellenwerte für Maske mit Luftzufuhr bzw. für Vollschutzanzüge lagen bei $0,8 \text{ mBq/m}^3$ bzw. 8 mBq/m^3 . Mit diesen Schwellenwerten konnte bisher stets gewährleistet werden, dass die Aktivitätszufuhr in allen Überwachungsbereichen unter 10% der Grenzwerte lag. Dadurch konnte sichergestellt

werden, dass die Zufuhren stets unter der Schwelle für das Erfordernis der Inkorporationsüberwachung lagen. Bei Anhebung des Schwellenwerts von 40 mBq/m^3 auf 125 mBq/m^3 könnte sich allerdings das Niveau der Aktivitätszufuhren erhöhen, so dass nicht mehr sichergestellt werden kann, dass die Werte stets unter der Erfordernisschwelle liegen. Aus diesem Grund - und nicht zuletzt auch in Hinblick auf das ALARA-Prinzip - werden die bisherigen Schwellenwerte auch in Zukunft beibehalten.

5.2.2. Schutzfaktoren

Je nach Aktivitätskonzentration werden die drei folgenden Atemschutzsysteme getragen:

- Maske mit Partikelfilter P3
- Maske mit Luftzufuhr unter Überdruck
- Vollschutzanzug mit Fremdbelüftung

Als Schutzfaktor F_{AS} wird das Verhältnis der Aktivitätszufuhr ohne Atemschutz zur Aktivitätszufuhr mit Atemschutz definiert. Für die Maske mit Partikelfilter P3 wurde in eigenen Untersuchungen ein Schutzfaktor $F_{AS} = 20$ ermittelt [DI1986]. Für die Maske mit Luftzufuhr unter Überdruck wird vom Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften ein Schutzfaktor von $F_{AS} = 200$ angegeben [BG1981]. Für den Vollschutzanzug kann ein Schutzfaktor von ∞ angenommen werden. Allerdings können beim Maskenwechsel bzw. beim Umkleiden Inkorporationen durch verschleppte Kontaminationen auftreten, die durch die genannten Schutzfaktoren nicht abgedeckt werden können. Aus diesem Grund wird für die fremdbelüfteten Vollschutzanzüge ein endlicher Schutzfaktor von $F_{AS} = 10000$ angenommen

Tab. 5.2.2.1: Schutzfaktoren für die verschiedenen Atemschutzsysteme

Atemschutzsystem	Schutzfaktor F_{AS}
Maske mit Partikelfilter P3	20
Maske mit Luftzufuhr unter Überdruck	200
Vollschutzanzüge mit Fremdbelüftung	10000

6. Diskussion

Nach den Bestimmungen der neuen Strahlenschutzverordnung müssen die Verfahren zur routinemässigen Inkorporationsüberwachung auf Transurane in der Lage sein, eine inhalationsbedingte Aktivitätszufuhr von 31 Bq Pu-239 pro Jahr nachzuweisen. Bei einer jährlichen Expositionszeit von insgesamt 2000 h und einer Atemrate von 1,2 m³/h entspricht diese Aktivitätszufuhr einer Raumluftaktivitätskonzentration in Höhe von 13 mBq/m³. Demnach sollte die Raumluftüberwachung in der Lage sein, ein Aktivitätskonzentration in dieser Höhe nachzuweisen.

Bei der im vorliegenden Bericht beschriebenen Raumluftaktivitätsmessung mit stationären Aerosolsammlern hängt die Nachweisgrenze von der Luftdurchsatzrate des Sammlers, von der Abklingzeit zwischen Beaufschlagung und Auswertung der Aerosolfilter sowie von der Messzeit bei der Auswertung der Aerosolfilter ab. Aufgrund der mit dem neuen Proportionalzählersystem (Maschine 3) durchgeführten Untersuchungen kann bei einer Luftdurchsatzrate von 25 m³/h und einer Filter-Messzeit von etwa 1000 s prinzipiell eine α -Aktivitätskonzentration in Höhe von 1,8 mBq/m³ nachgewiesen werden. Voraussetzung ist hierbei allerdings, dass man mit der Auswertung der Filter mindestens sechs Tage wartet, so dass die natürliche Aktivität auf den Filtern abgeklungen ist.

Mit Hilfe der Gln. 3.2.1 und 4.2.1 kann man die Erkennungsgrenze bzw. die Nachweisgrenze als Funktion der Abklingzeit sowie als Funktion der Filtermesszeit berechnen. Dabei ergeben sich für Abklingzeiten bis zu 24 h die in Tab. 6.1 aufgeführten Werte. Die Werte spiegeln die Tatsache wider, dass die Erkennungsgrenze bei kurzen Abklingzeiten hauptsächlich von der Streuung des Kompensationsfaktors und bei längeren Abklingzeiten hauptsächlich von der Filtermesszeit bestimmt wird. Aus diesem Grund kann man bei kurzen Abklingzeiten mit relativ kurzen Filtermesszeiten arbeiten, während bei längeren Abklingzeiten zur Erzielung einer niedrigen Erkennungsgrenze auch längere Messzeiten sinnvoll sind.

Die nach dem Anforderungskriterium erforderliche Erkennungsgrenze in Höhe von 13 mBq/m³ kann bei einer Filtermesszeit von 1000 s nach einer Abklingzeit von etwa 19 h erreicht werden. Bei Berücksichtigung der Tatsache, dass - zumindest im Forschungszentrum Karlsruhe - kein Beschäftigter die volle Arbeitszeit in den Kontrollbereichen verbringt, kann mit der Raumlufmessung allerdings auch bei kürzeren Mess- und Abklingzeiten eine hinreichende Inkorporationsüberwachung gewährleistet werden. Nimmt man beispielsweise an, dass die Beschäftigten nur 2/3 ihrer Arbeitszeit in den Kontrollbereichen verbringen, so entspricht die nachzuweisende Aktivitätszufuhr von 31 Bq einer mittleren Raumluftaktivitätskonzentration in Höhe von 19 mBq/m³. Dieser Wert kann bei einer Filtermesszeit von 1000 s bereits nach einer Abklingzeit von 12 h und bei einer Filtermesszeit von 500 s nach einer Abklingzeit von 14 h erreicht werden. Der Schwellenwert für das Tragen von Atemschutz (40 mBq/m³) kann bereits nach einer Abklingzeit von 8 Stunden bei einer Filtermesszeit von nur 100 s erkannt werden. Insofern reicht die Empfindlichkeit des Messverfahrens für alle Belange des operativen Strahlenschutzes aus.

Tab. 6.1: Erkennungsgrenze für die α -Aktivitätskonzentration in der Raumluft in Abhängigkeit von der Abklingzeit zwischen Ende der Beaufschlagung und Beginn der Luftfiltermessung bei verschiedenen Filtermesszeiten

Abklingzeit in h	Erkennungsgrenze c_{α}^* in mBq/m ³ bei der Filtermesszeit t			
	t = 100 s	t = 200 s	t = 500 s	t = 1000 s
0	154	143	136	134
2	55,6	47,0	40,9	38,7
4	46,7	38,6	32,8	30,6
6	42,5	34,8	29,1	27,0
8	39,0	31,5	26,1	24,0
10	35,9	28,7	23,4	21,3
12	33,0	26,2	21,0	18,9
14	30,5	23,9	18,9	16,9
16	28,1	21,9	17,0	15,1
18	26,0	20,1	15,4	13,5
20	24,1	18,4	13,9	12,1
22	22,4	17,0	12,7	10,8
24	20,8	15,7	11,5	9,8

Bei der Bewertung des Messverfahrens muss allerdings berücksichtigt werden, dass es sich bei der Raumluftüberwachung letztlich um ein arbeitsplatzspezisches Verfahren handelt. Es kann zwar gezeigt werden, dass mit der Raumluftmessung bei Zugrundelegung der jeweiligen Maximalwerte der Raumluftaktivitätskonzentration eine repräsentative Aussage über die Kollektivzufuhr der in dem betreffenden Bereich tätigen Personen gemacht werden kann, allerdings können die mit diesem Verfahren abgeschätzten täglichen Individualzufuhren erheblich von den tatsächlichen Werten abweichen. Hinzu kommt, dass mit der Raumluftmessung prinzipiell nur inhalationsbedingte Aktivitätszufuhren nachgewiesen werden können, während mit der Ausscheidungsmessung alle Zufuhrpfade erfasst werden. Die Ausscheidungsmessung hat darüber hinaus auch den Vorteil, dass die Aktivitätsausscheidung im Urin weitgehend unabhängig vom Zufuhrpfad und von der physikalisch/chemischen Beschaffenheit des zugeführten Materials stets ein direktes Mass für

die systemische Aktivität ist. Damit ist sie auch ein unmittelbares Mass für die systemische Folgedosis, die bei den Transuranen den Hauptbeitrag zur inneren Strahlenexposition liefert.

Allerdings ist die Ausscheidungsmessung nicht so empfindlich wie die Raumlufthmessung, wenngleich sie den neuen Anforderungskriterien bereits sehr nahe kommt. Dies wird durch Tab. 6.2 verdeutlicht, in der die bei Zugrundelegung eines einjährigen Überwachungsintervalls zu erwartenden Ausscheidungsraten für Pu-239 aufgeführt sind. So führt eine inhalationsbedingte Zufuhr von 31 Bq Pu-239 je nach zeitlichem Zufuhrmuster zu einer Urin-Ausscheidungsrate zwischen 0,12 mBq/d und 0,23 mBq/d am Ende des Überwachungsintervalls. Für ein Gemisch von verschiedenen α -strahlenden Pu-Isotopen und von Am-241 können - bezogen auf die Gesamt- α -Aktivität - die gleichen Werte angesetzt werden. Bei Aufarbeitung einer über drei aufeinanderfolgende Tage gesammelten Urinprobe kann prinzipiell eine Gesamt- α -Ausscheidungsrate in Höhe von 0,34 mBq/d nachgewiesen werden (Abschn. 1.5). Somit kommt die Ausscheidungsmessung den neuen Anforderungskriterien durchaus sehr nahe. Im übrigen muss man auch berücksichtigen, dass die bei einer Zufuhr von 31 Bq Plutonium in den Folgejahren auftretenden Jahresdosen jeweils wesentlich kleiner als 1 mSv sind, im allgemeinen sogar wesentlich kleiner als 0,1 mSv. Nur bei wiederholter Zufuhr von Aktivitäten in dieser Höhe können Jahresdosen von 1 mSv erreicht werden. In diesen Fällen wird dann allerdings auch die Aktivitätsausscheidung im Urin die Nachweisgrenze des Messverfahrens deutlich überschreiten.

Tab. 6.1: Aktivitätsausscheidungsraten am Ende eines einjährigen Überwachungsintervalls nach Zufuhr von 31 Bq Pu-239 durch Inhalation von Aerosolen des Absorptionstyps M und der Korngrösse 5 μ m für verschiedene zeitlichen Zufuhrmuster [LU2000b]

Zeitliches Zufuhrmuster	Aktivitätsausscheidungsrate in Bq/d	
	Urin	Stuhl
Einmalige Zufuhr zu Beginn des Überwachungsintervalls	0,12	0,17
Einmalige Zufuhr in der Mitte des Überwachungsintervalls	0,17	0,54
Konstante Dauerzufuhr während des Überwachungsintervalls	0,23	36

Zusammenfassend kann man daher feststellen, dass beide Überwachungsverfahren von grosser Bedeutung für die Inkorporationsüberwachung auf Transurane im Forschungszentrum Karlsruhe sind. Die Raumlufthmessung bietet dabei deutliche Vorteile in Hinblick auf den operativen Strahlenschutz während die Ausscheidungsmessung deutliche Vorteile in Hinblick auf die individuelle Dosimetrie bietet.

7. Referenzen

- BG1973 Staubforschungsinstitut des Hauptverbands der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Prüfzeugnis Nr. 43504-00173 vom 15.02.1997
- BG1981 Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Atemschutz-Merkblatt ZH/134, 1981
- BR1995 Breukelmann, G., Regelmässige Inkorporationsüberwachung durch Raumluftaktivitätsüberwachung, Teil 1: Grundlagen, Advanced Nuclear Fuels GmbH, Bericht GB/74/95, 28.09.1995
- BR1997 Braun, G., unveröffentlichter Bericht, Forschungszentrum Karlsruhe, Juli 1997
- BU2001 Burkhard, K., Persönliche Mitteilung 04.12.2001
- DI1986 Dilger, H., Doerfel, H., Schieferdecker, H., Comparison of Various Methods of Routine Monitoring for Plutonium Incorporation at a Waste Management Facility, Rad. Prot. Dos. **15** pp. 167-175, 1986
- DI1994 Dilger, H., Inkorporationsüberwachung im KfK durch Messungen der Raumluftaktivitätskonzentration, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-Bericht 5415, Dezember 1994
- DI2001 Dilger, H., unveröffentlichter Bericht, Forschungszentrum Karlsruhe, Juni 2001
- DIN1995 Deutsches Institut für Normung e.V., Grundlagen der Messtechnik, Teil 1: Grundbegriffe, Deutsche Norm DIN 1319-1: 1995-01, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 1995
- DIN2000 Deutsches Institut für Normung e.V., Nachweisgrenze und Erkennungsgrenze bei Kernstrahlungsmessungen, Teil 10: Allgemeine Anwendungen, Deutsche Norm DIN 25482-10: 2000-05, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin. 2000
- DO1993 Doerfel, H., Reddmann, Th., Zieger, A., unveröffentlichter Bericht, Forschungszentrum Karlsruhe, Oktober 1993
- FAG1977 FAG Kugelfischer, System Frieeseke & Hoepfner, ABPD-Filtermessanordnung 32 16 008 mit automatischem Probenwechsler und Diehl-Rechner, Beschreibung und Betriebsanleitung SM-TE-K4, 1977
- ICRP1979 International Commission on Radiological Protection. *Limits for Intakes of Radionuclides by Workers*. ICRP Publication 30 Part 1, Annals of the ICRP, **2**, No. 3-4.

- ICRP1986 International Commission on Radiological Protection. *The Metabolism of Plutonium and related Elements*. ICRP Publication 48, Annals of the ICRP, **16**, No. 2-3.
- ICRP1988 International Commission on Radiological Protection. *Individual Monitoring for Intakes of Radionuclides by Workers: Design and Interpretation*. ICRP Publication 54, Annals of the ICRP, **19**, No. 1-3.
- ICRP1993 International Commission on Radiological Protection. *Age-dependent Doses to Members of the Public from Intakes of Radionuclides: Part 2. Ingestion Dose Coefficients*. ICRP Publication 67, Annals of the ICRP, **23**, No. 3-4.
- ICRP1994 International Commission on Radiological Protection. *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*. ICRP Publication 66, Annals of the ICRP, **24**, No. 1-3.
- ICRP1995a International Commission on Radiological Protection. *Age-dependent Doses to Members of the Public from Intakes of Radionuclides: Part 3. Ingestion Dose Coefficients*. ICRP Publication 69, Annals of the ICRP, **25**, No. 1.
- ICRP1995b International Commission on Radiological Protection. *Age-dependent Doses to Members of the Public from Intakes of Radionuclides: Part 4. Inhalation Dose Coefficients*. ICRP Publication 71, Annals of the ICRP, **25**, No. 3-4.
- ICRP1998 International Commission on Radiological Protection. *Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers - Replacement of ICRP Publication 54*. ICRP Publication 78, Annals of the ICRP, **27**, Nos. 3 / 4.
- ICRP2000 International Commission on Radiological Protection. *Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model*. (in press).
- LU2000a Luciani, A., Polig, E., *Verification and Modification of the ICRP-67 Model for Plutonium Dose Calculation*, Health Phys. **78**, No. 3, March 2000
- LU2000b Luciani, A., Persönliche Mitteilung 2000
- RE2001 Reichert, A., Persönliche Mitteilung 2001
- RiPhyKo1994 Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosen, GMBI 45 (1994), 286-307
- SCH1989 Schürle, R., Optimierung der Luftfilterauswertung in α - β -Koinzidenz-anlagen, Diplomarbeit, Berufsakademie Karlsruhe, Fachrichtung Strahlenschutz, 1989
- StrlSchV2001 Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

StrlSchV2001a Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition vom 23. Juli 2001, Bundesanzeiger Verlagsges.mbH, Köln, ISBN 3-89817-159-0

8. Anhänge

8.1. Messung von Leerfiltern

Tab. 8.1.1: Impulsraten von 10 Referenz-Leerfiltern bei Messung mit Maschine 1 am gleichen Tag (03.01.2001 - Beispiel für Ausreisser im β -Zähler)

Messgrösse	Messung von Leerfilter Nr.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040
R_1	86	102	98	98	82	90	80	72	77	91
R_1/t	0,08	0,10	0,09	0,09	0,08	0,09	0,08	0,07	0,07	0,09
R_2	9266	9255	10108	8752	9090	8962	9144	9016	8857	9324
R_2/t	8,91	8,90	9,72	8,42	8,74	8,62	8,79	8,67	8,52	8,97
R_γ	7688	7690	7646	7437	7622	7532	7637	7391	7410	7658
R_γ/t	7,39	7,39	7,35	7,15	7,33	7,24	7,34	7,11	7,13	7,36
R_3	13	8	7	12	5	4	9	6	9	8
R_3/t	0,013	0,008	0,007	0,012	0,005	0,004	0,009	0,006	0,009	0,008
R_4	2	6	1	3	1	0	1	3	0	1
R_4/t	0,002	0,006	0,001	0,003	0,001	0,000	0,001	0,003	0,000	0,001

Tab. 8.1.2: Impulsraten von 10 Referenz-Leerfiltern bei Messung mit Maschine 2 am gleichen Tag (08.01.2001 - Beispiel für Ausreisser im α -Zähler)

Messgrösse	Messung von Leerfilter Nr.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t	1042	1042	1042	1042	1042	1042	1042	1042	1042	1042
R_1	435	126	207	120	118	95	109	116	126	97
R_1/t	0,42	0,12	0,20	0,12	0,11	0,09	0,10	0,11	0,12	0,09
R_2	8462	8443	8706	8623	8302	8483	8473	8457	8470	8157
R_2/t	8,12	8,10	8,36	8,28	7,97	8,14	8,13	8,12	8,13	7,83
R_γ	7562	7396	7454	7547	7360	7452	7498	7392	7405	7260
R_γ/t	7,26	7,10	7,15	7,24	7,06	7,15	7,20	7,09	7,11	6,97
R_3	13	18	40	13	13	4	14	14	14	4
R_3/t	0,012	0,017	0,038	0,012	0,012	0,004	0,013	0,013	0,013	0,004
R_4	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0
R_4/t	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000

Tab. 8.1.3: Impulsraten von 10 Referenz-Leerfiltern bei Messung mit Maschine 3 am gleichen Tag (11.01.2001)

Messgrösse	Messung von Leerfilter Nr.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t	1043	1044	1043	1044	1043	1043	1044	1044	1043	1043
R_1	81	69	66	47	73	46	42	42	49	27
R_1/t	0,08	0,07	0,06	0,05	0,07	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
R_2	4582	4624	4562	4557	4665	4459	4501	4535	4589	4525
R_2/t	4,39	4,43	4,37	4,36	4,47	4,28	4,31	4,34	4,40	4,34
R_γ	4160	4252	4186	4220	4316	4156	4245	4160	4216	4216
R_γ/t	3,99	4,07	4,01	4,04	4,14	3,98	4,07	3,98	4,04	4,04
R_3	33	25	14	17	20	10	16	10	12	4
R_3/t	0,032	0,024	0,013	0,016	0,019	0,010	0,015	0,010	0,012	0,004
R_4	0	2	0	1	2	1	0	0	0	0
R_4/t	0,000	0,002	0,000	0,001	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000

Tab. 8.1.4: Impulsraten von 10 Referenz-Leerfiltern bei Messung mit Maschine 4 am gleichen Tag (11.01.2001)

Messgrösse	Messung von Leerfilter Nr.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t	1056	1042	1042	1042	1041	1042	1042	1042	1042	1042
R_1	137	141	180	132	133	150	142	130	123	126
R_1/t	0,13	0,14	0,17	0,13	0,13	0,14	0,14	0,12	0,12	0,12
R_2	8720	8499	8583	8474	8366	8461	8629	8421	8522	8398
R_2/t	8,26	8,16	8,24	8,13	8,04	8,12	8,28	8,08	8,18	8,06
R_γ	7694	7422	7496	7435	7306	7376	7472	7300	7426	7307
R_γ/t	7,29	7,12	7,19	7,14	7,02	7,08	7,17	7,01	7,13	7,01
R_3	5	12	13	7	10	11	10	13	6	8
R_3/t	0,005	0,012	0,012	0,007	0,010	0,011	0,010	0,012	0,006	0,008
R_4	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
R_4/t	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000

Tab. 8.1.5: Mittelwerte und empirische Standardabweichungen der Impulszahlen von 10 Referenz-Leerfiltern bei Messung mit Maschine 1 (Messzeit 1043 ± 10 s)

Messgrösse	Messung der 10 Leerfilter am Tag Nr.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_1	84,5	93,9	89,4	99,4	87,6	105,9	81,6	73,7	107,3	100,8
$\sigma(R_1)$	9,14	13,2	11,9	13,6	9,9	16,9	10,6	7,1	11,1	18,0
R_2	9153	9061,8	9141,9	9240,0	9177,4	9056,2	9063,1	8940,6	9085,1	9018,9
$\sigma(R_2)$	249	176,0	125,3	170,8	375,1	64,4	97,2	91,2	142,3	132,6
R_γ	7544	7488,5	7536,7	7569,1	7571,1	7391,0	7442,2	7318,3	7402,7	7382,2
$\sigma(R_\gamma)$	190	91,7	89,1	147,7	118,2	63,5	75,2	66,0	142,4	102,1
R_3	6,20	8,2	8,1	8,0	8,1	9,7	5,6	5,9	12,4	10,6
$\sigma(R_3)$	2,20	3,0	3,0	3,9	2,8	3,6	2,0	2,3	2,1	3,5
R_4	1,70	1,5	1,8	1,5	1,8	1,6	0,9	1,0	2,1	1,9
$\sigma(R_4)$	1,42	1,4	1,0	1,4	1,8	1,6	0,7	1,1	1,2	1,2

Tab. 8.1.6: Mittelwerte und empirische Standardabweichungen der Impulszahlen von 10 Referenz-Leerfiltern bei Messung mit Maschine 2 (Messzeit 1043 ± 10 s)

Messgrösse	Messung der 10 Leerfilter am Tag Nr.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_1	108,3	113,5	90,8	154,9	108,5	160,8	135,5	74,3	105,9	100,1
$\sigma(R_1)$	17,19	12,0	12,2	103,3	24,1	48,2	26,1	9,8	7,7	8,7
R_2	8420	8475,1	8450,7	8457,6	8663,0	8621,2	8380,0	8183,1	8432,3	8331,7
$\sigma(R_2)$	128	73,3	128,3	150,9	122,6	169,2	114,9	99,2	111,2	134,2
R_γ	7439	7488,4	7506,0	7432,6	7665,8	7597,4	7344,7	7262,8	7420,8	7426,7
$\sigma(R_\gamma)$	64	86,5	85,8	90,5	106,6	109,3	64,0	66,4	110,4	107,8
R_3	11,60	9,1	6,6	14,7	10,3	20,4	15,8	4,1	7,2	9,3
$\sigma(R_3)$	4,70	3,9	2,5	9,9	5,5	11,4	6,3	2,3	1,9	3,2
R_4	0,00	0,0	0,4	0,3	0,2	0,6	0,4	0,2	0,1	0,2
$\sigma(R_4)$	0,00	0,0	0,7	0,7	0,4	0,7	0,7	0,4	0,3	0,6

Tab. 8.1.7: Mittelwerte und empirische Standardabweichungen der Impulszahlen von 10 Referenz-Leerfiltern bei Messung mit Maschine 3 (Messzeit 1043 ± 10 s)

Messgrösse	Messung der 10 Leerfilter am Tag Nr.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_1	54,2	36,6	46,7	35,4	32,0	61,5	41,5	32,9	43,0	35,9
$\sigma(R_1)$	17,04	5,7	8,9	5,0	4,7	13,8	9,0	6,5	8,3	5,4
R_2	4560	4568,1	4534,9	4637,0	4575,2	4668,6	4458,2	4478,9	4422,1	4369,4
$\sigma(R_2)$	60	59,8	92,3	61,2	71,4	75,9	77,6	71,9	81,0	56,7
R_γ	4213	4200,3	4161,8	4321,9	4216,8	4392,0	4111,7	4138,7	4062,8	4027,3
$\sigma(R_\gamma)$	50	61,8	70,1	115,6	84,1	50,4	73,8	72,6	94,7	39,4
R_3	16,10	8,5	11,8	8,9	7,3	19,1	11,3	5,9	10,8	6,2
$\sigma(R_3)$	8,32	2,9	4,1	1,7	2,3	6,6	6,0	3,6	3,3	2,8
R_4	0,60	0,4	0,0	0,3	0,1	0,9	0,3	0,1	0,0	0,0
$\sigma(R_4)$	0,84	0,7	0,0	0,5	0,3	1,4	0,7	0,3	0,0	0,0

Tab. 8.1.8: Mittelwerte und empirische Standardabweichungen der Impulszahlen von 10 Referenz-Leerfiltern bei Messung mit Maschine 4 (Messzeit 1043 ± 10 s)

Messgrösse	Messung der 10 Leerfilter am Tag Nr.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_1	139,4	103,4	89,5	113,7	88,1	113,5	133,3	96,3	98,2	123,7
$\sigma(R_1)$	16,36	20,8	17,7	23,1	12,8	25,1	15,5	4,9	18,4	38,2
R_2	8507	8550,0	8580,7	8455,0	8311,7	8369,4	8297,4	8399,5	8407,4	8591,0
$\sigma(R_2)$	110	154,3	109,5	441,4	129,4	190,5	71,0	76,1	116,2	117,4
R_γ	7423	7527,1	7620,2	7286,5	7360,4	7348,0	7281,6	7431,2	7426,4	7555,7
$\sigma(R_\gamma)$	118	143,5	78,6	111,0	89,2	141,2	79,5	48,3	116,3	78,0
R_3	9,50	3,1	2,9	7,4	1,8	7,0	8,7	2,9	3,2	9,6
$\sigma(R_3)$	2,88	2,5	1,4	5,1	1,1	3,6	3,1	1,0	1,9	8,6
R_4	0,50	0,1	0,2	0,0	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0
$\sigma(R_4)$	0,53	0,3	0,4	0,0	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,0

8.2. Definition der Erkennungs- und Nachweisgrenze

Die Definition der Erkennungsgrenze für die Bestimmung der α -Aktivitätskonzentration in der Raumluft orientiert sich an der folgenden Beziehung

$$c_\alpha = \frac{(R_1 - R_{10}) - F_\alpha \cdot (R_3 - R_{30} - R_4 + R_{40})}{\varepsilon_\alpha \cdot \dot{V} \cdot t_s} \quad (8.2.1)$$

Hierbei ist

c_α	die α -Aktivitätskonzentration in der Raumluft
R_1	die Impulsrate im α -Kanal
R_{10}	die Nulleffekt-Impulsrate im α -Kanal
R_3	die Impulsrate im Pseudokoinzidenzkanal
R_{30}	die Nulleffekt-Impulsrate im Pseudokoinzidenzkanal
R_4	die Impulsrate im Zufallskoinzidenzkanal
R_{40}	die Nulleffekt-Impulsrate im Zufallskoinzidenzkanal
F_α	der α -Kompensationsfaktor
ε_α	der α -Wirkungsgrad
\dot{V}	der Luftdurchsatz
t_s	die Sammelzeit

Nach DIN 1319 [DIN1995] gilt für die Standardunsicherheit der α -Aktivitätskonzentration c_α

$$u(c_\alpha) = \Phi_\alpha \cdot \sqrt{U_1 + U_2} \quad (8.2.2)$$

mit

$$\Phi_\alpha = \frac{1}{\varepsilon_\alpha \cdot \dot{V} \cdot t_s}$$

$$U_1 = \frac{u^2(\varepsilon_\alpha)}{\varepsilon_\alpha^2} \cdot (R_1 - R_{10} - F_\alpha \cdot (R_3 - R_{30} - R_4 + R_{40}))^2$$

$$U_2 = u^2(F_\alpha) \cdot (R_3 - R_{30} - R_4 + R_{40})^2 + \frac{R_1 + F_\alpha^2 \cdot (R_3 + R_4)}{t_m} + \frac{R_{10} + F_\alpha^2 \cdot (R_{30} + R_{40})}{t_0}$$

Hierbei ist

$u(c_\alpha)$	die Standardunsicherheit der α -Aktivitätskonzentration in der Raumluft
$u(\varepsilon_\alpha)$	die Standardunsicherheit des α -Wirkungsgrades
$u(F_\alpha)$	die Standardunsicherheit des α -Kompensationsfaktors
t_m	die Messzeit zur Bestimmung der Impulsraten R_i
t_0	die Messzeit zur Bestimmung der Impulsraten R_{i0}

Für die Berechnung der Erkennungsgrenze wird $\tilde{u}(\xi_\alpha = 0)$ benötigt. Für $\xi_\alpha = 0$ ist

$$R_1 - R_{10} - F_\alpha \cdot (R_3 - R_{30} - R_4 + R_{40}) = 0$$

und man erhält mit Gl. (8.2.2)

$$\tilde{u}(0) = \varphi_\alpha \cdot \sqrt{u^2(F_\alpha) \cdot (R_3 - R_{30} - R_4 + R_{40})^2 + \frac{R_1 + F_\alpha^2 \cdot (R_3 + R_4)}{t_m} + \frac{R_{10} + F_\alpha^2 \cdot (R_{30} + R_{40})}{t_0}} \quad (8.2.3)$$

Damit ergibt sich für die Erkennungsgrenze nach DIN 25482-10 [DIN2000]

$$c_\alpha^* = k_{1-\alpha} \cdot \tilde{u}(0) = k_{1-\alpha} \cdot \varphi_\alpha \cdot \sqrt{u^2(F_\alpha) \cdot (R_3 - R_{30} - R_4 + R_{40})^2 + \frac{R_1 + F_\alpha^2 \cdot (R_3 + R_4)}{t_m} + \frac{R_{10} + F_\alpha^2 \cdot (R_{30} + R_{40})}{t_0}}$$

bzw.

$$c_\alpha^* = \frac{k_{1-\alpha}}{\varepsilon_\alpha \cdot \dot{V} \cdot t_s} \cdot \sqrt{u^2(F_\alpha) \cdot (R_3 - R_{30} - R_4 + R_{40})^2 + \frac{R_1 + F_\alpha^2 \cdot (R_3 + R_4)}{t_m} + \frac{R_{10} + F_\alpha^2 \cdot (R_{30} + R_{40})}{t_0}} \quad (8.2.4)$$

Nach DIN 25482-10 sollte für α stets der Wert 0,05 gewählt werden. Damit ist $k_{1-\alpha} = k_{0,95} = 1,65$. Nimmt man nach DIN 25482-10 für den Fehler zweiter Art ebenfalls eine Wahrscheinlichkeit von 0,05 an, so gilt für die Nachweisgrenze ξ_α^* in guter Näherung

$$\xi_\alpha^* = 2 \cdot c_\alpha^* \quad (8.2.5)$$

In Analogie dazu gilt für die Erkennungsgrenze der β -Aktivitätskonzentration in der Raumluft

$$c_\beta^* = \frac{k_{1-\alpha}}{\varepsilon_\beta \cdot \dot{V} \cdot t_s} \cdot \sqrt{u^2(F_\beta) \cdot (R_3 - R_{30} - R_4 + R_{40})^2 + \frac{R_2 + F_\beta^2 \cdot (R_3 + R_4)}{t_m} + \frac{R_{20} + F_\beta^2 \cdot (R_{30} + R_{40})}{t_0}} \quad (8.2.6)$$

bzw.

$$\xi_\beta^* = 2 \cdot c_\beta^* \quad (8.2.7)$$

Hierbei ist

c_{β}^*	Erkennungsgrenze für die β -Aktivitätskonzentration in der Raumluft in Bq/m ³
ξ_{β}^*	Nachweisgrenze für die β -Aktivitätskonzentration in der Raumluft in Bq/m ³
$u(F_{\beta})$	Standardunsicherheit des β -Kompensationsfaktors
R_2	Impulsrate im β -Kanal in Imp/s
R_{20}	Nulleffekt-Impulsrate im β -Kanal in Imp/s
F_{β}	β -Kompensationsfaktor
ε_{β}	β -Wirkungsgrad

8.3. Aufstellungsorte der Aerosolsammler

In den folgenden Tabellen sind die im Forschungszentrum zur routinemässigen Inkorporationsüberwachung auf Transurane fest installierten Aerosolsammler zusammengestellt. Dabei wird zwischen den Überwachungsbereichen "Institute Nord" (Anhang 8.3.1), "HDB" (Anhang 8.3.2) und "MZFR" (Anhang 8.3.3) unterschieden. Die Aufstellungsorte der einzelnen Aerosolsammler sind den Gebäudeplänen in Anhang 8.3.4 zu entnehmen.

8.3.1. Bereich Institute Nord

Tab. 8.3.1.1: Kennzeichnung der Messstellen zur routinenmässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 701

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
1	013	Filter- und Versorgungsraum	40	tägl.	-
2	135	Bedienungsraum	40	tägl.	-
3	141	Heisses Labor	40	tägl.	-
4	142	Microsonden	40	tägl.	-
5	148	Dekolabor	60	tägl.	Maske
6	184	Metallografie	40	tägl.	-
7	190	Beschickungsraum	40	tägl.	-
8	193	Röntgen-Labor	40	tägl.	-
9	291	Kranhalle Ost	60	tägl.	Maske
10	291	Kranhalle West	40	tägl.	-
11	1.117	ZMS-Labor	40	tägl.	-

Tab. 8.3.1.2: Kennzeichnung der Messstellen zur routinenmässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 705

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
1	126	vor Kleinteilemonitor II	20	tägl.	-
2	126	vor Wäschemonitor II	20	tägl.	-
3	126	am Abzug	20	tägl.	-
4	126	vor Wäschemonitor I	20	tägl.	-
5	126	hinter Wäschemonitor II	20	tägl.	-

Tab. 8.3.1.3: Kennzeichnung der Messstellen zur routinenmässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 712

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
1 - 2	149		20	tägl.	-
3 - 4	151		20	tägl.	-
5 - 6	152		20	tägl.	-
7 - 8	153		20	tägl.	-
9 - 15	154		20	tägl.	-
16	235		20	tägl.	-
17	236		20	tägl.	-
18	237		20	tägl.	-
16 - 23	163 C		30	tägl.	-
24 - 26	163/1		30	tägl.	-
27 - 30	163/2		30	tägl.	-

Tab. 8.3.1.3 (Forts.): Kennzeichnung der Messstellen zur routinenmässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 712

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
31 - 37	163/3		30	tägl.	-
42	152		52	wöchentl.	-
43	154		42	wöchentl.	-
44	163		52	wöchentl.	-
45	025		75	wöchentl.	-

Tab. 8.3.1.4: Kennzeichnung der Messstellen zur routinenmässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 721 (Messstellen 2 - 4) und Geb. 723 (Messstelle 1)

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
1	033	Abwassersammelstation	40	tägl.	-
2	152	Waste-Lager	40	tägl.	-
3	153	Waste-Lager	40	tägl.	-
4	171	Isotopenlager	40	tägl.	-

8.3.2. Bereich HDB

Tab. 8.3.2.1: Kennzeichnung der Messstellen zur routinemässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 531

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
Geb. 531A					
1 / 536M	176		15	tägl.	-
2 / 536M	126a		70	tägl.	-
3 / 563	104		70	tägl.	-
Geb. 531B					
23 / 563	105	010	20	tägl.	-
24 / 536M	103	011	20	tägl.	-
Geb. 531C					
30 / 526	005		70	tägl.	-
Geb. 531D					
32 / 526	002		70	wöchentl.	-
33 / 526	002		70	wöchentl.	-
34 / 526	002		70	wöchentl.	-
35 / 526	001		70	wöchentl.	-
36 / 526	001		70	wöchentl.	-
37 / 526	001		70	wöchentl.	-
38 / 526	012		25	wöchentl.	-
39 / 526	012		25	wöchentl.	-
40 / 526	012		25	wöchentl.	-

Tab. 8.3.2.1 (Forts.): Kennzeichnung der Messstellen zur routinenmässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 531

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
Geb. 531E					
41 / 519	G007		70	wöchentl.	-
42 / 519	004		25	wöchentl	-
43 / 519	011		25	wöchentl	-
44 / 519	012		25	wöchentl	-

Tab. 8.3.2.2: Kennzeichnung der Messstellen zur routinenmässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 536

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
1	145		20	tägl.	Maske
2	142		20	tägl.	-
3	152		20	tägl.	-
4	141	Ascheaustrag Verbrennungsofen	20	tägl.	Voll-schutz
5	141	Ascheaustrag Nachbrennkammer	20	tägl.	Voll-schutz
6	141	Strahlwäscherpumpen	20	tägl.	Voll-schutz
7	242		20	tägl.	-
8	245		20	tägl.	Voll-schutz
9	251		20	tägl.	-

Tab. 8.3.2.2(Forts.): Kennzeichnung der Messstellen zur routinenmässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 536

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
10	251		20	tägl.	-
11	241	Bereich Verbrennungsofen	30	tägl.	Maske
12	241	Bereich Nachbrennkammer	20	tägl.	Maske
13	241	Bereich Kerzenfiltergehäuse	20	tägl.	Maske
14	346		20	tägl.	-
15	342		20	tägl.	-
16	341		70	tägl.	Maske
17	108	Betriebsraum	25	tägl.	-
18	109	Fassreinigung	25	tägl.	-
19	202	Betriebsraum	70	tägl.	-
20	302		70	tägl.	-
21	305		20	tägl.	Voll-schutz
31	141	Ascheaustrag Verbrennungsofen	40	wöchentl.	Maske
32	241	Bereich Verbrennungsofen	40	wöchentl.	Maske
33	341	Caisson	40	wöchentl.	Maske
34	345	Beschickungsbox	40	wöchentl.	-
35	105/106	Trofa-Anlage	40	wöchentl.	-
36	109	Fasswaschanlage	40	wöchentl.	Maske

Tab. 8.3.2.3: Kennzeichnung der Messstellen zur routinemässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 545

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
3	124		30	tägl.	-
4	115		30	tägl.	-
5	125	West	30	tägl.	-
6	125	Ost	30	tägl.	-
7	133	unten	30	tägl.	-
8	133	oben	30	tägl.	-
9	124b		30	tägl.	-
10	124c		30	tägl.	Voll-schutz
11	136	oben	30	tägl.	Maske
12	136	Unten	30	tägl.	Maske
13	126	West	30	tägl.	-
14	126	Ost	30	tägl.	-
15	120	oben	30	tägl.	-
16	120	unten	30	tägl.	-
17	203		30	tägl.	Maske
18	206		30	tägl.	-
19	208		30	tägl.	-
20	131		30	tägl.	Maske
21	128		30	tägl.	Maske
22	129		30	tägl.	Maske
23	304b		30	tägl.	Maske
24	132		30	tägl.	-

Tab. 8.3.2.4: Kennzeichnung der Messstellen zur routinenmässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 547

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
1	108		26	tägl.	-
2	108		26	tägl.	-
3	131		26	tägl.	-
4	130		26	tägl.	-

Tab. 8.3.2.5: Kennzeichnung der Messstellen zur routinenmässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 548

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
1	147	Tor 4	20	tägl.	-
2	147	Tor 5 Bauschuttanlage	20	tägl.	-
3	147	Anlage S, vor Materialschleuse	20	tägl.	-
4	140	Anlage S, vor Schaltwarte	20	tägl.	-
5	101	Flur	20	tägl.	-
6	120	Flur	20	tägl.	-
7	009	Konzentratlager GNS	20	tägl.	-
8	102	Anlage Favorit IV GNS	20	tägl.	-
9	109	vor Bauschuttcaisson	20	tägl.	-
10	135	vor Grosser Box	20	tägl.	-
11	135	Muldenbandstrahlanlage	20	tägl.	-
12	225	Maskendeko	20	tägl.	-

Tab. 8.3.2.5 (Forts.): Kennzeichnung der Messstellen zur routinenmässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 548

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
13	110 A	Alpha-Box Vorschleuse	20	tägl.	Maske
14	028	Flur vor Sperrbereich	25	tägl.	-
15	135	vor Sandstrahlbox	25	tägl.	-
16	112	vor Materialschleuse Tor 8	25	tägl.	-
17	040	Anlage S, Flur Keller	25	tägl.	-
18	143	Anlage S, Pressenhydraulik	20	tägl.	-
19	144	Anlage S, Messraum	20	tägl.	-
20	048	Anlage S, Fasswaage	20	tägl.	-
21	135	Tor 3	25	tägl.	-
22	109 D	vor α -Doppeldeckelschleuse	70	tägl.	-
23	135	Bandsäge, Zerlegearbeiten	25	tägl.	-
24	135	Werkbank, Zerlegearbeiten	25	tägl.	-
25	135	Abfallentsorgung	25	tägl.	Maske
26	127	HS/ÜM Messraum	25	tägl.	-
27	148	Neubau Tor 5	20	tägl.	-
28	148	Neubau Tor 4	20	tägl.	-
29	135	vor Zerlegecaisson	15	tägl.	-
32	135	Muldenbandstrahlanlage	42	wöchentl.	-
33	135	vor grosser Box	40	wöchentl.	-
34	102	Anlage Favorit IV	42	wöchentl.	-
35	109 C	α -Containerschleuse	40	wöchentl.	-

Tab. 8.3.2.6: Kennzeichnung der Messstellen zur routinemässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 563

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
3	104	Bedienungsgang		tägl.	-
23	010			wöchentl.	-
24	011			wöchentl.	-

8.3.3. Bereich MZFR

Tab. 8.3.3.1: Kennzeichnung der Messstellen zur routinemässigen Inkorporationsüberwachung durch Messung der Raumluftaktivitätskonzentration in Geb. 901

Laufende Messstellen-Nr.	Raum-Nr.	Bemerkungen zum Aufstellungsort	Luft-durchsatz in m ³ /h	Filter-wechsel	Atem-schutz
1	201	Niveau 0 m	25	tägl.	-
2	401	Niveau 6,5 m	15	tägl.	-
3	403	Niveau 11 m	25	tägl.	-
4	601	Niveau 25 m	25	tägl.	-
5	402	Niveau 11 m	25	tägl.	-
7	301	Niveau 11 m	30	tägl.	
8	401	Niveau 15 m	40	tägl.	Maske

8.3.4. Gebäudepläne

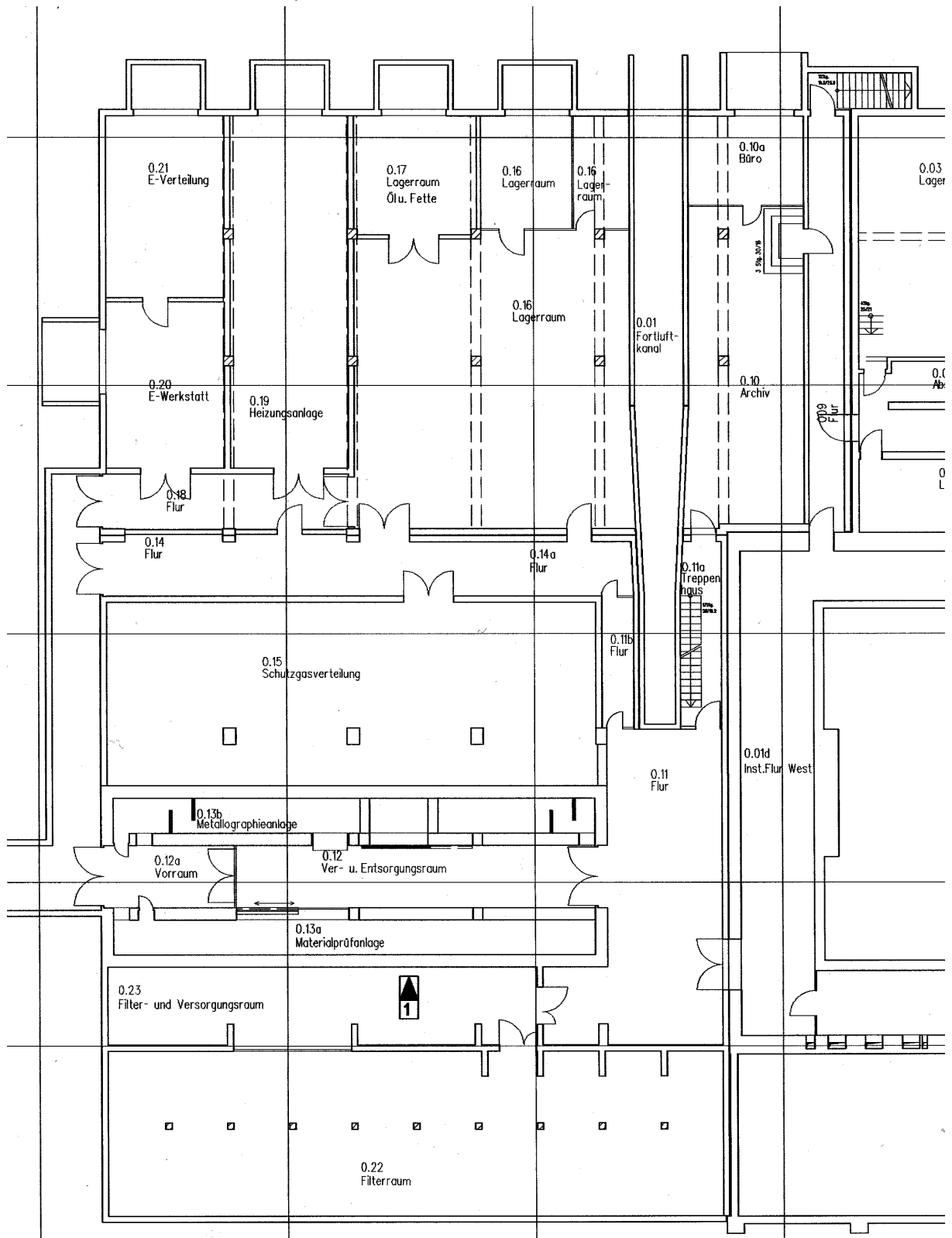


Abb. 8.3.4.1: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 701, KG

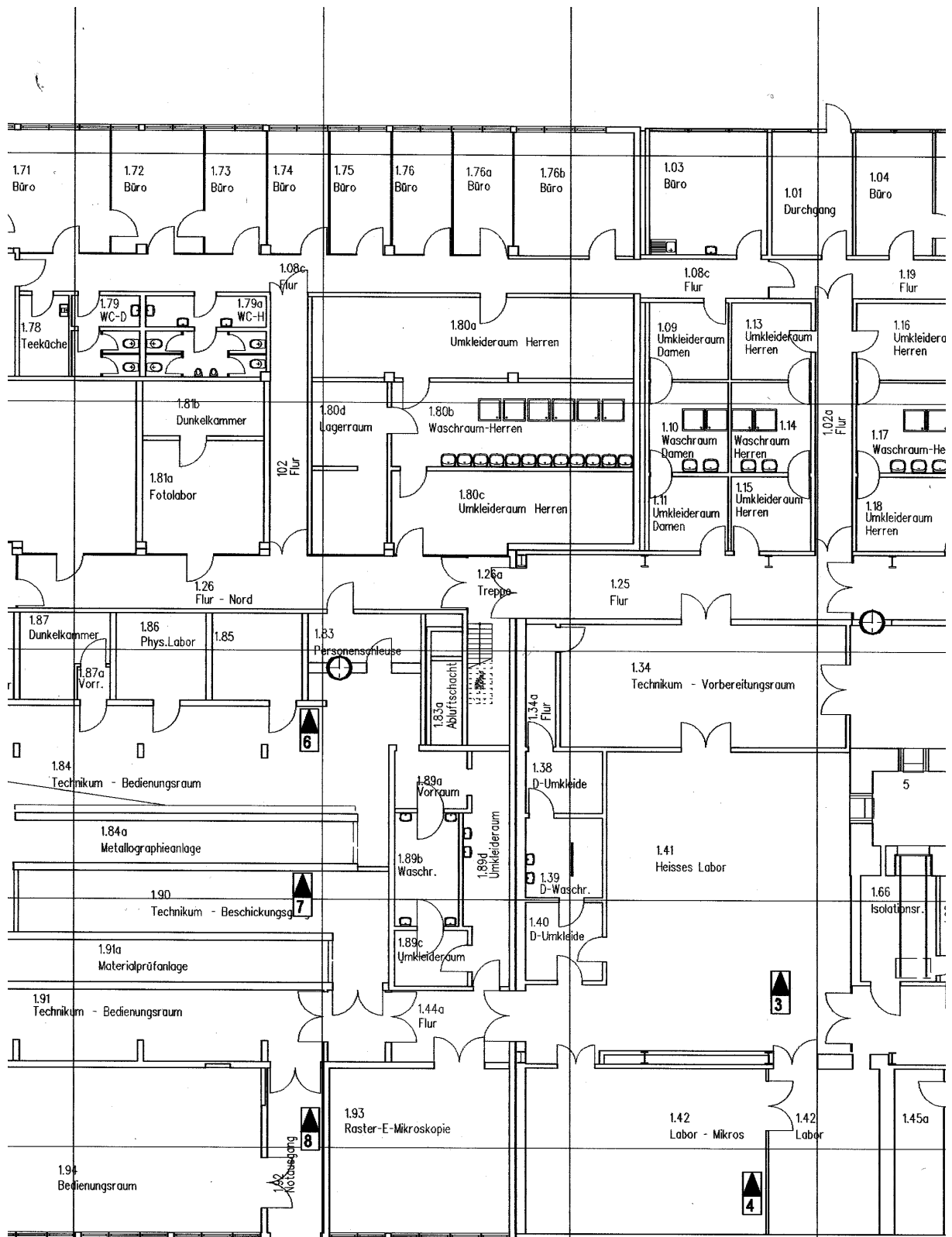


Abb. 8.3.4.2: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 701, EG-Westlicher Teil

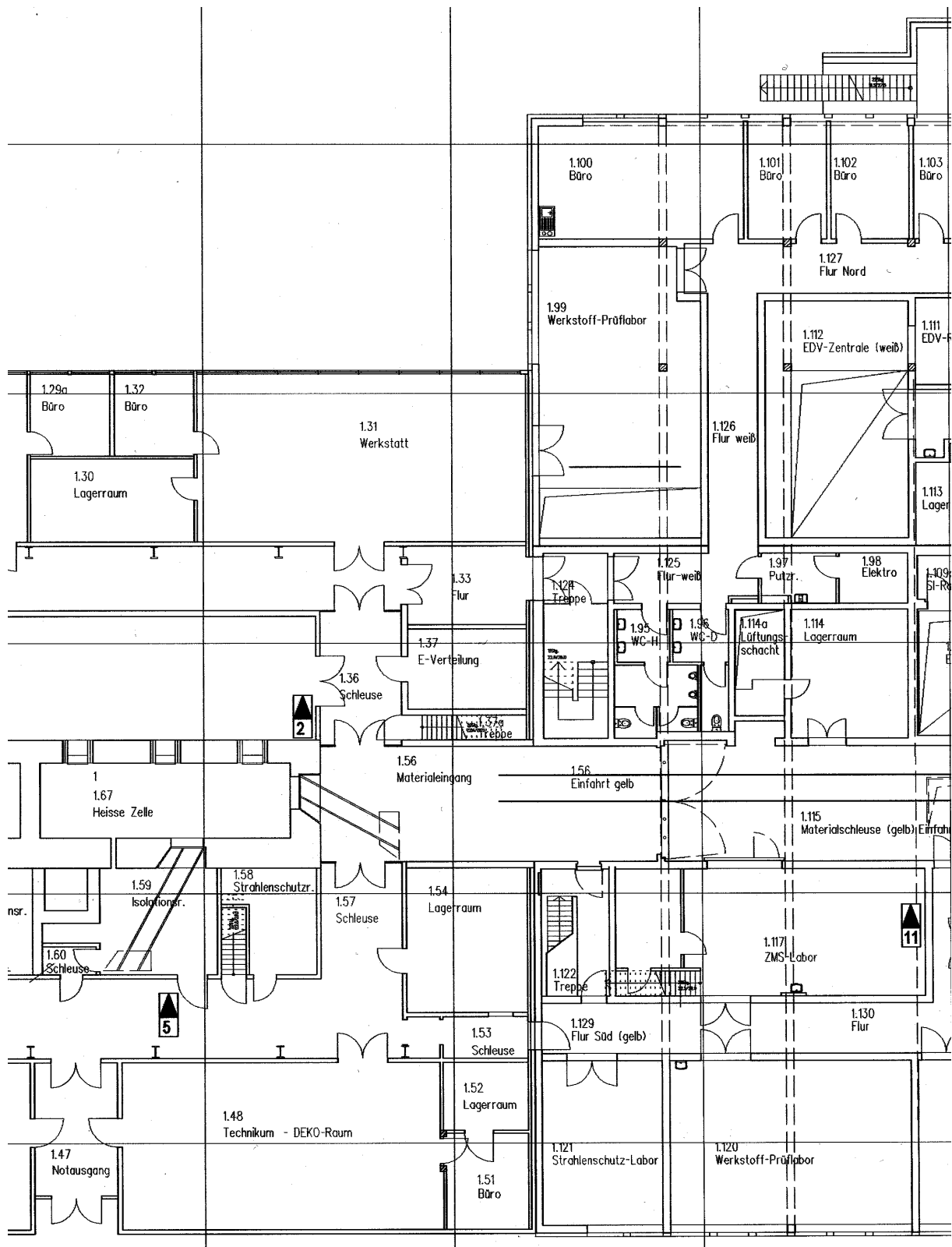


Abb. 8.3.4.3: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 701, EG-Östlicher Teil

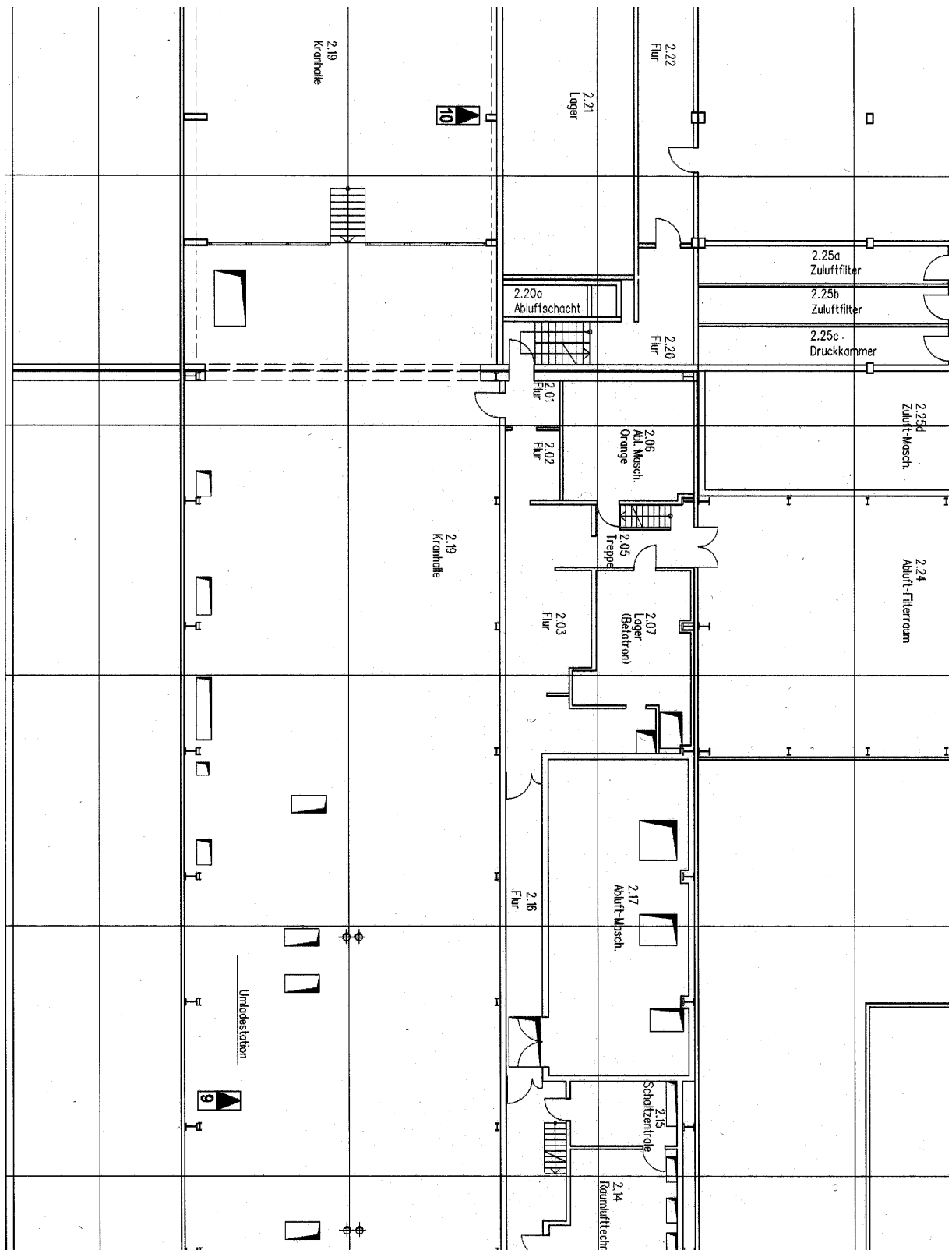


Abb. 8.3.4.4: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 701, 1. OG

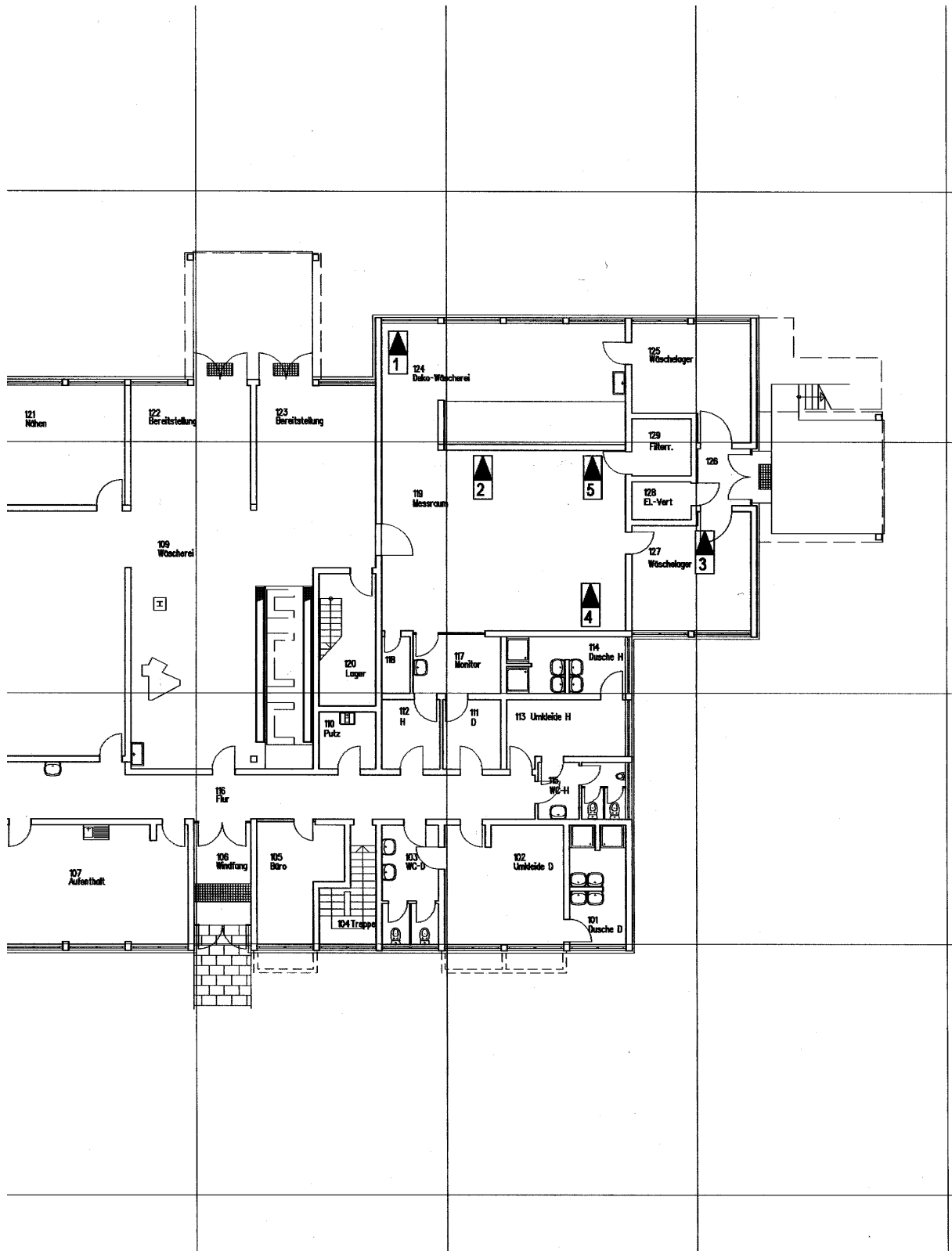


Abb. 8.3.4.5: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 705, KG

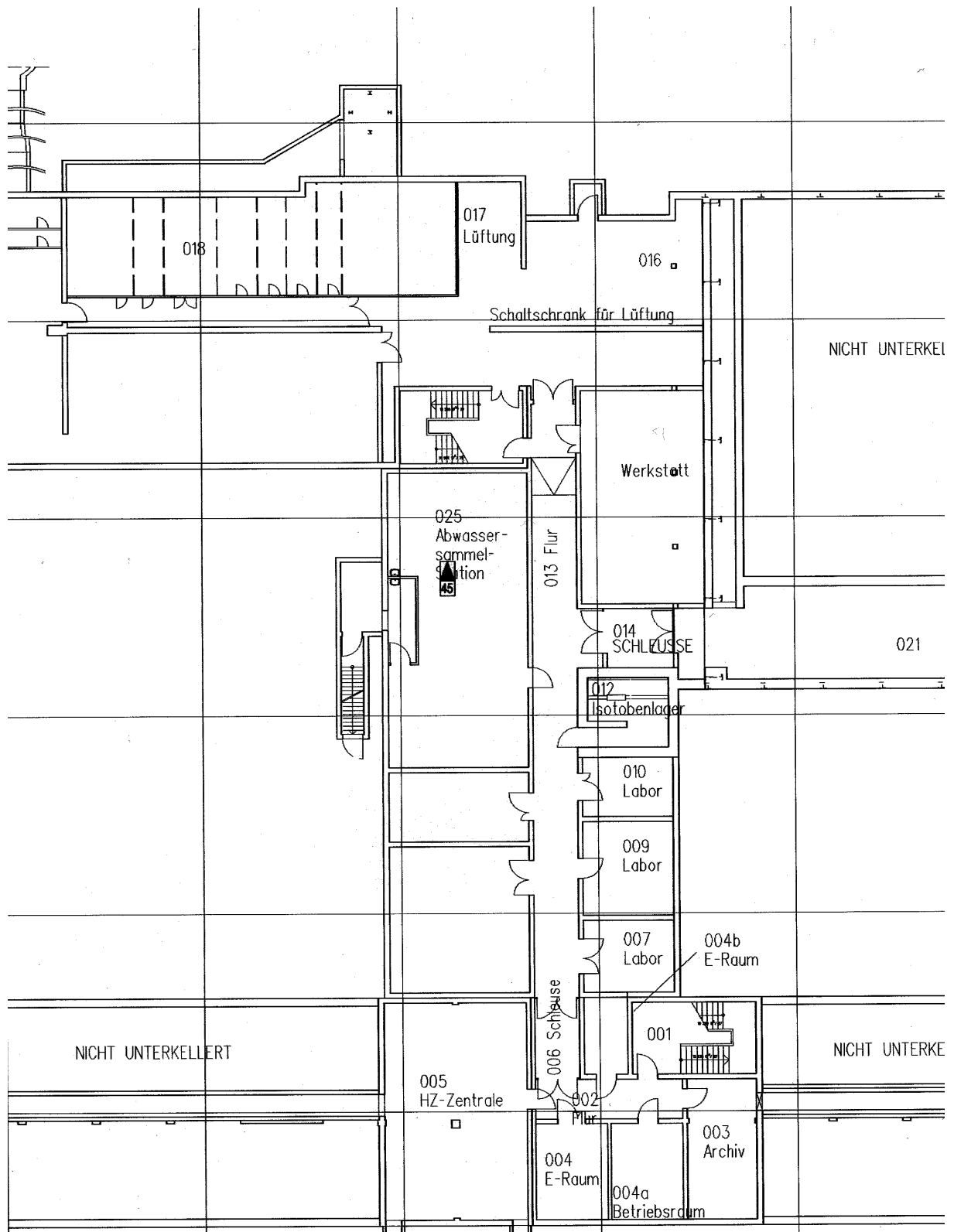


Abb. 8.4.3.6: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 712, KG

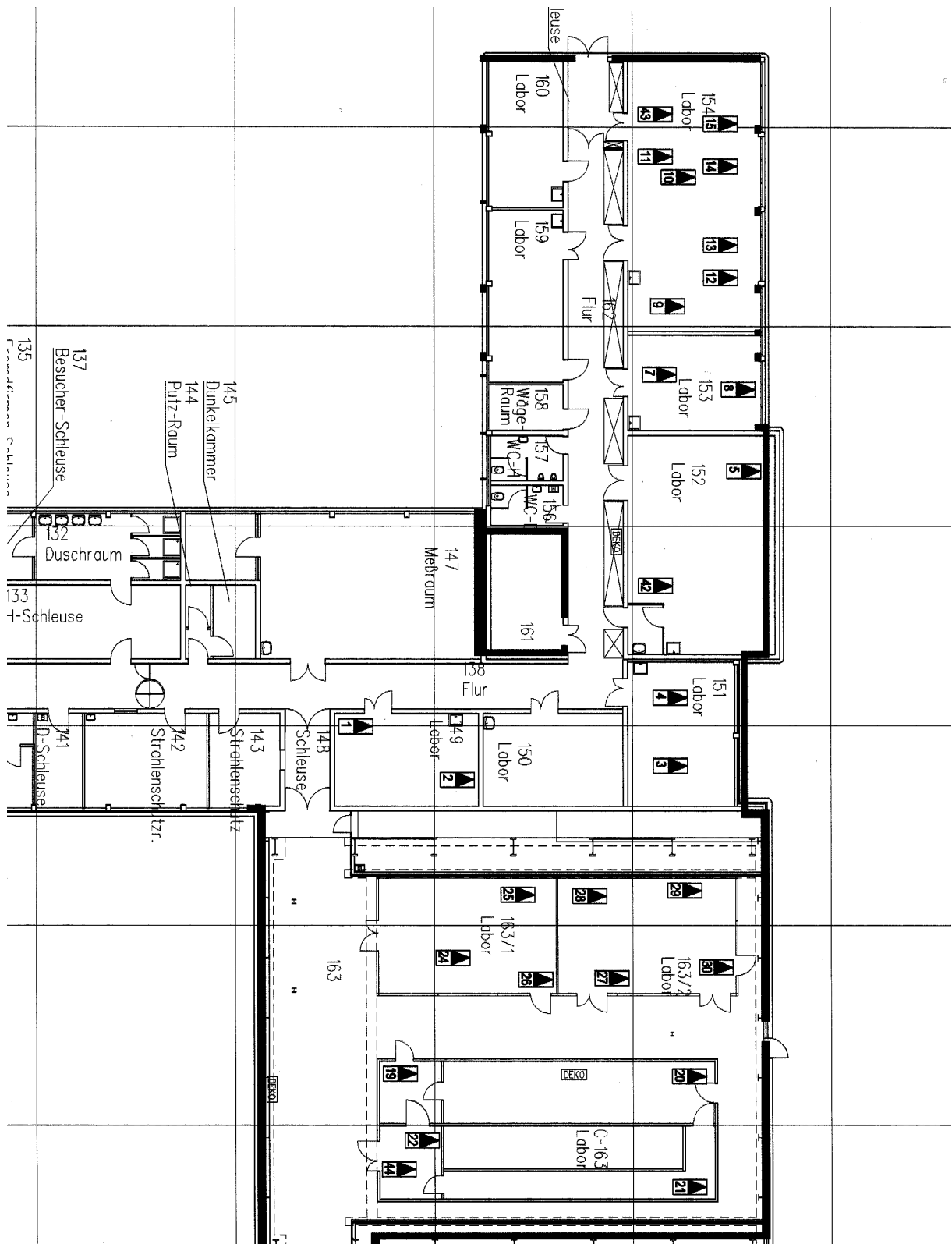


Abb. 8.4.3.7: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 712, EG

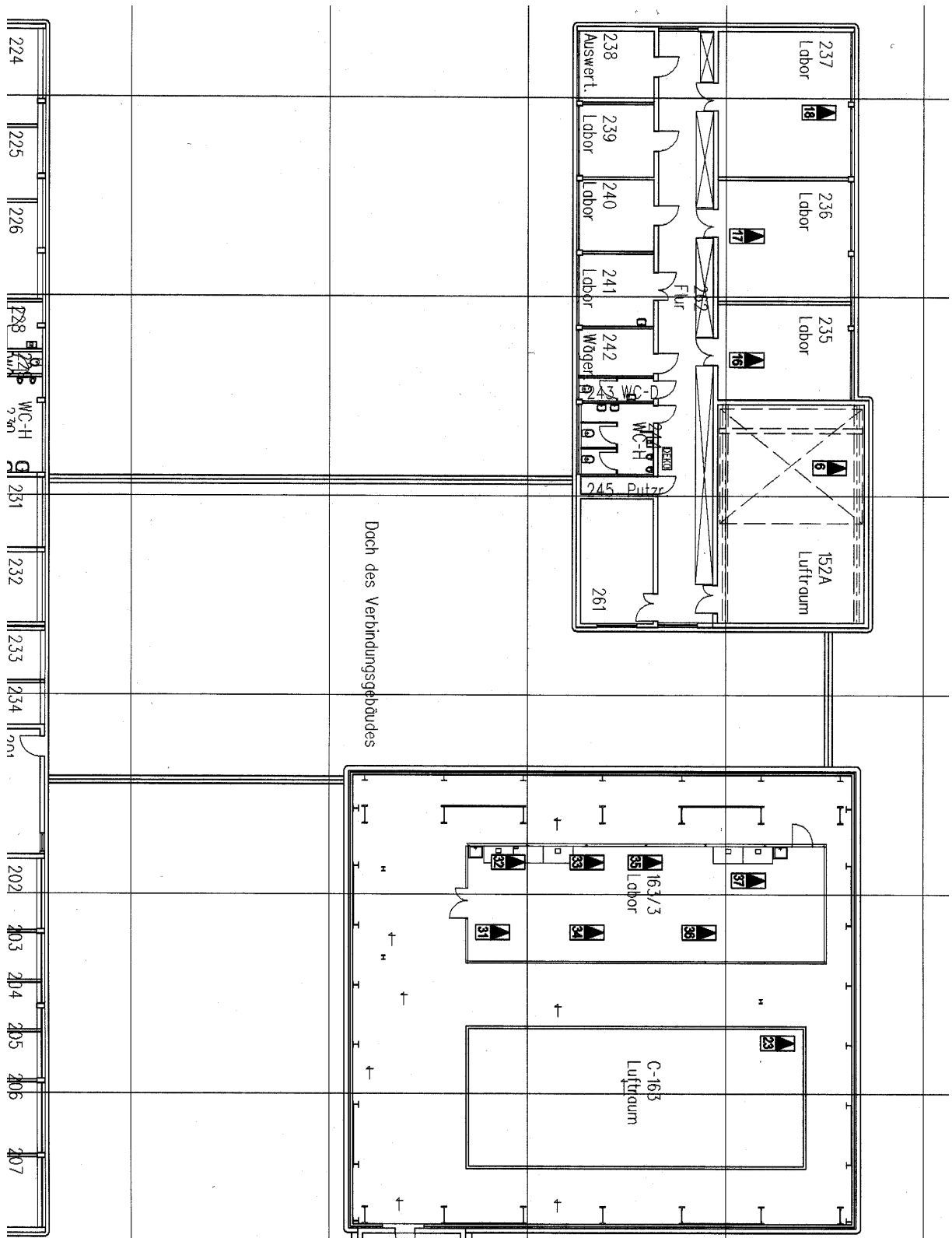


Abb. 8.3.4.8: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 712, 1. OG

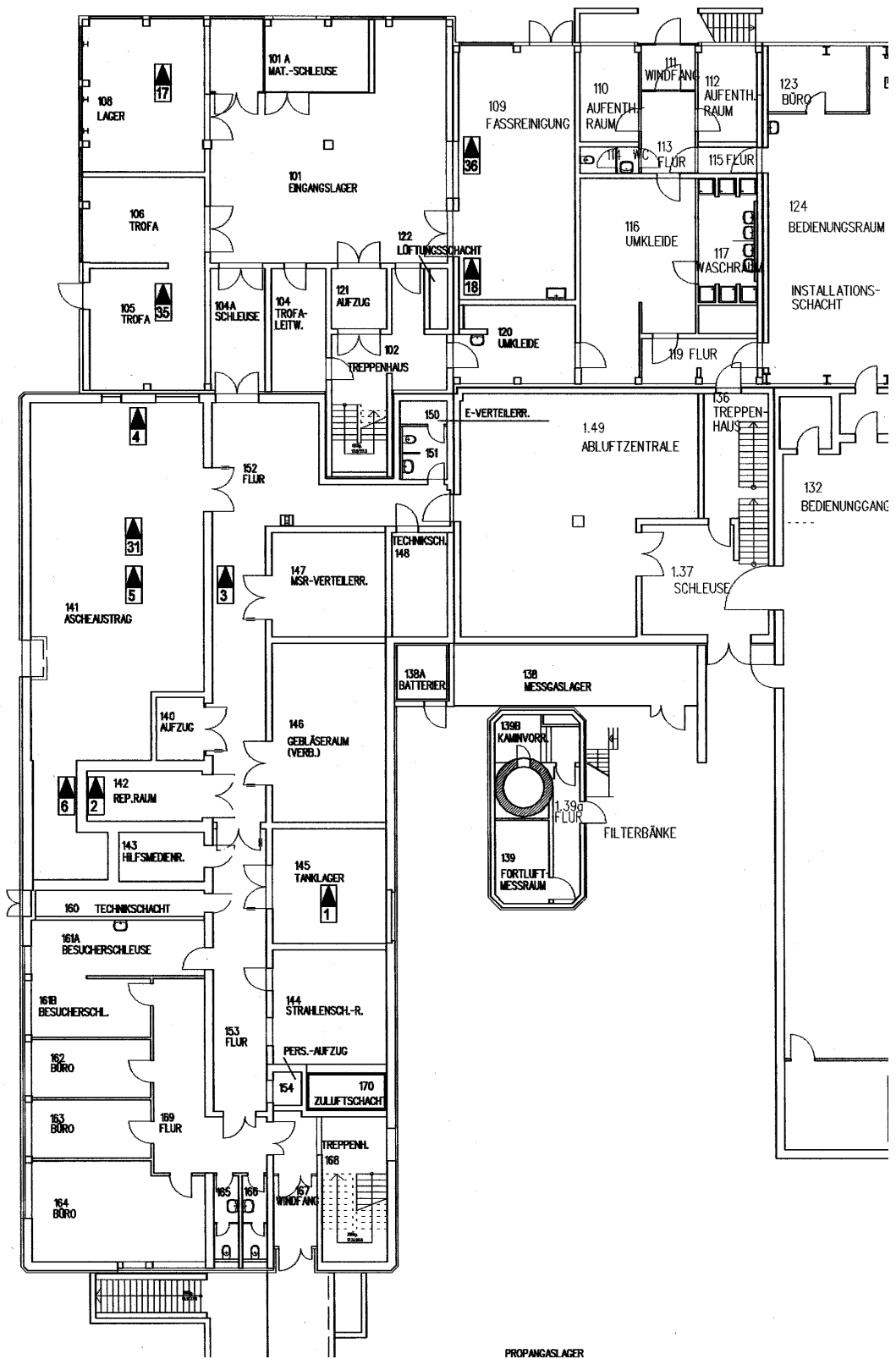


Abb. 8.3.4.10: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 536, EG-Westlicher Teil

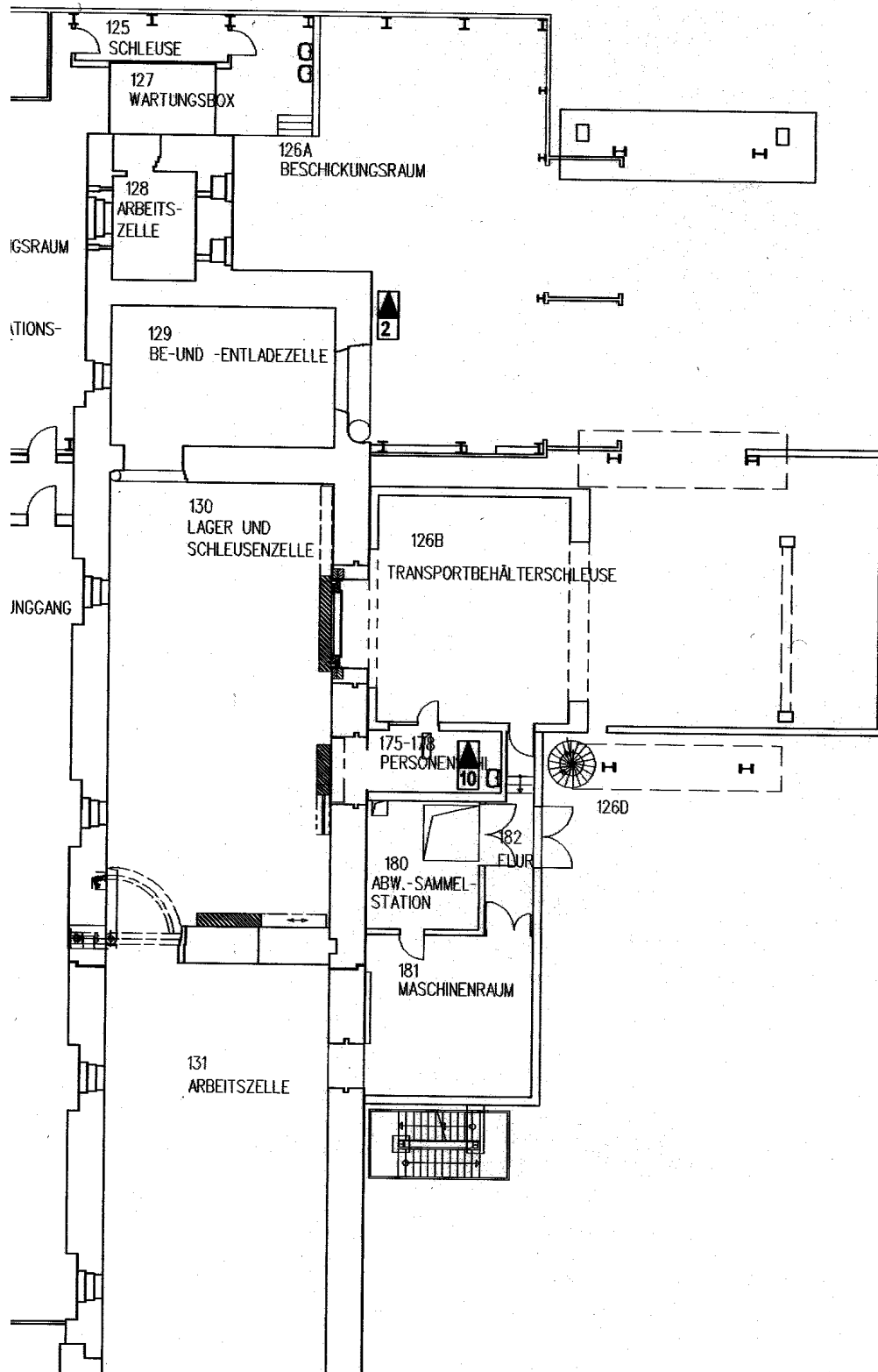


Abb. 8.3.4.11: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 536, EG-Östlicher Teil

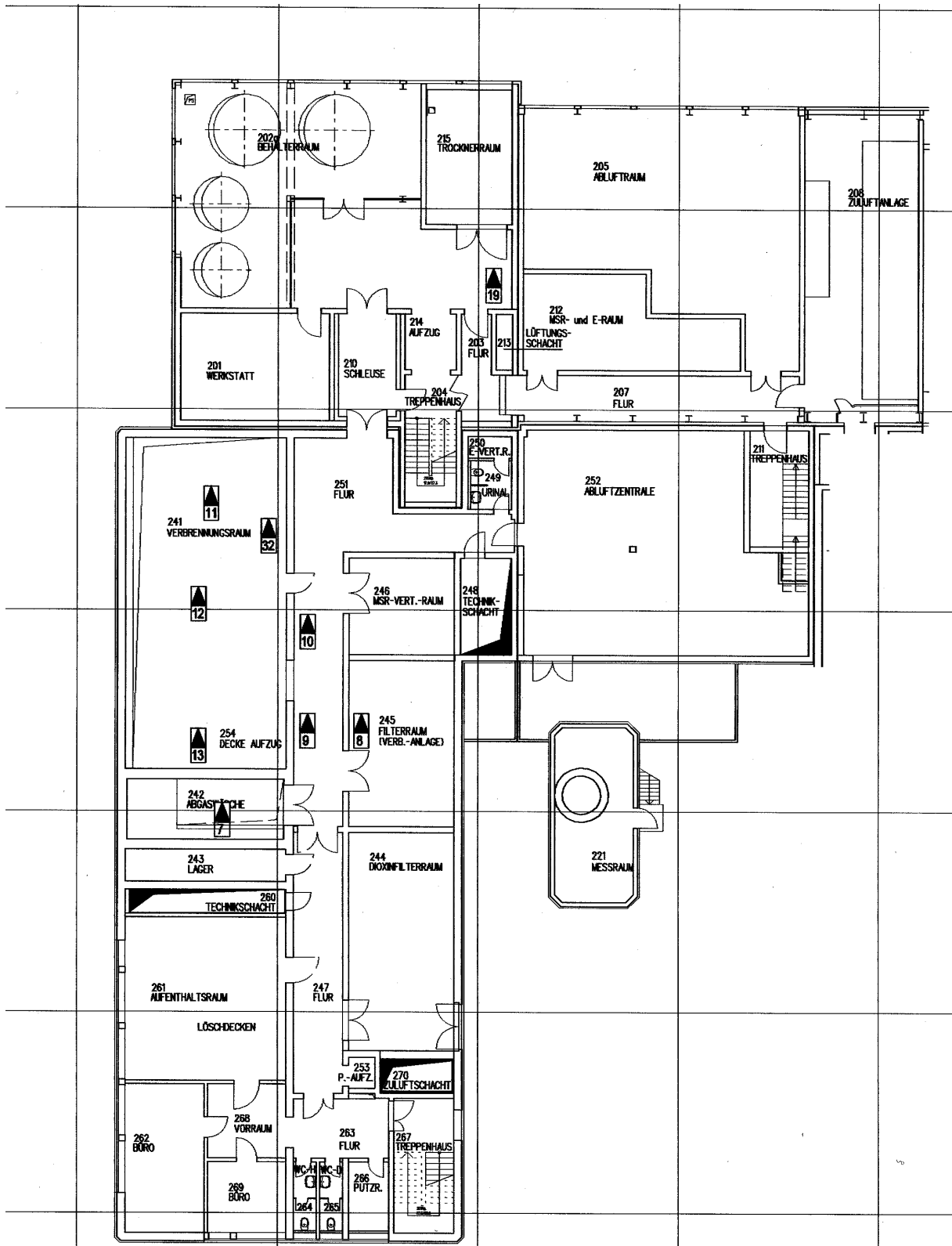


Abb. 8.3.4.12: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 536, 1. OG

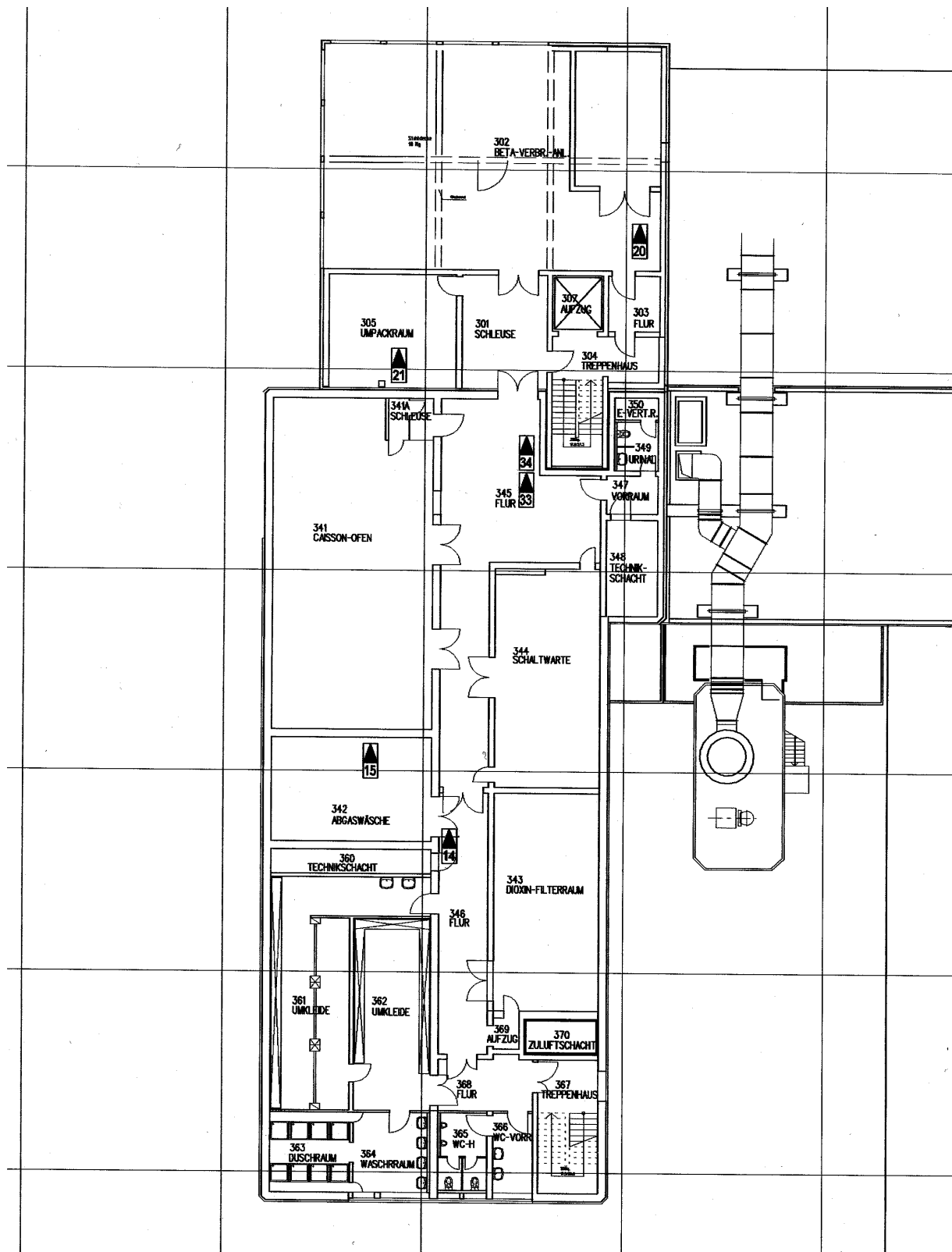


Abb. 8.3.4.13: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 536, 2. OG

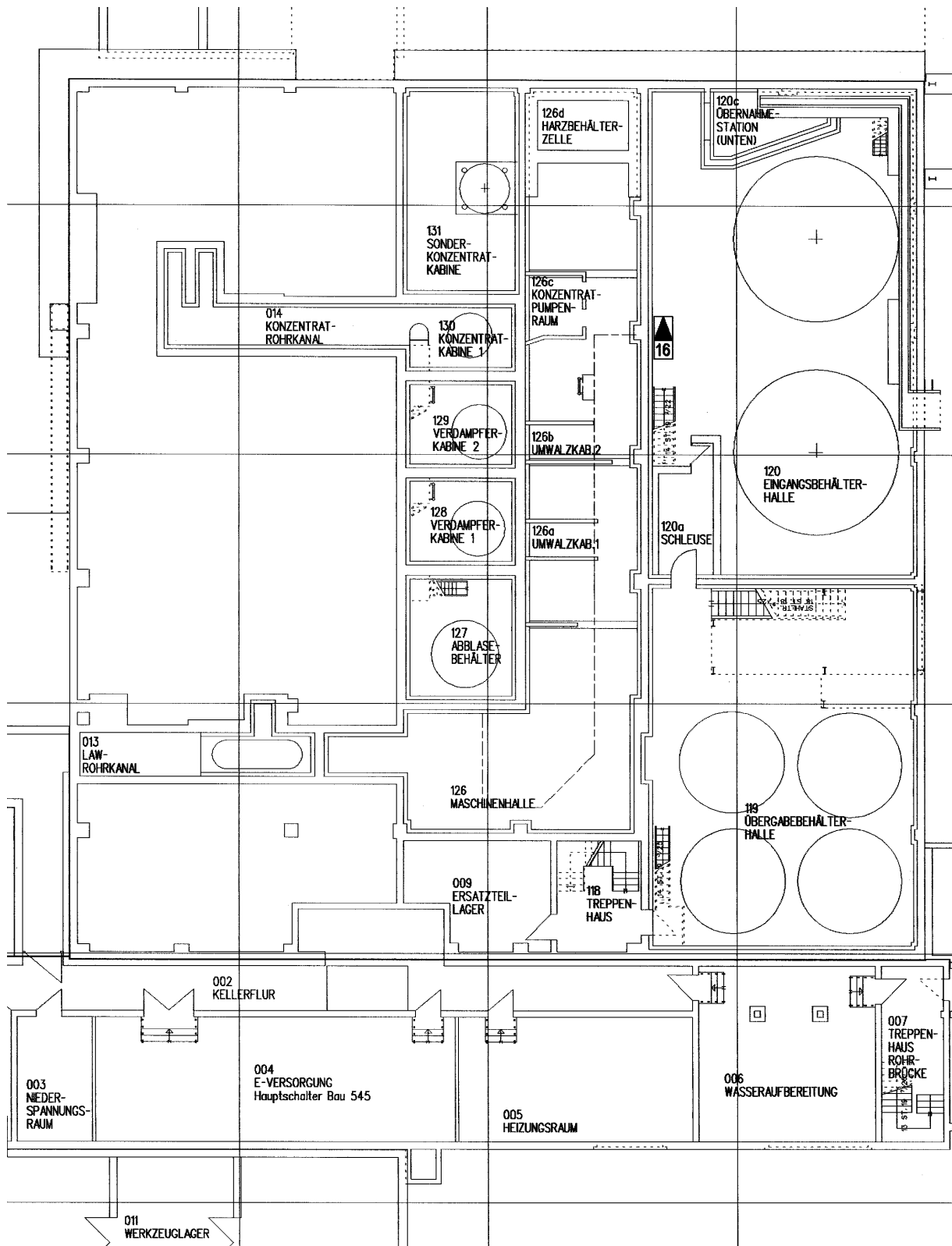


Abb. 8.3.4.14: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 545, KG

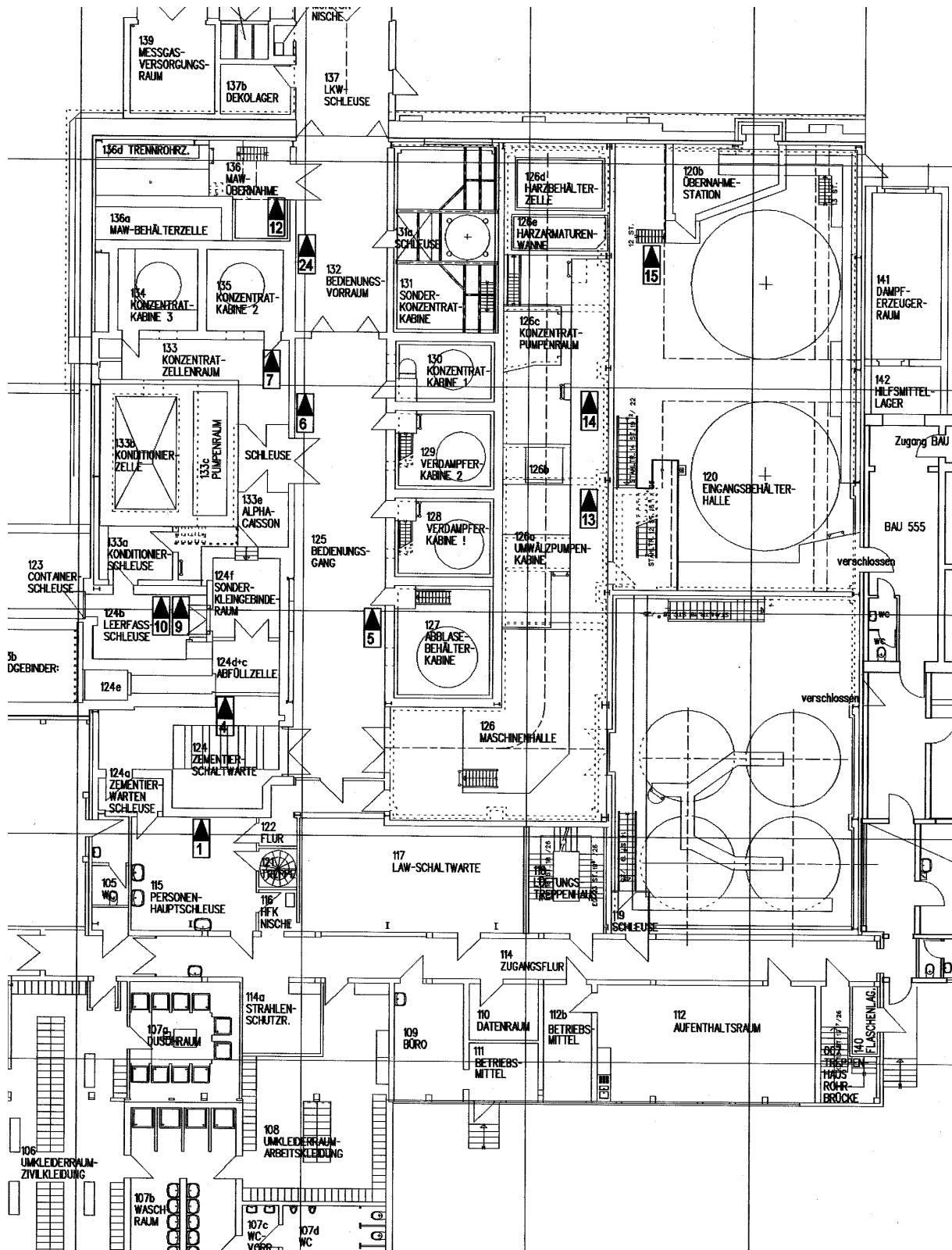


Abb. 8.3.4.15: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 545, EG

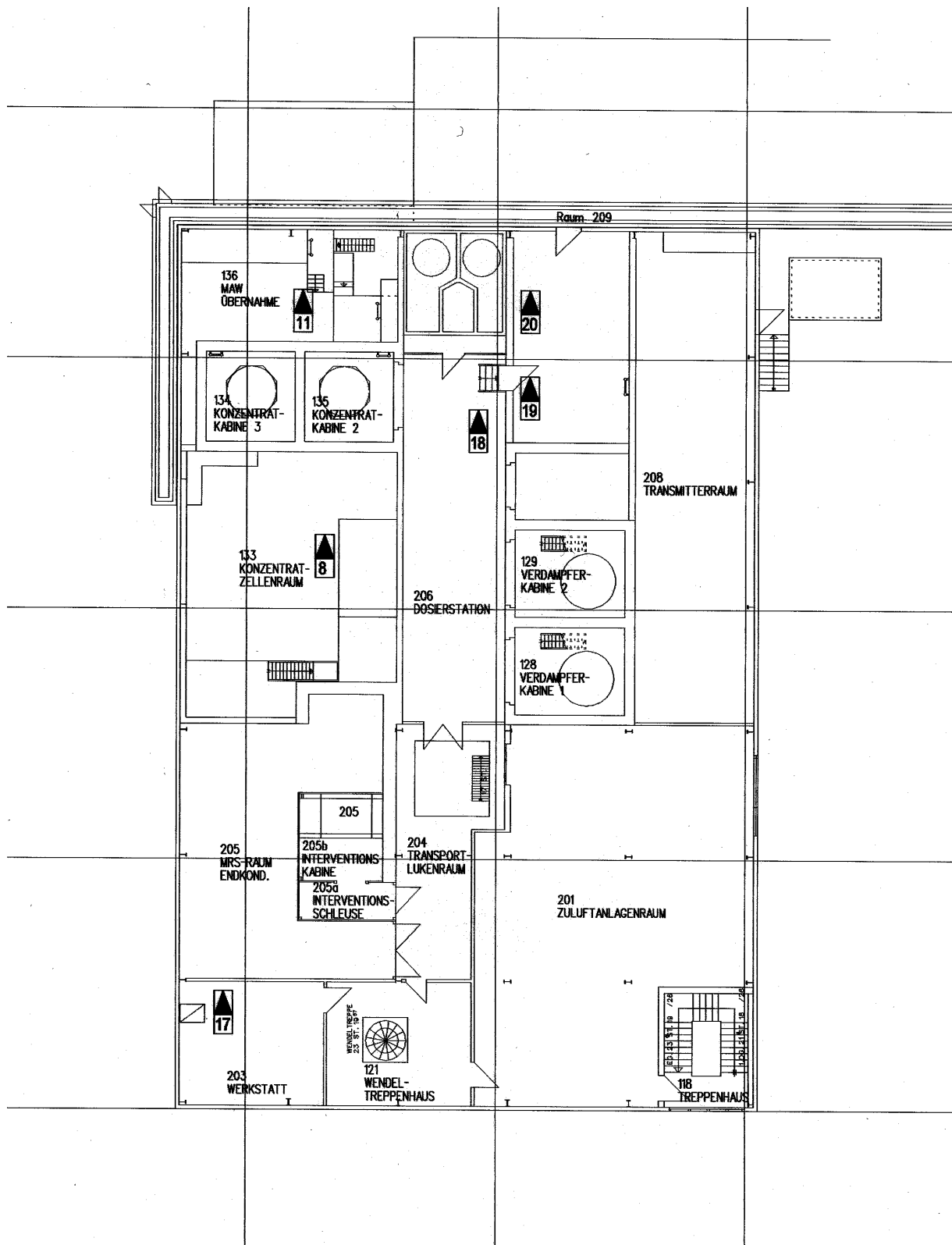


Abb. 8.3.4.16: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 545, 1. OG

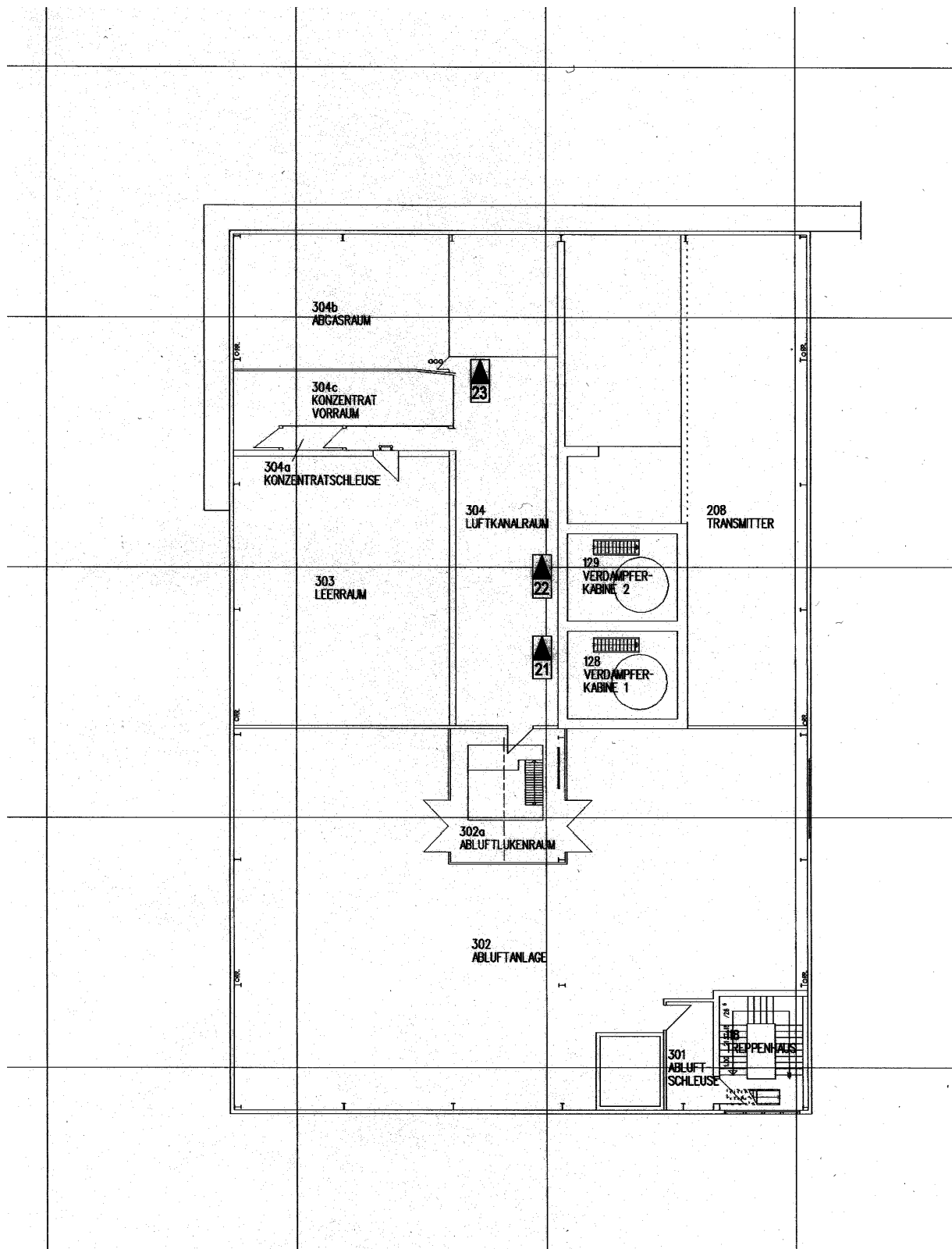


Abb. 8.3.4.17: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 545, 2. OG

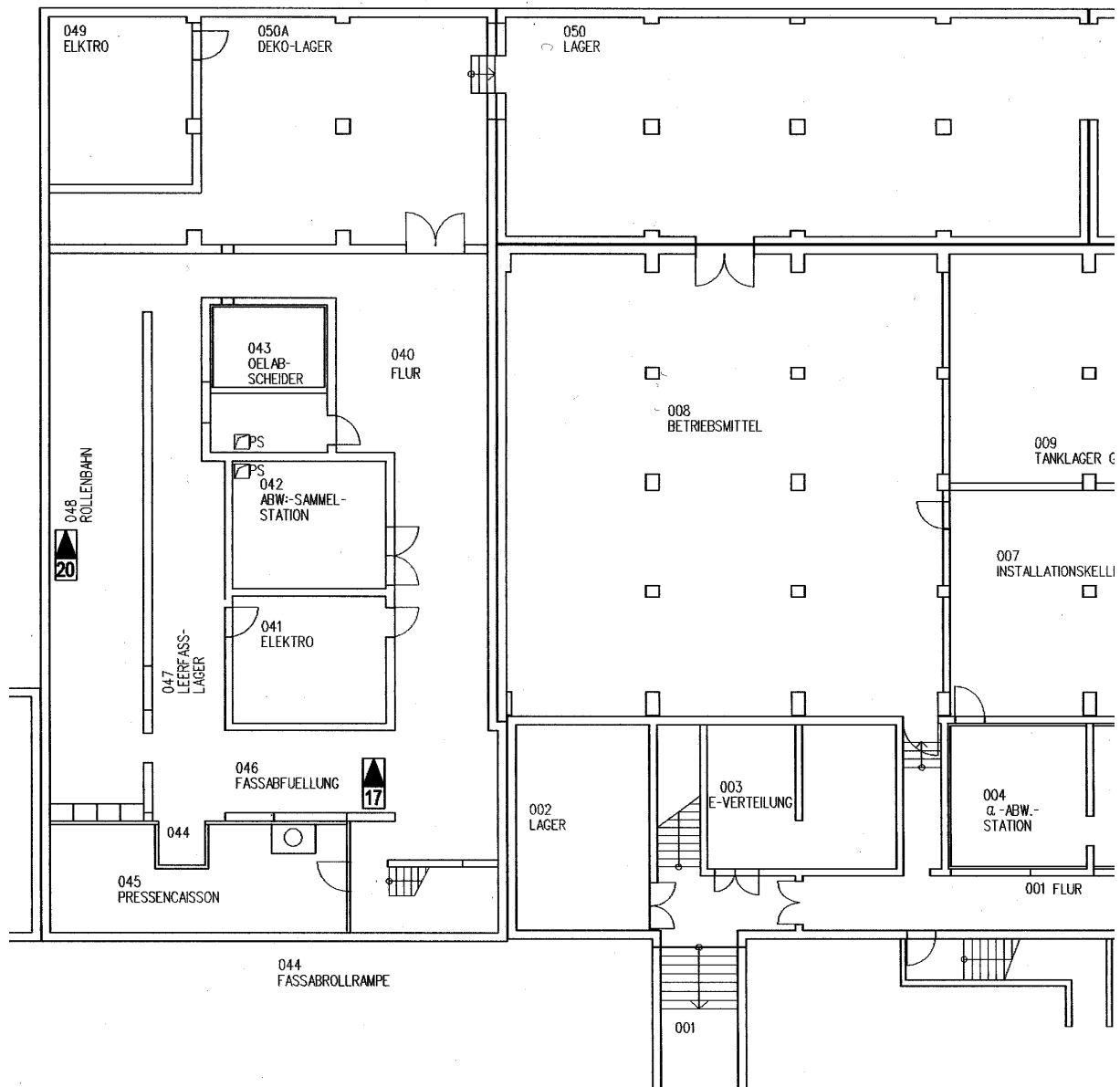


Abb. 8.3.4.18: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 548, KG-Westlicher Teil

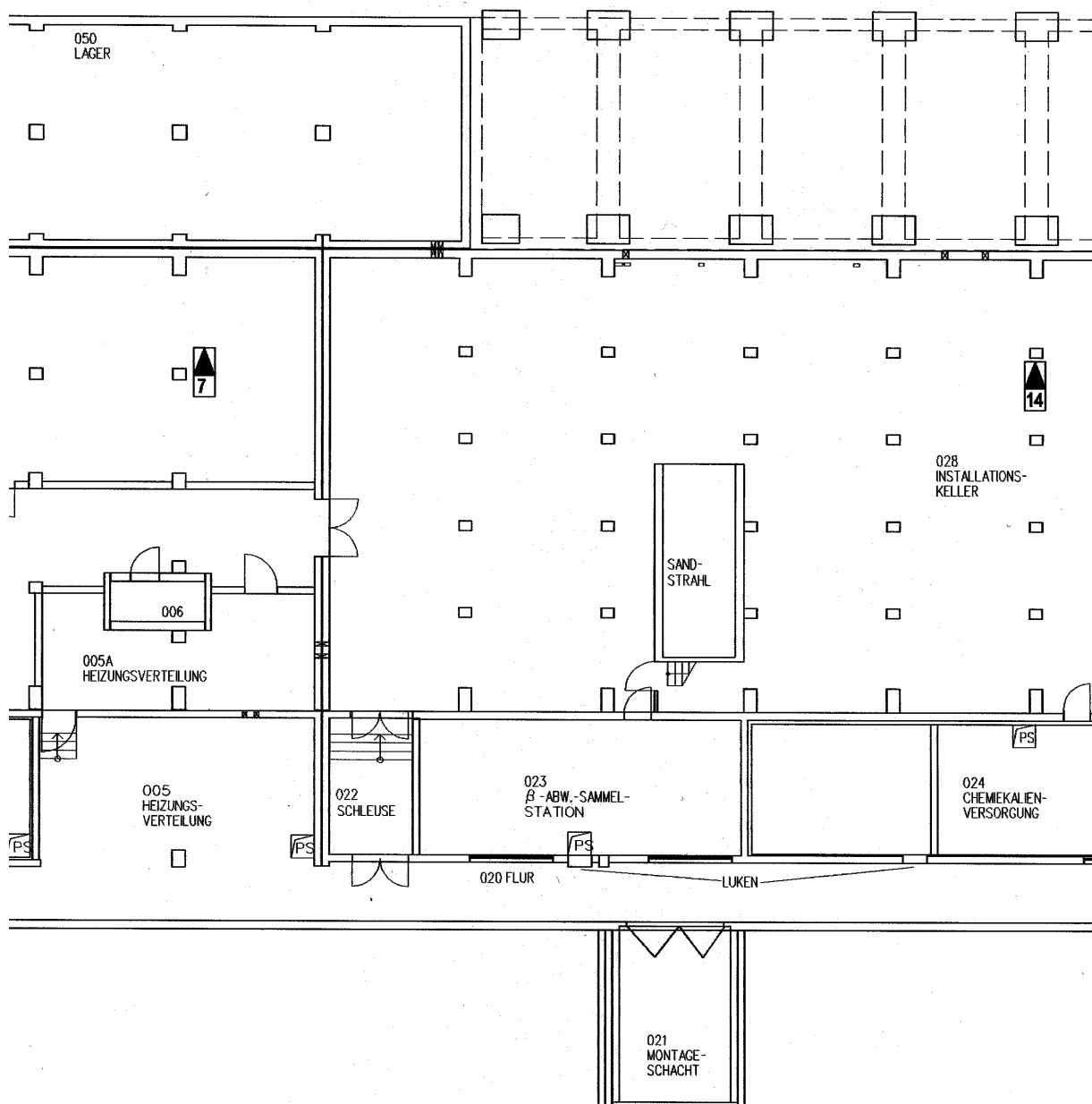


Abb. 8.3.4.19: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 548, KG-Östlicher Teil

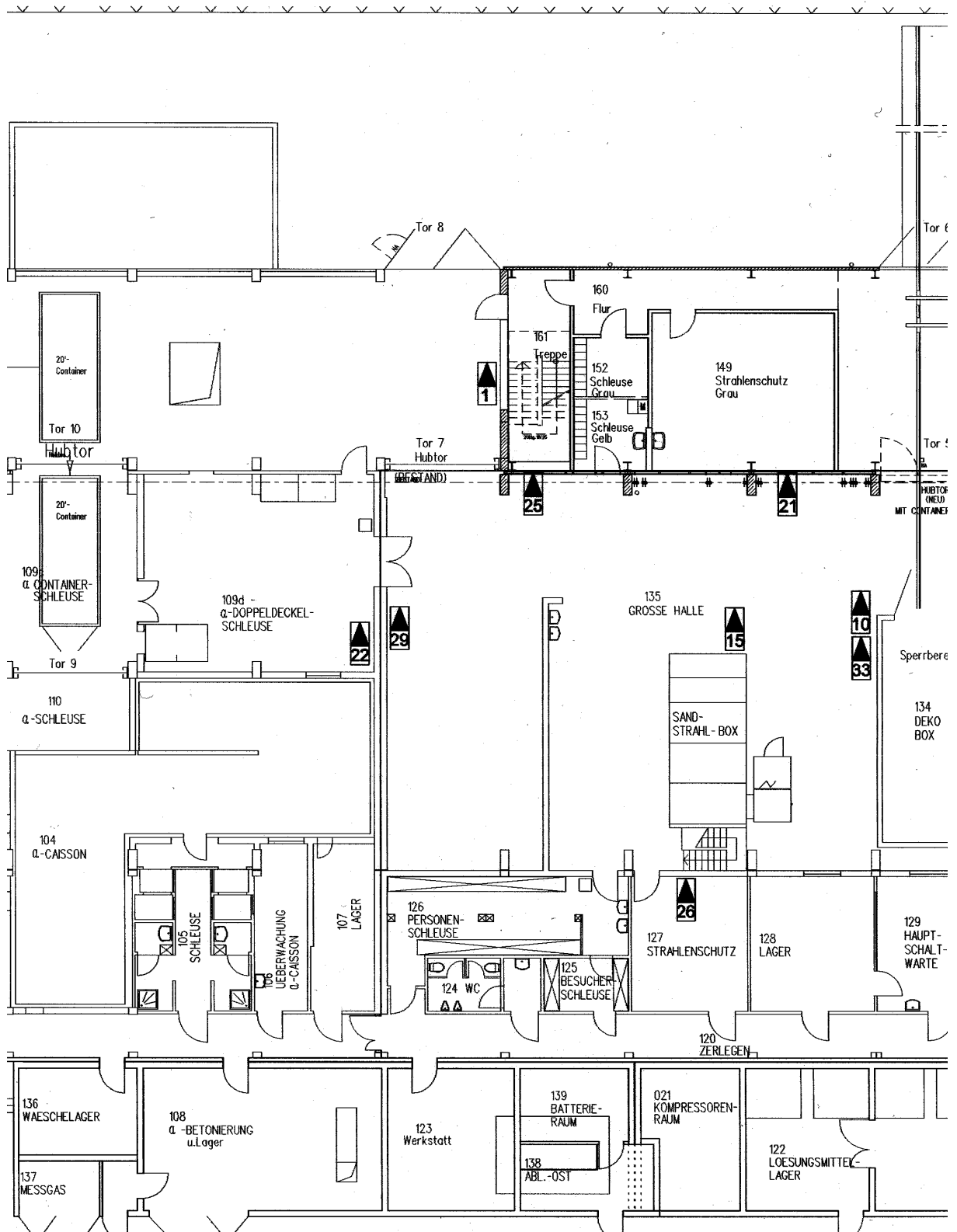


Abb. 8.3.4.21: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 548, EG-Mittlerer Teil

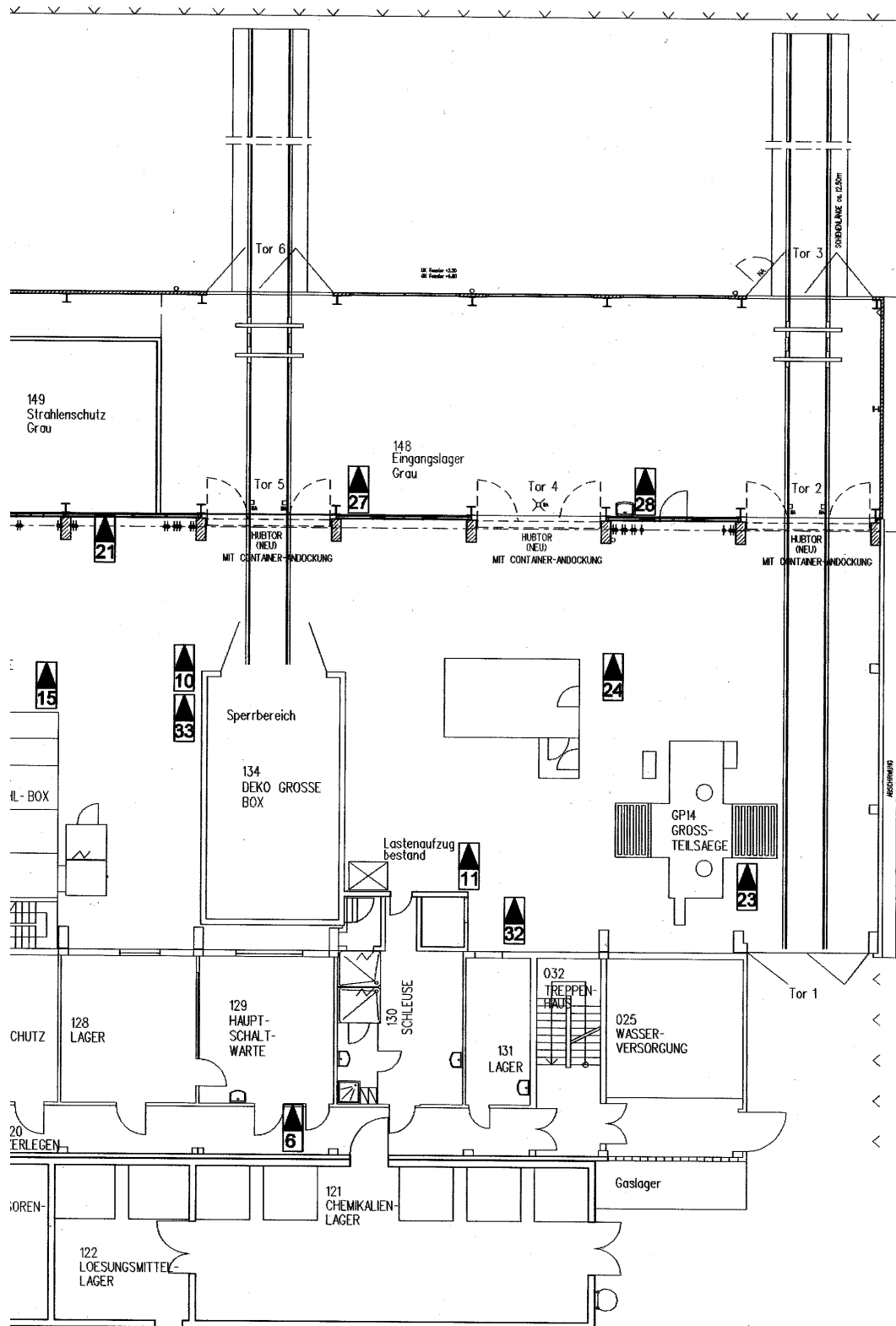


Abb. 8.3.4.22: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 548, EG-Östlicher Teil

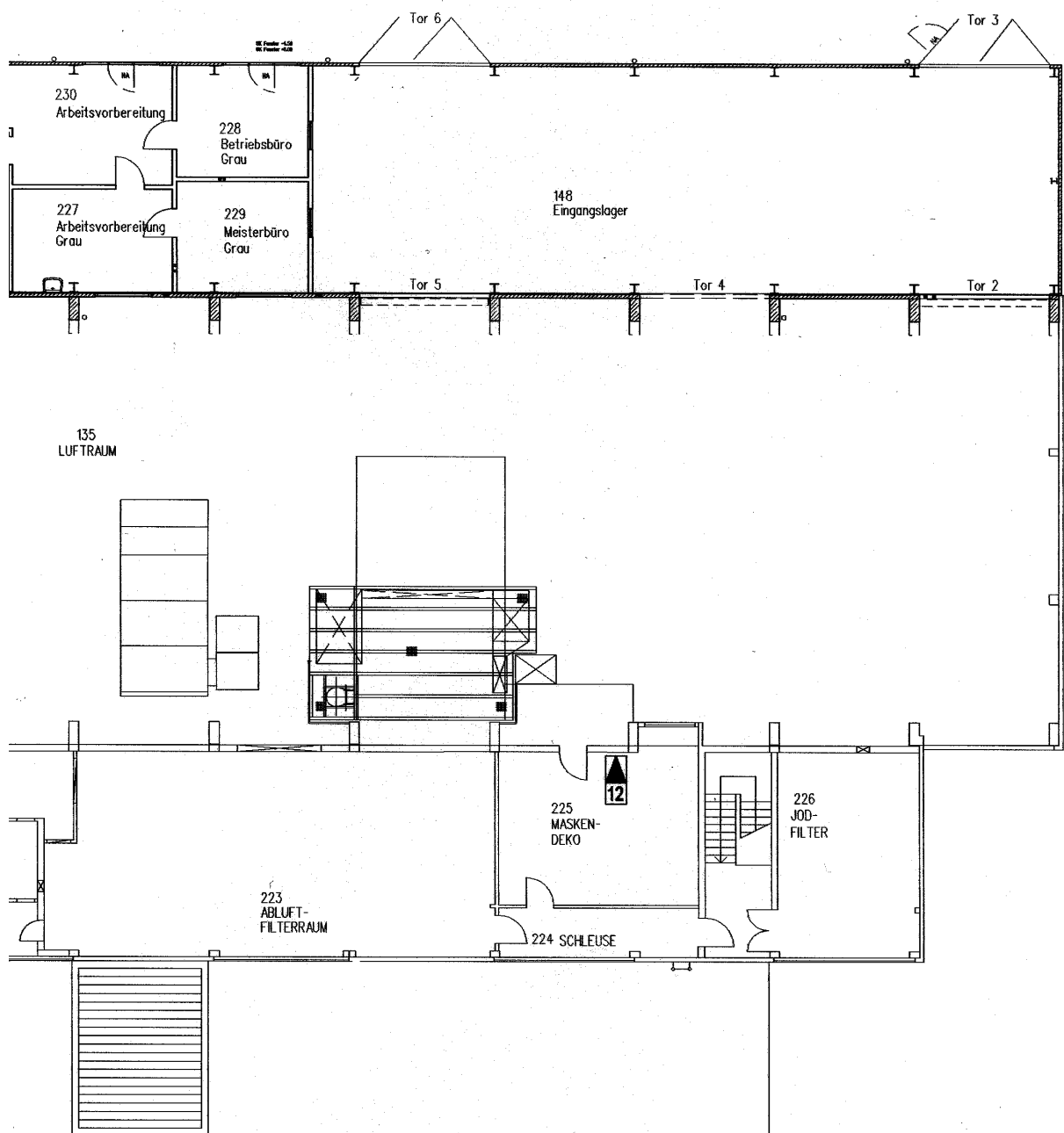


Abb. 8.3.4.23: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 548, 1. OG

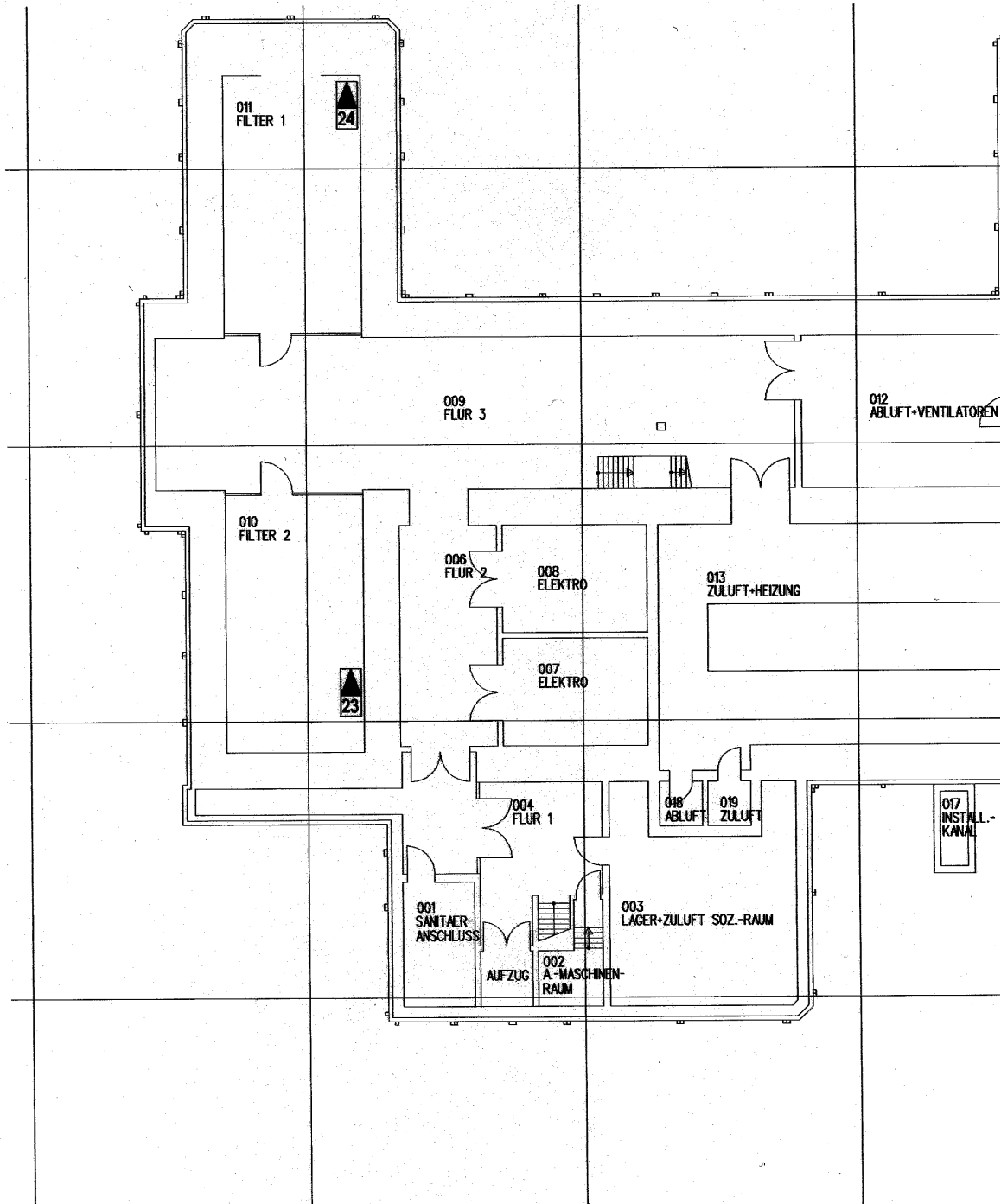


Abb. 8.3.4.24: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 563, KG

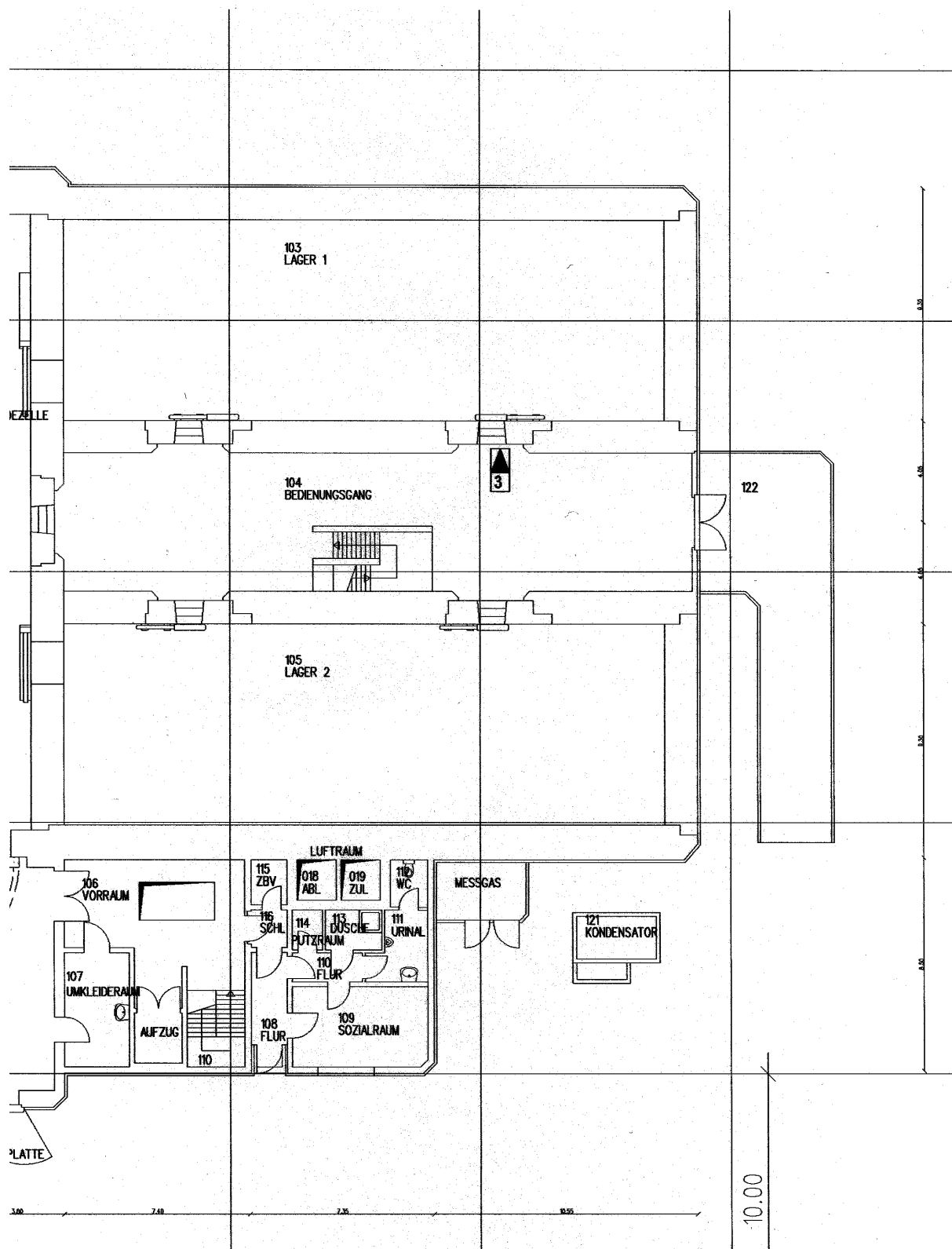


Abb. 8.3.4.25: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 563, EG

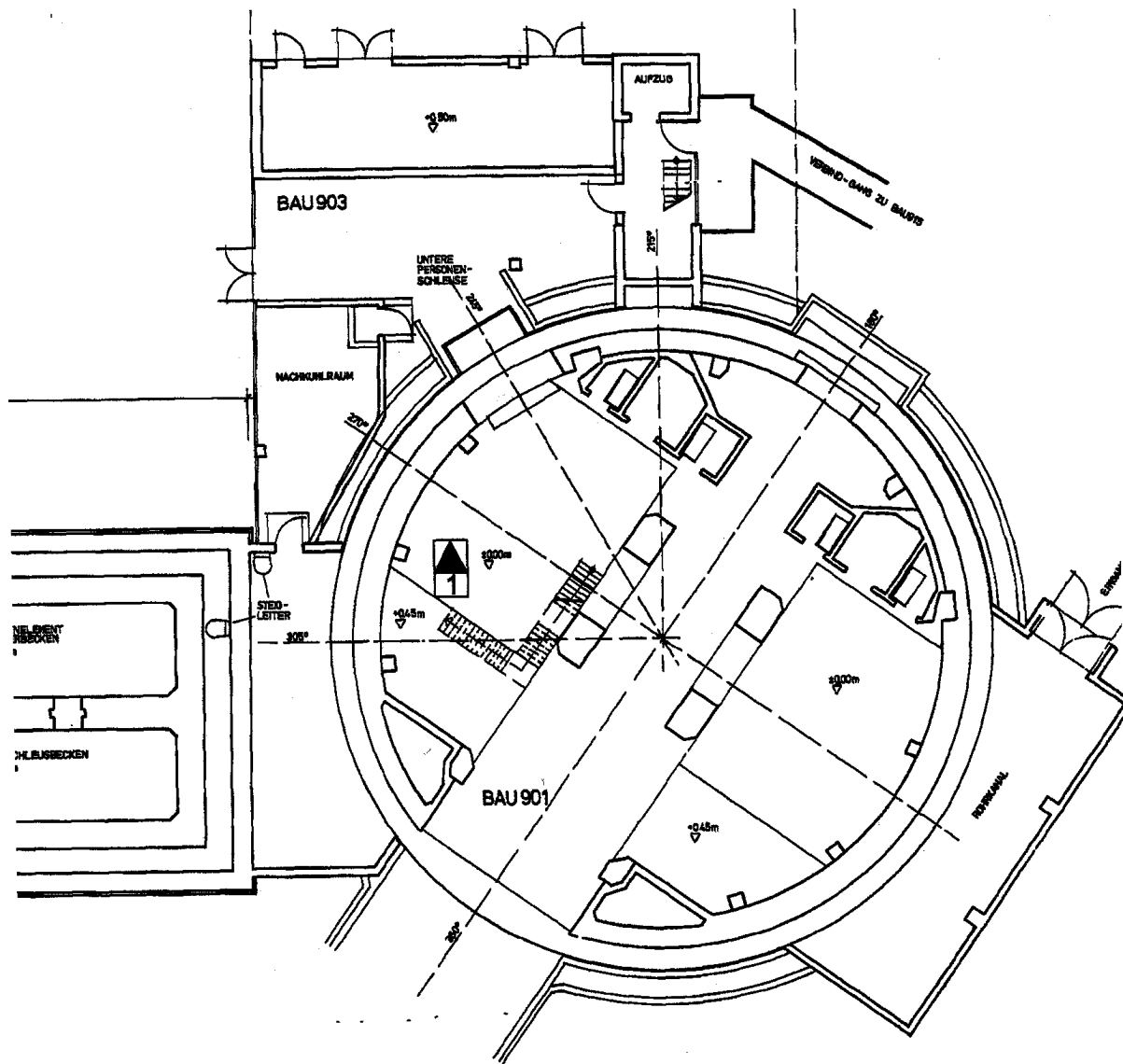


Abb. 8.3.4.26: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 901, Niveau 0 m

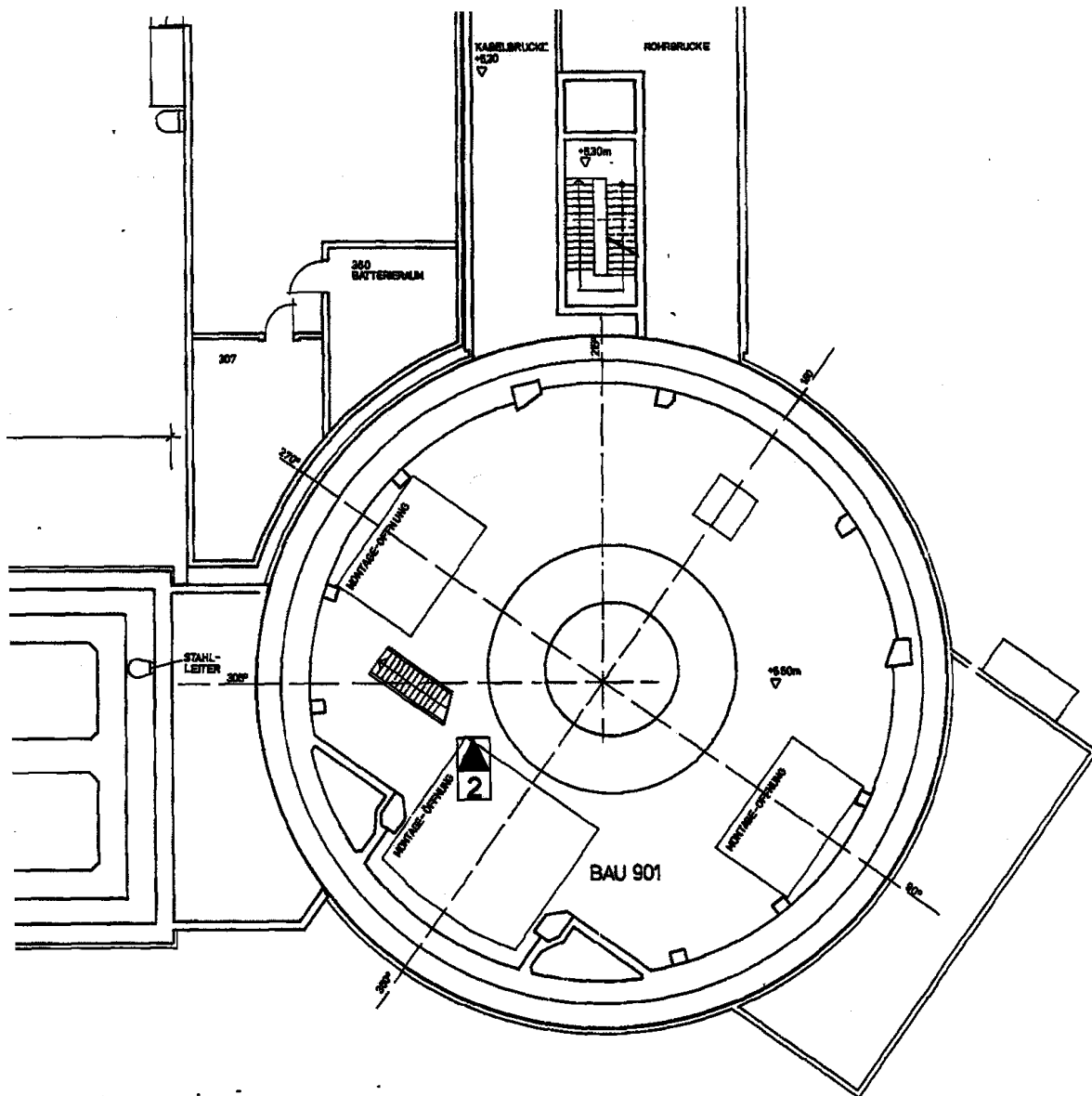


Abb. 8.3.4.27: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 901, Niveau 6,5 m

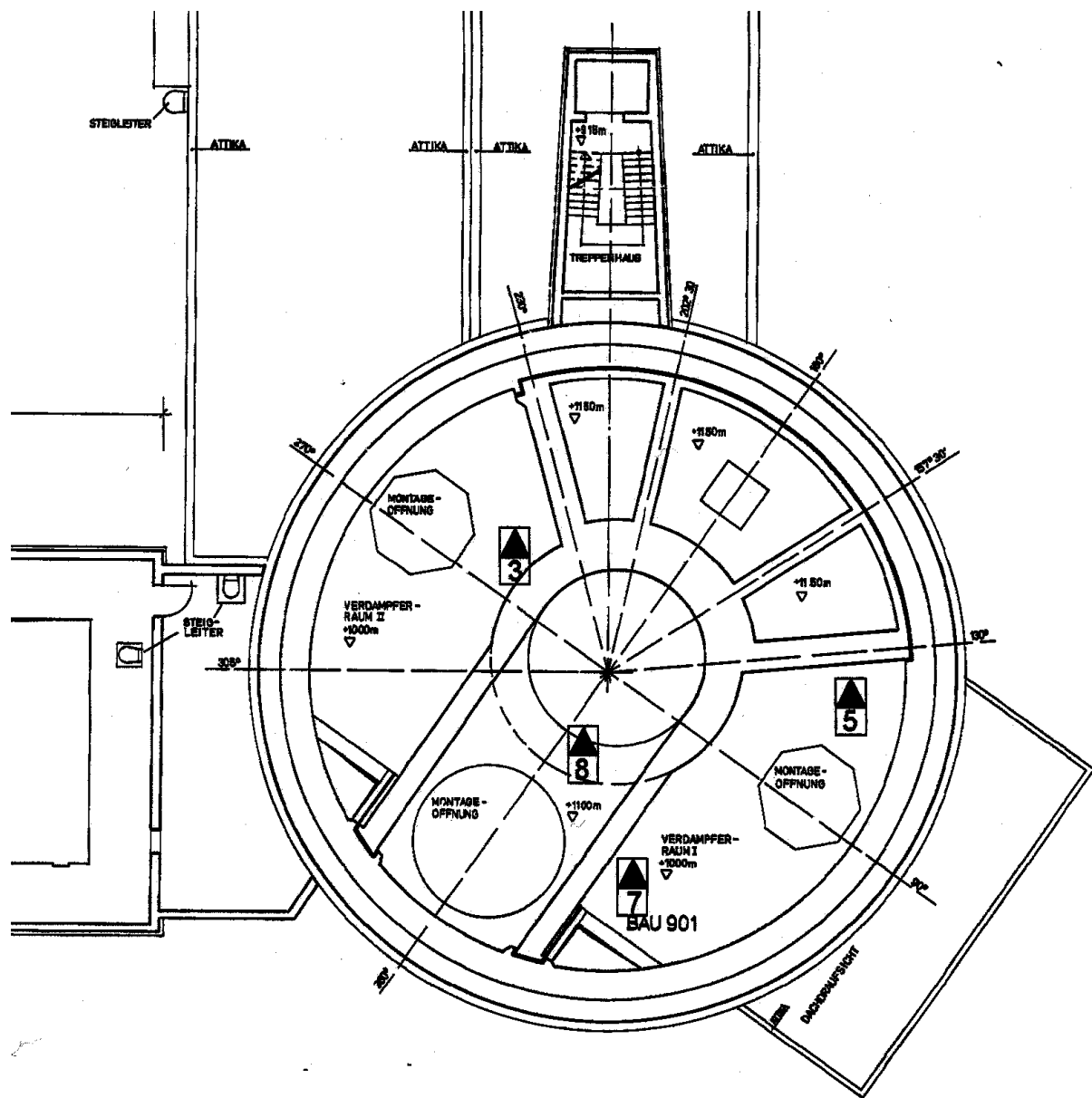


Abb. 8.3.4.28: Positionierung der Aerosolsammler in Geb. 901, Niveau 10 m