

**Verfahren zur Bestimmung der
mittleren Aktivitätskonzentration von
aerosolpartikelgetragendem Iod-131
in der Fortluft kerntechnischer Anlagen**

J-I-131-ALUFT-01

Bearbeiter:

K. Vogl

Leitstelle für Fortluft aus kerntechnischen Anlagen

Verfahren zur Bestimmung der mittleren Aktivitätskonzentration von aerosolpartikelgetragendem Iod-131 in der Fortluft kerntechnischer Anlagen

1 Anwendbarkeit

Das nachfolgend beschriebene Verfahren eignet sich zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration von aerosolpartikelgetragendem als auch von gasförmigem Iod-131 in der Fortluft von kerntechnischen Anlagen. Das Verfahren ist auch zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration von Iod-131 in der Raumluft, Abluft und Umgebungsluft im Rahmen von Immissionsmessungen anwendbar.

2 Probeentnahme und Sammlung

In der Fortluft von kerntechnischen Anlagen liegt I-131 an Aerosolpartikeln mit einem Durchmesser von 0,1 µm bis 0,8 µm gebunden oder aber gasförmig in der chemischen Form von elementarem Iod (I_2), Methyljodid (CH_3I) oder hypoiodiger Säure (HIO), bei Störfällen auch als Iodwasserstoff (HI), vor. Zur Probeentnahme des I-131 wird aus der Fortluft mittels einer Probeentnahmeeinrichtung ein repräsentativer Teilluftstrom entnommen und über Sammelmedien für Iod geleitet (1, 2).

I-131-Aktivität tragende Aerosolpartikeln werden kontinuierlich auf Schwebstofffiltern mit einem Abscheidegrad besser als 0,995 (z. B. HEPA-Schwebstofffilter H12 gemäß DIN EN 1822-1) abgeschieden (3, 4). Dabei ist darauf zu achten, dass die Schwebstofffilter möglichst wenig gasförmiges Iod adsorbieren. Geeignet sind Glasfaserfilter ohne organische Bindemittel, wie sie z. B. in Abschnitt 7.1 aufgeführt sind, die allerdings nur geringe mechanische Festigkeit aufweisen. Verwendet werden auch Teflonmembranfilter mit Nylonstützgewebe, das die mechanische Stabilität verbessert.

Gasförmiges I-131 in Form von elementarem Iod (I_2), als organische Verbindung, wie z. B. Methyljodid (CH_3I), oder als anorganische Verbindung, wie z. B. hypoiodige Säure (HIO) oder Iodwasserstoff (HI), wird in Feststoffschüttungen absorbiert. Diese Feststoffschüttungen müssen die Iodverbindungen auch bei relativer Luftfeuchte bis zu 90 % quantitativ absorbieren. Bei hohen Aktivitätskonzentrationen an Edelgasen, die bei der Messung der Aktivität der Iodverbindungen stören, muss darauf geachtet werden, Feststoffschüttungen mit geringem Absorptionsvermögen für Edelgase zu verwenden.

Zur selektiven Abtrennung von elementarem Iod dient Aktivkohlegranulat oder das Silikat DSM 11 mit einer Beschichtung von ca. 1 % Kaliumiodid (5). Aktivkohlegranulat, das mit einigen Prozent Triethylendiamin (TEDA), Hexamethylenetetramin (HMTA), 1 % bis 3 % Kaliumiodid (KI) oder Kaliumiodat imprägniert ist, absorbiert sowohl elementares Iod als auch organisch gebundenes Iod (2, 5, 6). Bei hohen Edelgasaktivitätskonzentrationen können zur Sammlung auch vorteilhaft Silberzeolithe und mit Silbernitrat beschichtetes Silikagel und Aluminiumoxid, in denen Edelgase wenig absorbiert werden, eingesetzt werden (7, 8).

Soll nach gasförmigem elementarem und als organische Verbindung vorliegendem Iod unterschieden werden (1), kommen zwei Absorberpatronen, die hintereinander oder auch parallel angeordnet sind, zur Anwendung. Elementares Iod wird dabei vorzugsweise im ersten Absorptionsmittel wie z. B. Aktivkohlegranulat oder beschichtetem DSM 11 abgeschieden, während z. B. Methyljodid auf dem zweiten Absorptionsmittel, das z. B. aus beschichteter Aktivkohle besteht, absorbiert wird (5, 6).

Üblicherweise werden für die Feststoffschüttungen zylindrische Behälter aus Edelstahl oder Glas (Filterpatronen) mit einem Durchmesser von ca. 3 cm bis 5 cm und einer Länge von ca. 5 cm bis 15 cm eingesetzt. Bei der Absorption in den Feststoffschüttungen ist darauf zu achten, den Volumenstrom so zu wählen, dass die Kontaktzeit wenigstens 0,2 Sekunden beträgt (2), oder die Luft bzw. die Feststoffschüttung auf über 50 °C bis 100 °C zu erhitzen, da nur dann gewährleistet ist, dass ein Abscheidegrad über 95 % auch bei höherer relativer Luftfeuchte erreicht wird. Die Erwärmung der Feststoffschüttungen dient auch zur Reduzierung der Edelgasabsorption.

Die Volumenströme durch die Filterpatronen betragen meist einige $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Zur Abtrennung von aerosolpartikelgetragenen Iodisotopen oder anderen möglicherweise störenden Radionukliden werden vor den Feststoffschüttungen Schwebstofffilter, z. B. HEPA-Schwebstofffilter H12, angebracht (3, 4).

Um eine quantitative Abscheidung sicherzustellen, sollten zwei Filterpatronen oder zwei durch ein Gitter getrennte Feststoffschüttungen in einer Patrone hintereinander angebracht (5) und die Aktivität in den einzelnen Feststoffschüttungen getrennt ermittelt werden. Falls in der ersten Feststoffschüttung Aktivität festgestellt wird, kann man durch Messen der Aktivität in der zweiten die Vollständigkeit oder den Wirkungsgrad der Iodabscheidung in der ersten bestimmen.

Angaben zur Halterung der Schwebstofffilter und zur Auslegung der Probeentnahmeeinrichtung finden sich in dem Verfahren J- γ -SPEKT-ALUFT-03 und der Literatur (9). Die Materialien der zur Probeentnahme verwendeten Rohre und Geräte dürfen mit Iodverbindungen nicht chemisch reagieren. Gut geeignet sind z. B. polierter Edelstahl, Glas oder bedingt auch Teflon oder Hartpolyethylen (1, 2). Kupfer oder Kunststoffe, die Iod absorbieren oder mit Iod Verbindungen eingehen, dürfen nicht benützt werden (2).

Wegen der Halbwertszeit des I-131 von nur 8,02 Tagen sollte die Sammeldauer nicht mehr als eine Woche betragen. Bei Messungen gemäß der Sicherheitstechnischen Regel KTA 1503.1 (1) werden die Schwebstofffilter und Feststoffschüttungen wöchentlich gewechselt und innerhalb eines Tages nach der Entnahme die I-131-Aktivität in den Proben bestimmt.

3 Analyse

3.1 Prinzip des Verfahrens

Die auf den Sammelmedien abgeschiedene I-131-Aktivität wird mit Hilfe der nuklidspezifischen Gammaskopie ermittelt und daraus und mittels des gemessenen Luftdurchsatzes die Aktivitätskonzentration von I-131 berechnet.

3.2 Probenvorbereitung

Die Schwebstofffilter werden ohne weitere Vorbereitung gemessen. Die Sammelmedien Aktivkohle, Silikat oder Silberzeolith oder Silikate werden aus den Behältern entfernt, durch Schütteln oder Rühren homogenisiert und eine abgewogene Masse von z. B. 50 g in für die Messung geeignete verschließbare Gefäße, wie z. B. breite Schraubdeckeldosen aus Kunststoff oder Marinelli-Becher mit Deckel, eingefüllt.

4 Messung der Aktivität

4.1 Allgemeines

Die beladenen Schwebstofffilter werden plan und axialsymmetrisch auf einen Halter, der z. B. aus einem Marinelli-Becher hergestellt sein kann und der Markierungen zum genauen Zentrieren von Schwebstofffiltern verschiedener Größen aufweist, auf einen großvolumigen Halbleiterdetektor gelegt (Abbildung 1). Die Schwebstofffilter werden mit einer Kunststoffscheibe mit einer Dicke von ca. 3 mm beschwert, um ein Verformen der Schwebstofffilter und eine Änderung der Messgeometrie zu vermeiden. Zur Verhinderung einer Kontamination der Messapparatur wird der Schwebstofffilter zwischen zwei dünne Kunststofffolien oder in eine dünne Kunststofftüte eingelegt werden. Die Aktivität auf dem Schwebstofffilter wird mehrere Stunden nuklidspezifisch gemessen.

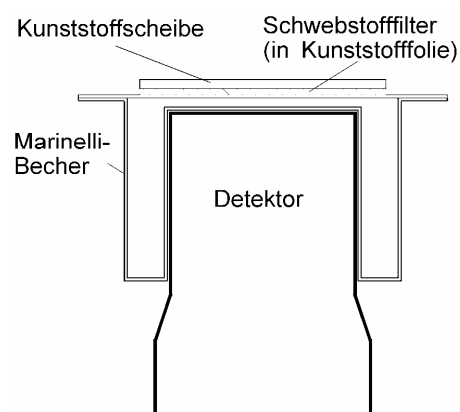


Abb. 1: Schema der Messanordnung bei Schwebstofffiltern

Die verwendeten Gefäße mit Aktivkohle, Silikat oder Silberzeolith werden ebenfalls axialsymmetrisch auf einen Halter mit entsprechenden Markierungen zur zentrischen Ausrichtung der Probe auf den Halbleiterdetektor gesetzt (Abbildung 2). Marinelli-Becher sollten so gestaltet sein, dass sie den Halbleiterdetektor eng umgeben (Abbildung 3). In beiden Fällen beträgt die Messdauer einige Stunden.

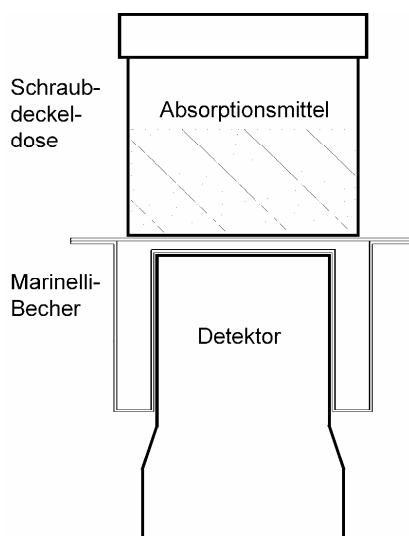


Abb. 2: Schema der Messanordnung bei Iod-Absorptionsmitteln in einer Schraubdeckeldose

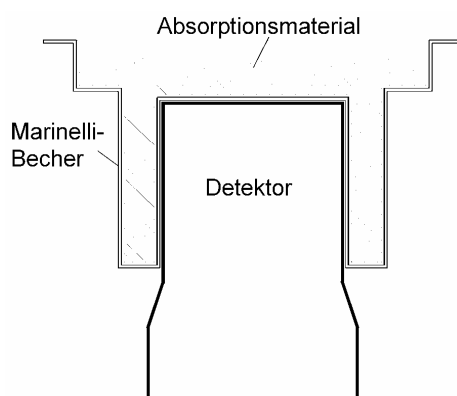


Abb. 3: Schema der Messanordnung bei Iod-Absorptionsmitteln im Marinelli-Becher

Wegen der geringen Halbwertszeit des I-131 sollte die Messung nach Möglichkeit innerhalb von etwa zwei Wochen nach der Probeentnahme durchgeführt werden.

Auf dem Schwebstofffilter abgeschiedene aerosolpartikelgetragene Radionuklide und an den Feststoffschüttungen absorbierte gasförmige Radionuklide, wie z. B. Edelgasisotope, können die Messung stören. Um die Untergrundaktivität gering zu halten, ist es günstig, zwischen Probeentnahme und Messbeginn ein bis zwei Tage zu warten, da dann die Aktivität von kurzlebigen Radionukliden abgeklungen ist. Auch durch Durchblasen der Sammelmedien mit etwa 10 Liter Stickstoffgas bei einem Volumenstrom von ca. $0,1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ können störende Edelgasisotope entfernt werden.

4.2 Kalibrierung

Zur Kalibrierung der Messanordnung bei Messung von Schwebstofffiltern wird auf einen von der Art und den Abmessungen identischen Schwebstofffilter eine I-131-Lösung bekannter Aktivität möglichst homogen aufgegeben. Dazu wird aus einem I-131-Normal eine wässrige Lösung unter Zugabe von Natriumiodid ($60 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), Natriumbisulfit ($45 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) und Formalin ($0,1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$) mit einer Aktivitätskonzentration von etwa $3 \text{ kBq}\cdot\text{ml}^{-1}$ hergestellt. Auf den Schwebstofffilter werden etwa 20 bis 40 Punkte gleichmäßig verteilt und mit gleichen Abständen aufgezeichnet und darauf aus einer Pipette jeweils ein Tropfen der Lösung aufgegeben. Das Kalibrierpräparat wird in derselben Messgeometrie wie die Probe etwa eine Stunde gemessen.

Zur Kalibrierung bei einer Schüttung von Absorbermaterial wird eine wie oben beschrieben hergestellte I-131-Lösung bekannter Aktivität in dieselbe wie für die Proben verwendete Masse des Sammelmediums eingeträufelt, durch Schütteln oder Rühren homogen verteilt und mit derselben Messgeometrie wie die Proben etwa eine Stunde gemessen. Der Kalibrierfaktor wird vorteilhaft mit der 364-keV-Linie ermittelt.

5 Berechnung der Analyseergebnisse

5.1 Gleichungen zur Berechnung

Aus dem aufgenommenen Spektrum wird die Nettoimpulsanzahl, wie in Kapitel IV.1 dieser Messanleitungen beschrieben, mit Hilfe eines Rechners ermittelt. Aus der Nettoimpulsanzahl, dem nach Abschnitt 4.2 bestimmten Kalibrierfaktor, dem Probenentnahmezeitraum, dem Luftdurchsatz und der Messdauer wird die Aktivitätskonzentration von I-131 in der Fortluft bestimmt. Aufgrund der Halbwertszeit des I-131 von 8,02 Tagen muss der Messwert dabei bezüglich der Probenentnahmedauer, des Abklingzeitraumes und der Messdauer korrigiert werden. Die I-131-Aktivitätskonzentration in der Fortluft wird nach den Gleichungen (1) bis (4) berechnet:

$$c = \frac{\varphi_A \cdot N_n \cdot q}{q_m \cdot t_m \cdot V} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \quad (1)$$

$$f_1 = \frac{\lambda \cdot t_S}{(1 - e^{-\lambda \cdot t_S})} \quad (2)$$

$$f_2 = e^{\lambda \cdot t_A} \quad (3)$$

$$f_3 = \frac{\lambda \cdot t_m}{(1 - e^{-\lambda \cdot t_m})} \quad (4)$$

Die relative Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration $s(c) \cdot c^{-1}$ wird nach Gleichung (5) berechnet:

$$\frac{s(c)}{c} = \sqrt{\left(\frac{s(N_n)}{N_n}\right)^2 + \left(\frac{s(\varphi_A)}{\varphi_A}\right)^2} \quad (5)$$

Bei den Gleichungen (1) bis (5) bedeuten:

- c Aktivitätskonzentration in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$;
- $s(c)$ Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$;
- N_n Nettoimpulsanzahl;
- f_1 Korrektionsfaktor für das Abklingen der Aktivität während der Probeentnahme;
- f_2 Korrektionsfaktor für das Abklingen der Aktivität zwischen Ende der Probeentnahme und Messbeginn;
- f_3 Korrektionsfaktor für das Abklingen der Aktivität während des Messens;
- t_S Sammeldauer in s;
- t_A Zeitraum vom Ende der Probeentnahme bis zum Messbeginn in s;
- t_m Messdauer in s;
- φ_A Kalibrierfaktor in $\text{Bq} \cdot \text{s}$;
- λ Zerfallskonstante von I-131 in s^{-1} ;
- q Gesamtverlustfaktor;
- q_m Verhältnis der zur Messung verwendeten Masse zur Gesamtmasse der Probe;
- V Luftdurchsatz in m^3 .

5.2 Rechenbeispiel

Als Beispiel wird die Berechnung der Aktivität von gasförmigem I-131 angegeben. Aus der Fortluft eines Kernkraftwerkes wurde ein Teilluftstrom mit einem Volumenstrom von $4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ durch ein Schwebstofffilter und einen mit Kaliumiodid imprägnierter Aktivkohle gefüllten Behälter über einen Zeitraum von einer Woche geleitet. Die Sammelmedien wurden verschickt und von den 72 g imprägnierter Aktivkohle wurden 50 g für die Messung des gasförmigen I-131 verwendet. Fünf Tage nach Ende der Probeentnahme wurde die Aktivität des I-131 60000 s gemessen. Nach der Messung der Aktivität des I-131 in der Aktivkohle liegen folgende Daten vor:

$$\begin{aligned} N_n &= 510; & t_m &= 60000 \text{ s}; \\ t_S &= 691200 \text{ s}; & t_A &= 432000 \text{ s}; \\ \varphi_A &= 333 \text{ Bq} \cdot \text{s}; & \lambda &= 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}; \\ q_m &= 0,7; & q &= 1,2; \\ V &= 768 \text{ m}^3. \end{aligned}$$

Mit den oben genannten Werten liefern die Gleichungen (1) bis (4) folgende Resultate:

$$f_1 = 1,385 \quad f_2 = 1,540 \quad f_3 = 1,030$$

$$c = \frac{333 \cdot 510 \cdot 1,2}{0,7 \cdot 60000 \cdot 768} \cdot 1,385 \cdot 1,540 \cdot 1,030 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} =$$

$$= 0,0139 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 13,9 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$$

Beim obigen Beispiel beträgt die relative Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration bei einer relativen Standardmessunsicherheit der Nettoimpulsanzahl von 11 % und einer relativen Standardmessunsicherheit des Kalibrierfaktors von 5 % wie folgt:

$$\frac{s(c)}{c} = \sqrt{0,11^2 + 0,05^2} = 0,12$$

Die Aktivitätskonzentration von I-131 beträgt demnach:

$$c = (14,0 \pm 1,7) \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$$

5.3 Unsicherheiten der Analyseergebnisse

Die Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration rührt hauptsächlich von der zählstatistischen Standardmessunsicherheit der Nettoimpulsanzahl und von der Standardmessunsicherheit bei der Bestimmung der energieabhängigen Nachweiswahrscheinlichkeit her. Die anderen Beiträge zur Standardmessunsicherheit können demgegenüber vernachlässigt werden.

6 Nachweisgrenzen des Verfahrens

6.1 Gleichungen zur Berechnung

Zum Ermitteln der Nachweisgrenze der Aktivitätskonzentration wird die Gleichung 2.13 des Kapitels IV.5, Abschnitt 2.2.2 dieser Messanleitungen herangezogen. Die Nachweisgrenze der Aktivitätskonzentration g wird nach Gleichung (6) berechnet:

$$g = \frac{\varphi_A \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot q}{q_m \cdot V} \cdot \frac{k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}}{2 \cdot t_m} \cdot \left(k_{1-\alpha} + \sqrt{k_{1-\alpha}^2 + 4 \cdot b \cdot \bar{R}_0(E_\gamma) \cdot t_m \cdot \left(1 + \frac{b}{2 \cdot L}\right)} \right) \quad (6)$$

Bei Gleichung (6) bedeuten:

- $\bar{R}_0(E_\gamma)$ mittlere Nulleffektzählrate der Linie pro Kanal;
- b Fußbreite einer Gammalinie (Peakfußbreite) in Anzahl der Kanäle;
- L Anzahl der zur Untergrundbestimmung verwendeten Kanäle auf einer Seite der Linie;
- $k_{1-\alpha}, k_{1-\beta}$ Quantile.

6.2 Rechenbeispiel

Für das obige Beispiel des Nachweises von I-131 ergibt sich bei einer Linienfußbreite von vier Kanälen, einer Kanalbreite für die Untergrundbestimmung von zwei Kanälen, einer mittleren Nulleffektzählrate $\bar{R}_0(E_\gamma)$ von $0,001 \text{ s}^{-1}$ und einer Messdauer des Nulleffektes von 60000 s eine Nachweisgrenze der Aktivitätskonzentration mit den Werten für die Quantile $k_{1-\alpha} = 3$ und $k_{1-\beta} = 1,645$:

$$g = \frac{333 \cdot 1,385 \cdot 1,540 \cdot 1,030 \cdot 1,2}{0,7 \cdot 768} \cdot \frac{4,645}{2 \cdot 60000} \cdot \left(3 + \sqrt{9 + 4 \cdot 4 \cdot 0,001 \cdot 60000 \cdot \left(1 + \frac{4}{2 \cdot 2}\right)} \right) \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} =$$

$$= 1,628 \cdot 0,0000387 \cdot (3 + \sqrt{9 + 1924}) \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 2,96 \cdot 10^{-3} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 2,96 \text{ mBq} \cdot \text{m}^{-3}$$

7 Verzeichnis der erforderlichen Chemikalien und Geräte

7.1 Chemikalien

Die verwendeten Chemikalien sollten analysenrein sein.

- Schwebstofffilter mit einem Abscheidegrad besser als 0,995:
 - a) Glasfaserfilter
 - z. B. Typ GF/A, Whatman, Hormuth-Vetter, Wiesloch
 - z. B. Typ GF8, Schleicher und Schüll GmbH, Dassel
 - b) Teflonmembranfilter
 - z. B. Typ TE38, Schleicher und Schüll GmbH, Dassel
 - z. B. Typ SM11842, Sartorius GmbH, Göttingen;
- Absorptionsmittel für elementares Iod:
 - a) Aktivkohlegranulat:
 - Korngröße 0,3 mm bis 1 mm,
 - z. B. von Sutcliffe Speakman LTD
 - b) Silikat DSM 11:
 - mit 1 % bis 5 % Kaliumiodid (KI) beschichtet, Südchemie, München;
- Absorptionsmittel für Iodverbindungen:
 - a) beschichtete Aktivkohle:
 - Korngröße 0,3 mm bis 0,8 mm,
 - mit einigen Prozent Triethylendiamin (TEDA) beschichtet,
 - z. B. Typ 207B, Sutcliffe Speakman LTD
 - b) Silberzeolith:
 - Korngröße 0,3 mm bis 0,8 mm, z. B. AC 6120;
- I-131-Lösung:
 - einige kBq·ml⁻¹, wässrige Lösung mit Natriumiodid (60 mg·l⁻¹), Natriumbisulfit (45 mg·l⁻¹), Formalin (0,1 mol·l⁻¹), rückführbar auf Aktivitätsnormale der PTB.

7.2 Geräte

- Probeentnahmesystem mit Probeentnahmerohren, Halter für Schwebstofffilter, Behälter für Absorptionsmittel, Luftfördergerät, Volumenstrom- oder Luftdurchsatzmessgerät;
- Schraubdeckeldosen;
- Marinelli-Becher;
- Gammaskopie-Messplatz mit Halbleiterdetektor.

Literatur

- (1) Sicherheitstechnische Regel des Kerntechnischen Ausschusses KTA 1503.1 Messung und Überwachung der Ableitung gasförmiger und Schwebstoffen gebundener radioaktiver Stoffe; Messung und Überwachung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Kaminabluft bei bestimmungsgemäßem Betrieb. Köln: Carl Heymanns Verlag. 2002-06
- (2) Norm DIN 25423 Teil 3 Probenahme bei der Radioaktivitätsüberwachung der Luft: Probeentnahmeverfahren. 1987-03
Hinweis: Diese Norm wird voraussichtlich im Jahre 2009 durch die Norm DIN ISO 2889 ersetzt.
- (3) Norm DIN EN 1822 Teil 1 Schwebstofffilter (HEPA und ULPA); Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung. 1998-07
- (4) Gesewsky, P.: Die Eignung von Membranfiltern zur Aerosolüberwachung in kerntechnischen Anlagen in Gegenüberstellung zu Glasfaserfiltern. Bericht des Institutes für Strahlenhygiene, 1985, ABE-139
- (5) Wilhelm, J. G.: Fortschritte bei der Verbesserung der Spaltproduktrückhaltung in Kernkraftwerken und Wiederaufarbeitungsanlagen; Jahreskolloquium Projekt Nukleare Sicherheit, 1978, Karlsruhe
- (6) Riedel, H., von Gadow, A., Gesewsky, P.: Untersuchungen über das Auftreten von Radiojod in Luft, Niederschlag, Gras, Kuh- und Ziegenmilch nach dem chinesischen Atombombenversuch vom 26.09.1977. Bericht des Instituts für Strahlenhygiene, 1977, STH-Bericht 3/77
- (7) Kato, S., Noguchi, H., Murata, M., Imai, H., Matsui, H., Kokubu, M.: Selective Collection of Organic Iodide from the Radioactive Noble Gas-Containing Atmosphere in Nuclear Reactor Accident. Japan Atomic Energy Research Institute, Division of Health Physics, 1982
- (8) Cline, J. E.: Retention of Noble Gases by Silver Zeolite Iodine Samples. Health Physics, 1981, Vol. 40, S. 71
- (9) Vogl, K.: Rechnerische Abschätzung der Aerosolpartikelverluste in Probeentnahmesystemen bei kerntechnischen Anlagen: Physikalische Modelle, Vorgehensweise, Ergebnisse und weitere Ausblicke. Bericht der Fachbereiches Strahlenschutz des BfS, 1992, ST2-32/1992