

Ermittlung der Strahlenexposition durch Radon-222 und dessen kurzlebige Zerfallsprodukte¹

1 MESSUNG DER STRAHLENEXPOSITION DURCH RADON

1.1 Passive Radonmessgeräte

1.1.1 Anwendung

Passive Radonmessgeräte dienen der Ermittlung der Radon-222-Exposition durch integrierende Messung. Am gebräuchlichsten sind mit Kernspurdetektoren bestückte Diffusionskammern (Exposimeter). Weitere Arten passiver Messgeräte sind Elektrete und Detektoren, die auf der Adsorption von Radon an Aktivkohle beruhen (Aktivkohlesammler).

Die passiven Messgeräte können am Messort ausgelegt (stationäres Messgerät) oder auch von Personen während der Arbeit am Körper getragen werden (personengetragenes Exposimeter).

Die Messdauer beträgt bei Aktivkohlesammlern in der Regel 2 – 3 Tage; bei Geräten mit Elektret- oder Kernspurdetektoren kann die Messdauer mehrere Monate betragen.

Für die Exposimeter existieren unterschiedliche Bauformen, die sich in Bezug auf den Tragekomfort und die Diffusionseigenschaften für Radon unterscheiden und für die verschiedenen Detektormaterialien verwendet werden (Abbildung 1). Generell handelt es sich bei den Detektoren um kleine Kunststoffplättchen unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und unterschiedlicher Empfindlichkeit gegenüber der Alphastrahlung des Radons und seiner Zerfallsprodukte (vergl. hierzu DIN 25706-1). Sie können bei nahezu allen Umgebungsbedingungen eingesetzt werden. Die Nachweisgrenze der Exposimeter liegt unterhalb von $100 \text{ kBq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$, so dass bei einer Messzeit über ein Jahr noch rund 10 Bq/m^3 nachweisbar sind.

1.1.2 Prinzip der Messungen mit Diffusionskammern

Die Messung basiert auf der Diffusion des Radons-222 in ein definiertes Messvolumen (Diffusionskammer). Bei dieser Messmethode gelangt ausschließlich Radon in das Messvolumen, während die Radonzerfallsprodukte die Diffusionsbarriere (z. B. ein Filter) nicht überwinden können und außerhalb der Kammer verbleiben. Die beim Zerfall des Radon-222 und seiner in der Messkammer neu gebildeten kurzlebigen Zerfallsprodukte emittierten Alphateilchen bilden in einem Kernspurdetektor, der sich im Messvolumen befindet, latente Spuren, die durch ein chemisches Ätzverfahren sichtbar gemacht werden können (Abbildung 2). Aus der Teilchenspurnzahl wird die Radonexposition bestimmt. Da für die Auswertung der Detektoren physikalisch-chemische Methoden eingesetzt werden, die hohe Anforderungen an

¹ Die hier dargestellten Messgeräte und Messverfahren beschränken sich auf solche, die kommerziell angeboten werden und für die Überwachungspraxis geeignet sind. Zusätzlich wurden die Grubenradiometer aufgenommen, die, obwohl nicht mehr kommerziell verfügbar, vor allem in den Ländern Sachsen und Thüringen verbreitet sind und in der Überwachung von Arbeitsplätzen nach wie vor eingesetzt werden. Für weitergehende Informationen zur Messtechnik von Radon und Radonzerfallsprodukten wird auf folgende Literatur verwiesen: Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission Band 47, Urban und Fischer, München 2002, ISBN 3-437-21478-0

die Laborpraxis stellen, wird diese Tätigkeit von Mess- oder anderen sachverständigen Stellen durchgeführt.

Die Diffusion von Radon in das Messvolumen ist ein ständiger Prozess und kann bei den verwendeten Messgeräten (Abbildung 1) nicht unterbrochen werden. Deshalb sind Exposimeter, die zur Überwachung der Radonexposition an Arbeitsplätzen eingesetzt werden außerhalb der Arbeitszeit bzw. in Zeiten, in denen keine Messungen durchgeführt werden, an Orten mit geringen Radonkonzentrationen zu lagern. An den Lagerorten sollten die dort zusätzlich auftretenden Messeffekte mit weiteren Messgeräten ermittelt werden, um gegebenenfalls die Expositionen der beruflich strahlenexponierten Personen korrigieren zu können.

1.1.3 Ergebnis

Das Ergebnis liegt nach Auswertung des Detektors vor. Es wird die Radonexposition am Messort oder die des Messgeräteträgers in der Einheit $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ oder einem Vielfachen davon angegeben.

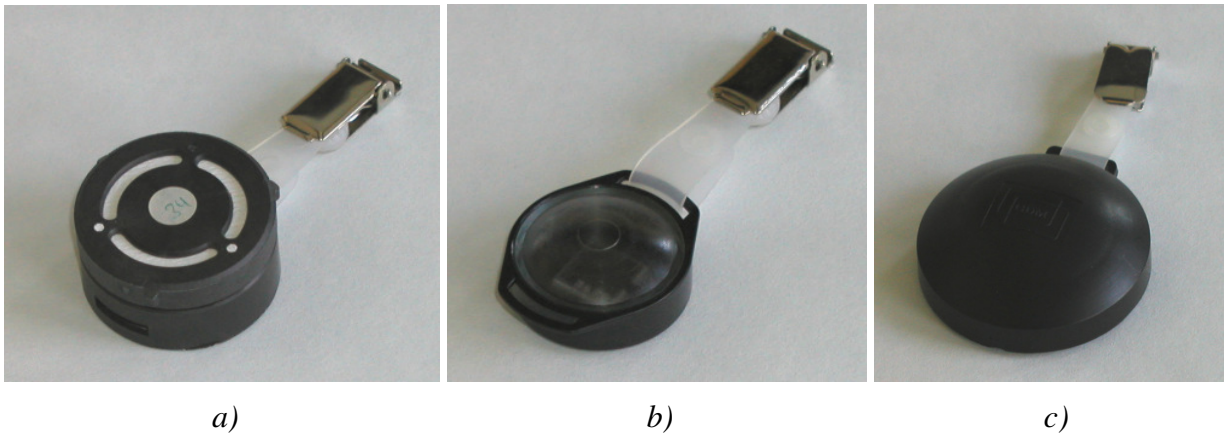


Abbildung 1: Zur Zeit in der Bundesrepublik angewendete passive personengetragene Radonmessgeräte

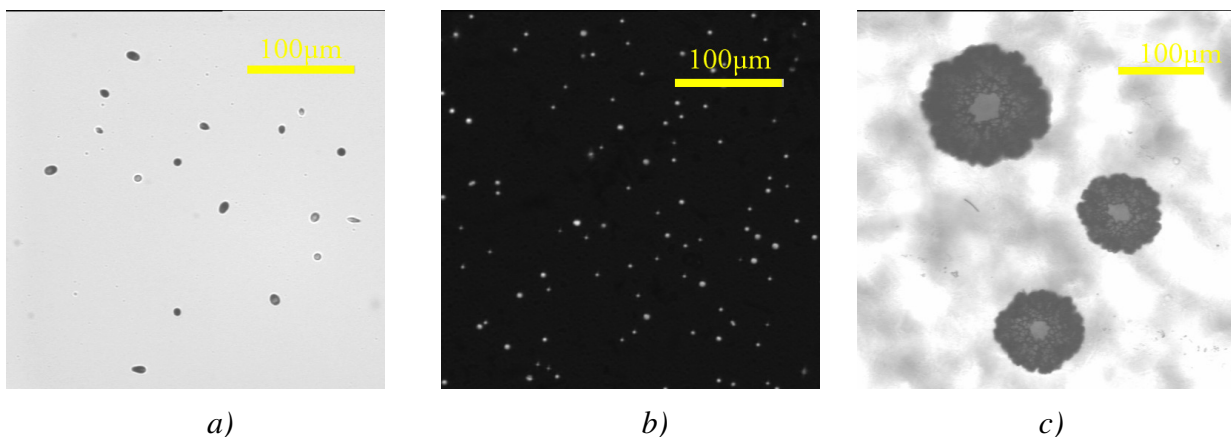


Abbildung 2: Ätzzspuren von Alphateilchen auf Kernspurdetektoren, verschiedener Materialien: CR39 (a), Kodak LR115 (b) und MAKROFOL (c)

1.1.4 Ursachen für Messabweichungen

Messabweichungen können durch klimatische Einflüsse hervorgerufen werden. Dies gilt insbesondere für die Verwendung von Kernspurdetektoren unter extremen

Umgebungsbedingungen, wie z. B. bei Messungen in Bergwerken mit großen Variationen der Temperatur, Feuchtigkeit, Ventilation und des Luftdruckes .

Messabweichungen können auch durch Radon-220 auftreten, sofern entsprechend hohe Expositionen an den Arbeitsplätzen auftreten und die Messgeräte dafür eine nicht zu vernachlässigende Nachweisempfindlichkeit besitzen.

1.1.5 Qualitätssicherung

Stellen, die diese rechtlich relevanten Messungen durchführen, müssen ein für die Auswertungsarbeiten angemessenes Qualitätsmanagementsystem unterhalten und an den jährlich vom BfS durchgeführten Vergleichsprüfungen teilnehmen.

1.2 Direkt ablesbare Geräte (Monitore)

1.2.1 Anwendung

Radonmonitore sind Messgeräte, die den Momentanwert der Radon-Aktivitätskonzentration messen. Es sind Messgeräte verfügbar, die batteriebetrieben am Körper der zu überwachenden Person getragen werden können, aber auch solche, die auf Grund ihrer Größe und ihres Gewichtes insbesondere für stationäre Messungen eingesetzt werden.

Monitore sind in den meisten Fällen vor extremen klimatischen Einflüssen, wie Temperatur und Nässe, geschützt aufzustellen. Mit diesen Geräten kann die Radonkonzentration über variable Messperioden (einige 10 Minuten bis Stunden) ermittelt und durch quasikontinuierliche Messungen der Zeitverlauf der Radonkonzentration aufgezeichnet werden. Die Dauer einer Langzeitmessung wird durch technische Parameter des Messgerätes, z. B. die Leistungsaufnahme bei Batteriebetrieb, oder die Größe des Messwertspeichers, begrenzt.

Die Nachweisgrenze hängt in entscheidendem Maße vom Gerätetyp und der Dauer der Messperiode ab. Eine Nachweisgrenze von $10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ist mit ausgewählten handelsüblichen Messgeräten erreichbar. Im Einzelnen ist die Nachweisgrenze der Messgerätedokumentation zu entnehmen.

1.2.2 Messprinzip

Radon gelangt durch Diffusion oder mittels aktiver Durchspülung in das Messvolumen. Für die Messung werden die infolge des radioaktiven Zerfalls von Radon und seinen Zerfallsprodukten in einer Impuls-Ionisationskammer oder einem Halbleiterdetektor erzeugten elektronischen Impulse gezählt.

1.2.3 Ergebnis

Die Radon-Aktivitätskonzentration wird in der Einheit $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ oder einem Vielfachen davon angegeben. Radonmonitore für die Ermittlung der beruflichen Strahlenexposition von Beschäftigten müssen mit einem Messwertspeicher ausgestattet sein, in dem die Messwerte und die Messzeitpunkte aufgezeichnet werden. Die Radonexposition für eine zu überwachende Person ist das Produkt aus dem Mittelwert der Radon-Aktivitätskonzentration, die während des Aufenthaltes der Person an dem überwachten Arbeitsplatz ermittelt wurde, und der Aufenthaltszeit dieser Person an diesem Arbeitsplatz. Arbeitet die Person an verschiedenen Arbeitsplätzen, sind die an jedem dieser Arbeitsplätze ermittelten Expositionen zu summieren.

1.2.4 Ursachen für Messabweichungen

Durch extreme klimatische Bedingungen, wie z. B. Feuchtigkeit und Temperatur, als auch durch Staub und Schmutz können Messabweichungen auftreten.

Messabweichungen können auch durch Radon-220 auftreten, sofern entsprechend hohe Expositionen an den Arbeitsplätzen auftreten und die Messgeräte dafür eine nicht zu vernachlässigende Nachweisempfindlichkeit besitzen.

1.2.5 Qualitätssicherung

Radonmonitore sind mindestens im Abstand von 2 Jahren durch ein akkreditiertes Kalibrierlabor kalibrieren zu lassen. Nach einem Wechsel des Detektors oder nach Vorkommnissen, die zu einer Beeinflussung der Kalibrierdaten führen können, ist vor einem erneuten Einsatz eine Nachkalibrierung des Radonmonitors erforderlich.

2 MESSUNG DER POTENZIELLEN ALPHAENERGIE-KONZENTRATION ODER - EXPOSITION

2.1 Grubenradiometer

2.1.1 Anwendung

Grubenradiometer wurden für den Strahlenschutz im Uranerzbergbau eingesetzt und werden auch heute noch zur Gewährleistung des Strahlenschutzes bei der Sanierung der Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaues verwendet. Diese Messgeräte werden auch zur Ermittlung der Strahlenexpositionen von Beschäftigten in Wasserwerken, Schauhöhlen, Besucherbergwerken und anderen Arbeitsplätzen eingesetzt.

Mit den Grubenradiometern wird die potenzielle Alphaenergie-Konzentration der kurzlebigen Radon-222-Zerfallsprodukte oder eine andere auf diese Messgröße rückführbare Größe durch diskontinuierliche Messung bestimmt. Dies bedeutet, dass das Ansaugen und Sammeln der Radionuklide auf dem Filter und die Auswertung des Filters zeitlich getrennt stattfinden. Eine Messung dauert ca. 15 min. Die Geräte sind robust aufgebaut und einfach zu handhaben, so dass auch unter extremen Umgebungsbedingungen die zuverlässige Funktion gewährleistet ist und Messungen durchgeführt werden können.

2.1.2 Messprinzip

Während einer Probeentnahme wird die zu untersuchende Luft über ein Schwebstofffilter geleitet, auf dem sich die in der Luft enthaltenen Schwebstoffe abscheiden. Dadurch reichern sich auch die kurzlebigen Radon-222-Zerfallsprodukte auf dem Filter an. Nach Beendigung der Probeentnahme wird das Filter einer Auswerteeinheit zugeführt, die die infolge des radioaktiven Zerfalls entstehenden elektrischen Impulse registriert.

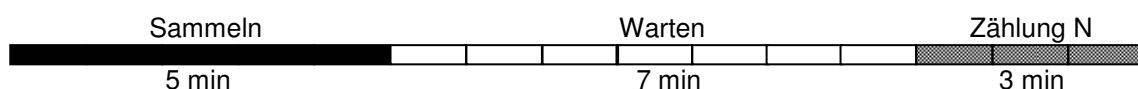


Abbildung 3: Zeitschema des Messzyklus nach MARKOV

Ein diskontinuierliches Messverfahren, das eine weite Verbreitung vor allem in Messgeräten für die Überwachung der Strahlenexposition bei Bergarbeitern gefunden hat und auch heute noch vielfach angewendet wird, ist das Verfahren nach MARKOV. Es gestattet die Ermittlung der potenziellen Alphaenergie-Konzentration kurzlebiger Radon-222-Zerfallsprodukte durch ein Impulszählverfahren mit nur einem Zählintervall. Der Messzyklus ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Nach einer Probeentnahmezeit von 5 Minuten wird der Ansaugvorgang unterbrochen. Im Anschluss an eine Pause von 7 Minuten wird die Gesamt-Alphaimpulsanzahl N des Filters während einer Zeitdauer von 3 Minuten gemessen.

2.1.3 Ergebnis

Für die Messung nach MARKOV wird die potenzielle Alphaenergie-Konzentration c_p in $\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ nach der Gleichung

$$c_p = \varphi_M \cdot \frac{N}{\varepsilon \cdot \eta \cdot \dot{V}} \quad (1)$$

berechnet. In Gleichung 1 bedeuten N die Anzahl der Impulse im Zählintervall (siehe Abbildung 3), ε die Nachweiseffektivität des Detektors, η der Abscheidegrad des Schwebstofffilters und \dot{V} der Volumenstrom in $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$. Der Parameter φ_M ist ein empirisch ermittelter Faktor nach MARKOV, der den Wert $\varphi_M = 6,4 \cdot 10^{-3} \mu\text{J}\cdot\text{l}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ besitzt. Die Nachweiseffektivität des Detektors und der Abscheidegrad des Schwebstofffilters können durch eine Kalibrierung des Messgerätes bestimmt werden.

Die potenzielle Alphaenergie-Exposition eines Beschäftigten ist das Produkt des Mittelwertes der zu verschiedenen Zeitpunkten an dem überwachten Arbeitsplatz gemessenen potenziellen Alphaenergie-Konzentrationen und der Aufenthaltszeit des Beschäftigten an diesem Arbeitsplatz. Arbeitet die Person an verschiedenen Arbeitsplätzen, sind die an jedem dieser Arbeitsplätze ermittelten Expositionen zu summieren.

Von besonderer Bedeutung ist die Anwendung dieses Messverfahrens für die direkte Bestimmung des Betriebspunktwertes. Der Betriebspunktwert drückt aus, um welchen Faktor die gemessene Konzentration den aus dem Expositionsgrenzwert für das Kalenderjahr abgeleiteten Jahresmittelwert der Konzentration über- bzw. unterschreitet. Zur Ableitung des Jahresmittelwertes der Konzentration wird von einer jährlichen Arbeitszeit von 2000 Stunden ausgegangen. Bei Anwendung des Messverfahrens nach MARKOV kann der Betriebspunktwert W mit der Gleichung

$$W = \frac{N}{f_B \cdot \varepsilon \cdot \eta \cdot \dot{V}} \quad (2)$$

berechnet werden. Neben den bereits in Gleichung 1 definierten Größen enthält Gleichung 2 den empirischen Faktor f_B mit dem Wert $f_B = 1000 \text{ min}\cdot\text{l}^{-1}$. Der Mittelwert der Betriebspunktwerte, die zu verschiedenen Zeitpunkten an dem zu überwachenden Arbeitsplatz gemessen wurden, multipliziert mit der Aufenthaltszeit des Beschäftigten ergibt die Belastungstunden dieser Person. Arbeitet die Person an verschiedenen Arbeitsplätzen, sind die an jedem dieser Arbeitsplätze ermittelten Belastungstunden zu summieren.

2.1.4 Ursachen für Messabweichungen

Messabweichungen können durch eine defekte oder fehlerhafte Luftfördereinrichtung entstehen.

In der Regel werden die Messgeräte mit Prüfquellen ausgestattet, mit denen vor dem Einsatz die Funktionsfähigkeit des Gerätes kontrolliert werden kann. Durch diese Kontrollen können viele Fehler erkannt bzw. ausgeschlossen werden.

2.1.5 Qualitätssicherung

Das Messgerät ist mindestens im Abstand von 2 Jahren bei einem akkreditierten Kalibrierlabor kalibrieren zu lassen.

2.2 Monitore für die potenzielle Alphaenergie-Konzentration oder -Exposition

2.2.1 Anwendung

Mit den Monitoren wird die potenzielle Alphaenergie-Konzentration der kurzlebigen Zerfallsprodukte von Radon-222 in der Luft bestimmt. Dabei werden Konzentrationen im Bereich größer als $10 \text{ nJ}\cdot\text{m}^{-3}$ erfasst.

Die Monitore werden auf Grund ihrer Größe, ihres Gewichtes und der Notwendigkeit eines Netzanschlusses in der Regel als stationäre Messgeräte eingesetzt. Es sind auch tragbare Messgeräte verfügbar.

Die Geräte sind vor extremen klimatischen Einflüssen, wie Temperatur und Nässe, und vor mechanischer Beschädigung geschützt aufzustellen. Sie können sowohl für Langzeit- als auch für Kurzmessungen eingesetzt werden. Die Dauer einer Langzeitmessung wird durch die technischen Eigenschaften, z. B. die Leistungsaufnahme bei Batteriebetrieb oder die Größe des Messwertspeichers, begrenzt.

2.2.2 Messprinzip

Während einer Probeentnahme wird die zu untersuchende Luft über ein Schwebstofffilter geleitet, auf dem sich die in der Luft enthaltenen Schwebstoffe abscheiden. Dadurch reichern sich auch die kurzlebigen Radon-222-Zerfallsprodukte auf dem Filter an. Zur Bestimmung der potenziellen Alphaenergie-Konzentration wird die Aktivität der auf dem Filter abgeschiedenen kurzlebigen Radon-222-Zerfallsprodukte kontinuierlich gemessen.

2.2.3 Ergebnis

Die potenzielle Alphaenergie-Konzentration der kurzlebigen Radon-222-Zerfallsprodukte wird in der Einheit $\mu\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ oder einem Vielfachen davon angegeben. Andere Einheiten sind möglich. Die Monitore für die Ermittlung der beruflichen Strahlenexposition von Beschäftigten müssen mit einem Messwertspeicher ausgestattet sein, in dem die Messwerte und die Messzeitpunkte aufgezeichnet werden. Die potenzielle Alphaenergie-Exposition der kurzlebigen Radon-222 Zerfallsprodukte für eine zu überwachende Person ist das Produkt des Mittelwertes der potenziellen Alphaenergie-Konzentration, die während des Aufenthaltes der Person an dem überwachten Arbeitsplatz ermittelt wurde, und der Aufenthaltszeit dieser Person an diesem Arbeitsplatz. Arbeitet die Person an verschiedenen Arbeitsplätzen, sind die an jedem dieser Arbeitsplätze ermittelten Expositionen zu summieren.

2.2.4 Ursachen für Messabweichungen

Durch extreme klimatische Bedingungen, wie Feuchtigkeit und Temperatur, als auch durch Staub und Schmutz können Messabweichungen auftreten.

Um Messabweichungen zu reduzieren, sollten die Schwebstofffilter einen hohen Abscheidegrad für Stäube, Rauche und Aerosolpartikel besitzen. Infolge einer langen Messdauer oder hoher Staubkonzentrationen in der angesaugten Luft können durch Absorption der emittierten Alphaeilchen in der auf dem Filter abgelagerten Staubschicht Messabweichungen auftreten. Die Messabweichungen können durch Verkürzung der Messdauer reduziert werden.

Die Luftfördereinrichtung muss über die gesamte Messdauer einen ausreichend konstanten Volumenstrom durch das Filter gewährleisten und der Volumenstrom möglichst wenig vom Strömungswiderstand des Schwebstofffilters abhängen. Durch räumliche Trennung von Probeentnahmekopf und Auslass der Luft ist ein Strömungskurzschluss zu verhindern.

2.2.5 Qualitätssicherung

Das Messgerät ist mindestens im Abstand von 2 Jahren bei einem akkreditierten Kalibrierlabor kalibrieren zu lassen. Nach dem Wechsel des Detektors oder nach Vorkommnissen, die zu einer Beeinflussung der Kalibrierdaten führen können, ist vor einem erneuten Einsatz eine Nachkalibrierung des Gerätes erforderlich.

2.3 Integrierende Messgeräte für die Ermittlung der potenziellen Alphaenergie-Exposition der kurzlebigen Radonzerfallsprodukte

2.3.1 Anwendung

Speziell für die Ermittlung der Strahlenexpositionen von Bergarbeitern kann ein integrierendes Messgerät verwendet werden, das die potenzielle Alphaenergie-Exposition der kurzlebigen Radon-Zerfallsprodukte ermittelt. Zusätzlich wird mit diesem Gerät die Exposition durch Uran und Thorium und deren Zerfallsprodukte sowie die Strahlenexposition durch externe Gammastrahlung gemessen. In der Bundesrepublik wird dieses Messgerät insbesondere zur Überwachung von beruflich strahlenexponierten Personen bei der Sanierung von Hinterlassenschaften des Uranerzbergbaues eingesetzt.

Das Messgerät wird von der zu überwachenden Person während der Arbeiten am Körper getragen, ohne dabei durch die Arbeitskleidung verdeckt zu werden. Es hat ein Gewicht von ca. 300 g und kann mehr als 8 Stunden ohne Unterbrechung betrieben werden. Nach Beendigung der Arbeit steckt der Beschäftigte das Messgerät in einen Ladeschrank, wodurch der im Gerät befindliche Akkumulator erneut geladen wird. Das Messgerät ist robust, einfach zu handhaben und besitzt dadurch ausgezeichnete Voraussetzungen für den praktischen Einsatz.

Es werden ausschließlich Kernspurdetektoren verwendet, die erst nach der Messung dem Gerät entnommen und mittels eines physikalischen und chemischen Prozesses ausgewertet werden. Die Messgeräte bieten deshalb keine Möglichkeit, während der Messung auf Expositionsdaten zuzugreifen.

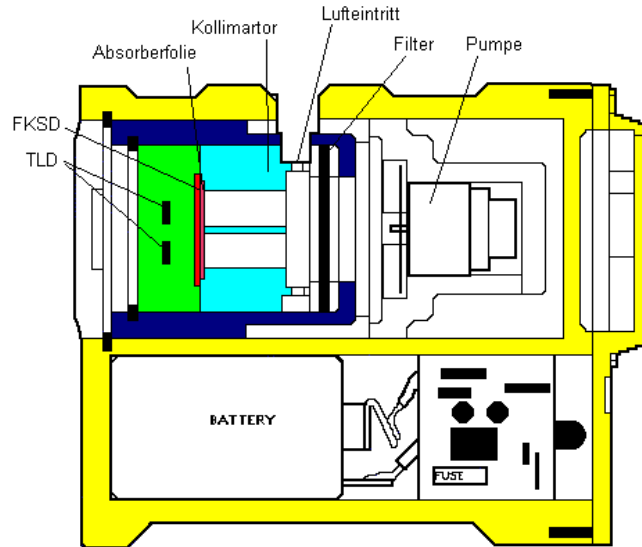


Abbildung 4: Aufbau des integrierenden Messgerätes

2.3.2 Messprinzip

Das Messgerät besitzt eine Luftansaugeinrichtung, bei dem Staub- und Aerosolpartikel auf einem Schwebstofffilter abgeschieden werden. Die während der Einsatzzeit des Messgerätes emittierten Alphateilchen werden mit einem Kernspurdetektor registriert. Zur Auswertung des Kernspurdetektors werden die Alphateilchenspuren mittels einer chemischen Ätzung sichtbar gemacht. Mit Thermolumineszenzdetektoren (TLD) wird die Strahlenexposition infolge Gammastrahlung und durch Auswertung des Schwebstofffilters die Strahlenexposition infolge Inhalation luftgetragener Aktivität langlebiger Radionuklide bestimmt.

Da für die Auswertung der Detektoren physikalisch-chemische Methoden eingesetzt werden, die hohe Anforderungen an die Laborpraxis stellen, wird diese Tätigkeit von Mess- oder anderen sachverständigen Stellen durchgeführt.

2.3.3 Ergebnis

Mit dem Messgerät werden die folgenden Strahlenexpositionen des Geräteträgers während seiner Arbeiten ermittelt:

1. die potenzielle Alphaenergie-Exposition der kurzlebigen Radon-Zerfallsprodukte in $\text{mJ}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$,
2. die Exposition durch Inhalation der in der Atemluft enthaltenen Aktivität von Uran und Thorium und deren Zerfallsprodukte in $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ sowie
3. die durch externe Gammastrahlung hervorgerufene Personendosis in mSv.

2.3.4 Ursachen für Messabweichungen

Messabweichungen können infolge unsachgemäßer Trageweise der Messgeräte (z. B. Abdecken durch die Kleidung) auftreten.

Messabweichungen treten auch dann auf, wenn der freie Anteil der kurzlebigen Radon-Zerfallsprodukte in der Atemluft gegenüber dem an Aerosolpartikeln angelagerten Anteil groß ist. An typischen Aufenthalts- und Arbeitsplätzen des Menschen, insbesondere in Gegenwart

von Aerosolquellen, ist der freie Anteil kurzlebiger Radon-Zerfallsprodukte sehr viel kleiner als 15%, so dass die dadurch auftretenden Messabweichungen vernachlässigbar sind.

Ursache von Messabweichungen kann auch eine falsche Bestimmung des Volumenstromes durch den Messkopf oder eine defekte Luftansaugeinrichtung sein.

2.3.5 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung umfasst jährliche Expositionen der Messgeräte in zertifizierten Referenzatmosphären mit Radonzerfallsprodukten sowie weitere Maßnahmen zur Sicherstellung der Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen.

Der Anwender der Messgeräte ist für die Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit der elektronischen und aktiven Teile (Aufladung der Akkumulatoren, Luftfördereinrichtung) und für die Messung des Volumenstromes verantwortlich.