

**Verfahren zur Bestimmung der  
mittleren Aktivitätskonzentration von  
Kohlenstoff-14  
in der Fortluft kerntechnischer Anlagen**

J-C-14-ALUFT-01

Bearbeiter:

K. Vogl  
P. Gesewsky<sup>†</sup>

Leitstelle für Fortluft aus kerntechnischen Anlagen

# Verfahren zur Bestimmung der mittleren Aktivitätskonzentration von Kohlenstoff-14 in der Fortluft kerntechnischer Anlagen

## 1 Anwendbarkeit

Das nachfolgend beschriebene Verfahren eignet sich zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration des Radionuklides Kohlenstoff-14 (C-14) als chemische Verbindung Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffhydrid, insbesondere Methan, in der Fortluft kerntechnischer Anlagen.

## 2 Probeentnahme

C-14 in Form von Kohlenstoffdioxid wird aus einem Teilluftstrom der Fortluft von kerntechnischen Anlagen von einem festen oder flüssigen Sorptionsmedium kontinuierlich aufgenommen.

Zwei Verfahren sind dabei in Gebrauch:

- Absorption von Kohlenstoffdioxid in festem Absorptionsmittel (z. B. Molekularsieb);
- Absorption von Kohlenstoffdioxid in Natronlauge.

Die Probeentnahme mit Natronlauge war früher ein allgemein übliches Verfahren, wird heute aber wegen störender Schaumbildung, Flüssigkeitsverlusten, schwieriger Handhabung der Lauge und Problemen beim Transport zunehmend durch die Probeentnahme mit dem Molekularsieb abgelöst. Zudem wird in der KTA-Regel 1503.1 eine Unterscheidung zwischen anorganisch und organisch gebundenem C-14 bereits bei der Probeentnahme gefordert (1). Diese Bedingung kann die Verwendung eines Probeentnahme- und Sammelverfahrens basierend auf Natronlauge nur unzureichend erfüllen. Im Weiteren werden beide Verfahren aus Gründen der Vollständigkeit beschrieben.

Im Teilluftstrom vorliegende C-14-haltige organische Verbindungen können durch Oxidation in Kohlenstoffdioxid umgewandelt werden.

Der Teilluftstrom der Fortluft soll nach Möglichkeit mit Probeentnahmesonden isokinetisch entnommen werden (2, 3, 4). Die Leitungen müssen aus einem Material, wie z. B. aus Edelstahl oder Polytetrafluorethylen, bestehen, das mit Kohlenstoffdioxid chemisch nicht reagiert. Der Luftdurchsatz wird mit einem geeigneten Gerät, z. B. mit einer kalibrierten Gasuhr in Trockenbauweise, gemessen. Bei Verwendung einer Hubpumpe mit bekanntem Hubvolumen wird der Luftdurchsatz aus der Hubzahl berechnet.

Angaben über die Auslegung der Probeentnahmeeinrichtung sind dem Verfahren J- $\gamma$ -SPEKT-ALUFT-03 und der Literatur (3) zu entnehmen.

Aerosolpartikelgetragene Radionuklide, die die Messung der Aktivität des C-14 stören könnten, werden durch ein Schwebstofffilter mit einem Abscheidegrad über 0,995 (z. B. Typ H12 nach DIN EN 1822 Teil 1) in der Zuleitung zur Sammeleinrichtung aus dem Teilluftstrom entfernt (5). Störungen durch aerosolpartikelgetragene Radionuklide können auch durch Entnahme des Teilluftstromes nach dem Schwebstofffilter des Bilanzierungssammlers vermieden werden (2, 6).

Gasförmige Verbindungen der radioaktiven Nuklide des Iods, aber auch von H-3, P-32, S-35 und Tc-99, die bei der C-14-Messung stören, können teilweise zusammen mit dem Kohlenstoffdioxid absorbiert werden. Tritium in Form von Wasserdampf wird durch Kondensation vom C-14 abgetrennt. Alle genannten gasförmigen Radionuklide, außer Tritium, stören die Messung von C-14 jedoch aufgrund ihrer wesentlich geringeren Aktivitätskonzentrationen in der Regel nicht.

## **2.1 Probeentnahme mit festem Absorptionsmittel (Molekularsieb)**

### **2.1.1 Probeentnahme von Kohlenstoffdioxid**

Die routinemäßige Probeentnahme von C-14 als Kohlenstoffdioxid erfolgt durch Absorption des Kohlenstoffdioxids aus einem Teilluftstrom der Fortluft in einem festen Absorptionsmittel. Eine in der Praxis verwendete Sammeleinrichtung ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Das Absorptionsmittel befindet sich in einer Absorberpatrone mit einem Durchmesser von ca. 5 cm und einem Volumen von etwa 500 ml. Als Absorptionsmittel werden Molekularsiebe mit einer mittleren Porengröße von 0,4 nm bis 1,0 nm eingesetzt, die zuvor bei 450 °C unter mehrstündiger Stickstoffspülung aktiviert wurden (2, 6).

Bei Verwendung des genannten Molekularsiebes wird während des Probeentnahmezeitraumes ein Teilluftstrom mit einem Volumen von 1 bis 2 Kubikmetern durch das Absorptionsmittel geleitet. Dadurch ist bei einer üblichen relativen Luftfeuchte von 40 % bis 70 % sichergestellt, dass das gesammelte Kohlenstoffdioxid nicht durch das ebenfalls absorbierte Wasser verdrängt wird (2, 6).

Die Absorberpatrone muss mit selbst abschließenden Schnellverbindungen versehen sein, damit eine Abgabe oder Aufnahme von Kohlenstoffdioxid und eine Beeinflussung des Absorptionsmittels außerhalb der Beaufschlagungszeit ausgeschlossen ist.

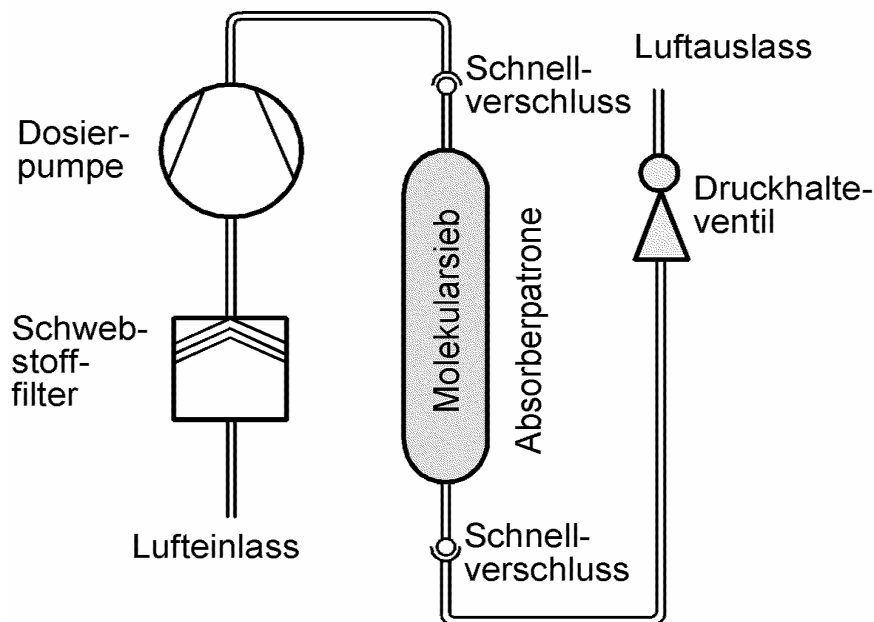
Bei Messungen gemäß den Anforderungen der KTA-Regel 1503.1 ist die Absorberpatrone nach jeweils einem Vierteljahr auszuwechseln (1). Der Volumenstrom beträgt dann ca.  $0,14 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### **2.1.2 Probeentnahme von flüchtigen organischen Verbindungen**

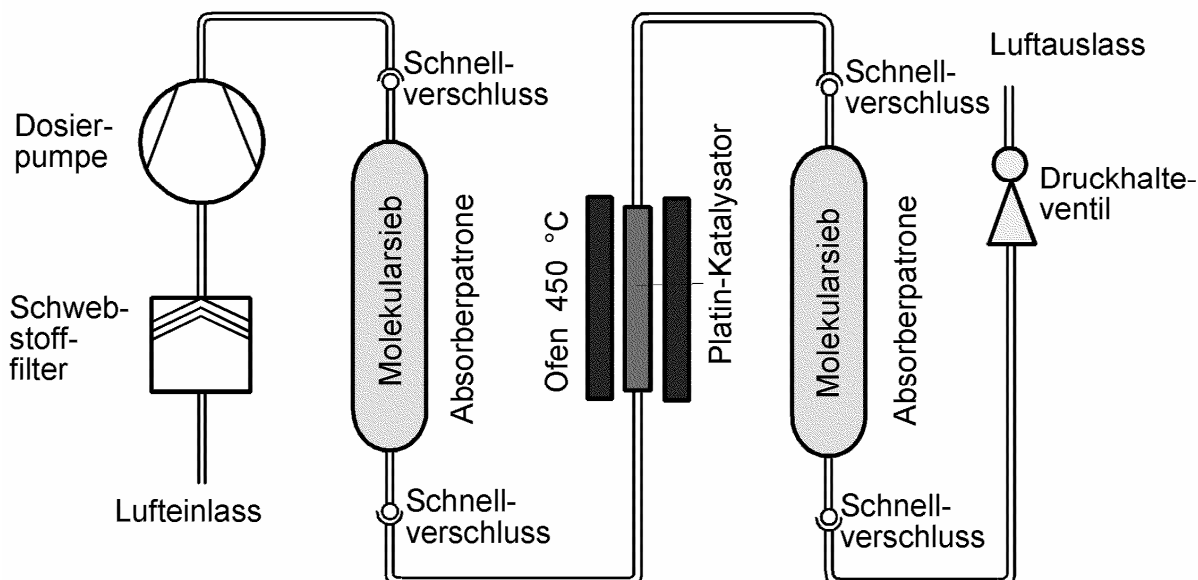
Simultan mit der Probeentnahme von Kohlenstoffdioxid können auch Methan oder andere organische Verbindungen gesammelt werden, indem der aus der oben genannten Sammeleinrichtung austretende Luftstrom über einen Oxidationskatalysator, z. B. Platin bei einer Temperatur von 450 °C oder Kupferoxid bei einer Temperatur von 800 °C, geleitet wird. Dabei werden Kohlenstoffhydride, wie z. B. Methan, in Kohlenstoffdioxid umgewandelt, das dann in einer zweiten Sammeleinrichtung mit Absorptionsmittel absorbiert wird (siehe Abbildung 2).

Die Umwandlung von Methan zu Kohlenstoffdioxid ist erforderlich, da Methan nur schwach am Molekularsieb absorbiert und daher nach einiger Zeit wieder ausgetrieben wird. Bei diesem Verfahren wird auch Kohlenstoffmonoxid (CO) erfasst.

Geräte mit festem Absorptionsmittel zur Probeentnahme von C-14 sowohl als Kohlenstoffdioxid als auch als organische Verbindungen sind kommerziell erhältlich.



**Abb. 1:** Schematische Darstellung einer Sammeleinrichtung mit Molekularsieb

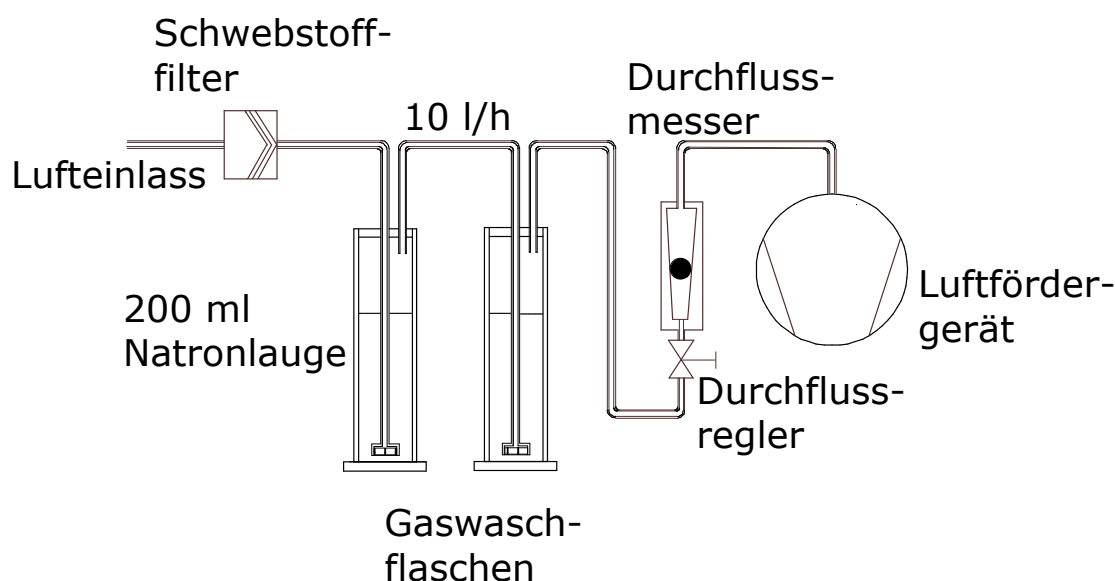


**Abb. 2:** Schematische Darstellung einer Sammeleinrichtung mit Molekularsieb und Oxidationskatalysator

## 2.2 Probeentnahme durch Absorption in Natronlauge

### 2.2.1 Probeentnahme von Kohlenstoffdioxid

Ein Teilluftstrom der Fortluft mit einem Volumenstrom von ca.  $0,3 \text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$  wird durch eine 200 ml-Gaswaschflasche, die mit 100 ml carbonatfreier Natronlauge ( $1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) gefüllt ist, geleitet (7). Das Kohlenstoffdioxid wird dabei in lösliches Carbonat umgewandelt. Um einen hohen Wirkungsgrad bei der Probeentnahme zu erzielen, sollte der Luftstrom in der Gaswaschflasche durch eine poröse Schicht (Fritte) in die Flüssigkeit eintreten, wodurch sich eine Verteilung des Luftstroms in Form feiner Luftbläschen einstellt. Eine Waschflasche nach Friedrichs ist ebenfalls gut geeignet. Eine schematische Darstellung der Sammeleinrichtung ist Abbildung 3 zu entnehmen.



**Abb. 3:** Schematische Darstellung einer Sammeleinrichtung mit Gaswaschflasche und Natronlauge

### 2.2.2 Probeentnahme von flüchtigen organischen Verbindungen

Simultan mit der Probeentnahme von Kohlenstoffdioxid können auch Methan oder andere organische Verbindungen gesammelt werden, indem der aus der Gaswaschflasche austretende Luftstrom über einen Oxidationskatalysator geleitet wird. Dabei wird Methan in Kohlenstoffdioxid umgewandelt, das dann in einer zweiten mit Natronlauge gefüllten Gaswaschflasche absorbiert wird. Die Umwandlung von Methan zu Kohlenstoffdioxid ist erforderlich, da organisch gebundenes C-14 von Natronlauge wenig absorbiert wird. Bei diesem Verfahren wird auch Kohlenstoffmonoxid erfasst. Die Verwendung von Natronlauge erschwert bei diesem Verfahren die katalytische Oxidation.

## **3 Analyse**

### **3.1 Prinzip des Verfahrens**

Das im Molekularsieb absorbierte Kohlenstoffdioxid wird mit Stickstoffgas aus dem auf 350 °C bis 370 °C erhitzten Molekularsieb vier Stunden ausgetrieben und über eine Gaswaschflasche geleitet, die Natronlauge ( $1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ), enthält. Der ebenfalls mit extrahierte Wasserdampf, der Tritium enthält, wird in einem Kugelkühler vor der Waschflasche kondensiert und das Tritium dadurch vom C-14 abgetrennt.

Bei Absorption von Kohlenstoffdioxid in der Gaswaschflasche oder im Fall der Probeentnahme mit Natronlauge gemäß Abschnitt 2.2 wird zur Natronlauge Bariumchlorid hinzugefügt, wodurch Bariumcarbonat ausfällt. Ein Gramm des Bariumcarbonatniederschlages wird zur Messung der Aktivität von C-14 in diesem Aliquot im Flüssigkeitsszintillationsspektrometer verwendet.

### **3.2 Probenvorbereitung**

#### **3.2.1 Probenvorbereitung bei Probeentnahme mit Molekularsieb**

Die Apparatur zur Gewinnung des im Molekularsiebbett (siehe Abschnitt 2.1) absorbierten Kohlenstoffdioxides, das C-14 enthält, ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt.

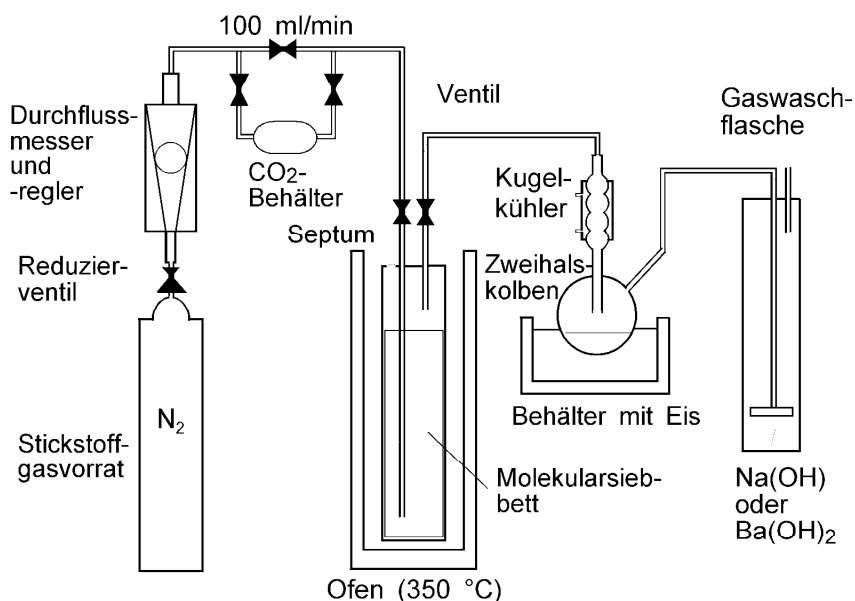
Das Molekularsieb wird aus der Absorberpatrone in einen 1 l-Glaskolben mit durch Ventilen verschließbaren Einlass- und Auslassstutzen und einem Septum umgefüllt.

Wenn das Molekularsieb zur Absorption von Kohlenstoffdioxid nach der Oxidationseinrichtung dient, werden etwa 500 ml Kohlenstoffdioxid aus einem Kohlenstoffdioxidbehälter dem Molekularsieb zugeführt.

Das absorbierte Kohlenstoffdioxid wird aus dem auf 350 °C bis 370 °C erhitzten Molekularsieb (siehe Abschnitt 2.1) mit Stickstoffgas bei einem Volumenstrom von etwa  $0,14 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$  innerhalb von vier Stunden ausgetrieben und über eine Gaswaschflasche (z. B. nach Friedrichs) geleitet, die mit ca. 250 ml kaltgesättigter, frischer Natronlauge gefüllt ist. Bei Luftprobenvolumina über  $2 \text{ m}^3$  wird eine zweite Gaswaschflasche angeschlossen. Vor der Gaswaschflasche ist ein Kugelkühler angebracht, in dem der ebenfalls ausgetriebene Wasserdampf, der Tritium enthält, kondensiert. Auf diese Weise wird das störende Tritium vom C-14 abgetrennt. Der Kohlenstoff im Kohlenstoffdioxid wird als lösliches Natriumcarbonat in der Gaswaschflasche gesammelt. Das in der Lösung vorliegende Carbonat wird im Anschluss wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben als Bariumcarbonat gefällt.

#### **3.2.2 Probenvorbereitung nach Probeentnahme mit Natronlauge**

Bei einer Probeentnahme mit Natronlauge nach Abschnitt 2.2 wird die Natronlauge wie im Abschnitt 3.2.3 angegeben behandelt.



**Abb. 4:** Schematische Darstellung der Apparatur zur thermischen Desorption von Kohlenstoffdioxid aus dem Absorptionsmittel

### 3.2.3 Behandlung der Natronlauge und des gefällten Bariumcarbonates

Der Natronlauge aus Abschnitt 3.2.1 oder 3.2.2 wird in einem hinreichend großen Becherglas unter Rühren das gleiche Volumen Ammoniumchloridlösung ( $1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ) und daraufhin 80 ml Bariumchloridlösung ( $0,5 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ) zugesetzt und der Kohlenstoff als Bariumcarbonat gefällt. Die Lösung wird zur vollständigen Fällung des Bariumcarbonates einige Stunden in dem mit einer Abdeckfolie verschlossenen Becherglas stehen gelassen. Die überstehende Lösung wird dekantiert und der Niederschlag vollständig in Zentrifugengläser bekannter Masse überführt. Die überstehende klare Lösung nach dem Zentrifugieren wird dekantiert und der Niederschlag zweimal mit warmem Wasser gewaschen. Der Niederschlag in den Zentrifugengläsern wird im Trockenschrank bei  $105 \text{ °C}$  getrocknet und seine Masse nach dem Abkühlen bestimmt (6, 8, 9, 10).

Bei der gegenwärtig beobachteten, mittleren Kohlenstoffdioxid-Massenkonzentration in Luft von  $6,8 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  fallen bei vollständiger Absorption des Kohlenstoffdioxides pro Kubikmeter durch das Absorptionsmaterial geleiteter Luft  $2,9 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$  Bariumcarbonat aus.

Um die Lumineszenz bei der Messung zu reduzieren, wird der Bariumcarbonatniederschlag zwei Stunden bei  $350 \text{ °C}$  getrocknet und anschließend in einem Achatmörser fein zerrieben.

#### **Anmerkung:**

Bei beiden beschriebenen Probeentnahme- und Probenvorbereitungsverfahren werden neben Carbonat auch Phosphor- und Schwefelverbindungen, die P-32 oder S-35 enthalten, mit gefällt. Diese Radionuklide stören die Messung auf Grund ihrer geringen Aktivität jedoch im Allgemeinen nicht. Bei höheren Aktivitäten dieser Radionuklide kann C-14 nach Zugabe von Phosphor- und Schwefelträgern durch Ansäuern, z. B. mit Schwefelsäure, als Kohlenstoffdioxid freigesetzt werden, das in Natronlauge erneut absorbiert wird.

## 4 Messung der Aktivität

Ein Gramm des im Mörser zerriebenen Bariumcarbonates wird in ein 20 ml-Zählgläschen eingewogen, mit 18 ml Szintillatorlösung und 1 g feinkörnigem Siliciumdioxidpulver versetzt und verrührt. Das Messpräparat wird üblicherweise drei Minuten im Ultraschallbad behandelt. Sollte die Verteilung des Bariumcarbonates nicht homogen erscheinen, muss das Messpräparat längere Zeit im Ultraschallbad behandelt werden; eventuell muss nochmals gerührt werden. Alternativ zur Verwendung von Siliciumdioxidpulver kann auch 1 g des in einem Porzellanmörser zerriebenen und feinverteilten Bariumcarbonates in ein Zählfläschchen gegeben und 10 ml Szintillatorlösung hinzugefügt werden. In diesem Fall sollte eine Szintillatorlösung auf Pseudocumolbasis mit geringer Viskosität verwendet werden, die das Pulver gut benetzen kann. Nach wenigstens fünfstündigem Abklingen der Chemolumineszenz im Dunkeln und Kühlen (z. B. im Probenraum des Messgerätes) wird die Aktivität von C-14 im Messpräparat mit dem Flüssigkeitsszintillationsspektrometer mehrmals 100 Minuten gemessen. Durch diese mehrfache Messung wird die Messunsicherheit verringert und es kann festgestellt werden, ob noch Chemolumineszenz vorliegt. Bei einigen Flüssigkeitsszintillationsspektrometern ist für diesen Zweck ein Lumineszenzmonitor vorhanden.

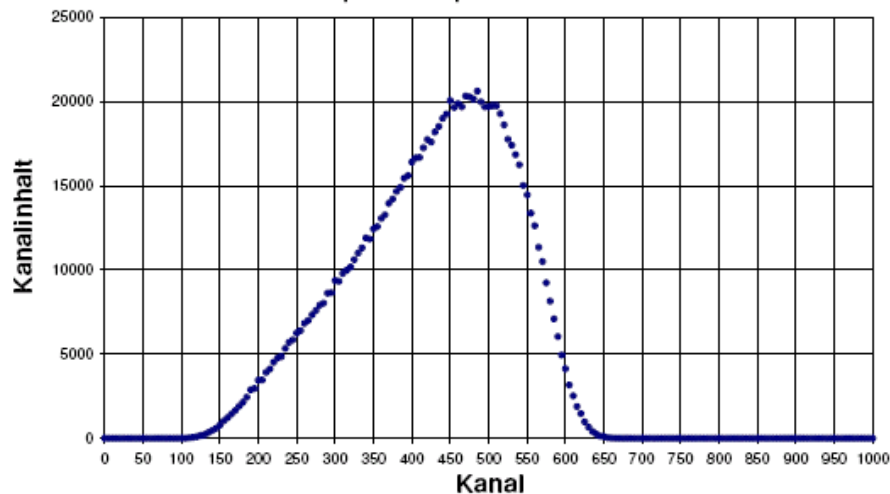
Zur Kontrolle der Messungen und zur Überprüfung und Kalibrierung der Messanordnung werden bei jedem Messdurchlauf eine frisch hergestellte Nulleffektprobe (1 g Bariumcarbonat mit Szintillatorlösung) und ein C-14-Präparat (1 g Bariumcarbonat mit bekannter C-14-Aktivität mit Szintillatorlösung) mit eingesetzt. Das C-14-Präparat wird aus einer C-14-Natriumcarbonatlösung bekannter spezifischer Aktivität durch Zugabe von Bariumchlorid und Fällung hergestellt.

Das Nachweisvermögen  $\varepsilon$  lässt sich als Funktion des Quenchparameters darstellen, die mittels verschieden "gequenchter", mit C-14-Lösungen bekannter Aktivitätskonzentration nach dem gleichen Verfahren wie oben hergestellter Messpräparate bestimmt wurde. Zur Überwachung der Güte jeder Messung wird der Quenchparameter bestimmt, um Abweichungen vom erfahrungsgemäßen Wert feststellen und die Messergebnisse gegebenenfalls korrigieren zu können.

Der Quenchparameter und das Nachweisvermögen  $\varepsilon$  wiesen bei den Messungen erfahrungsgemäß nahezu konstante Werte auf (siehe Verfahren H-C-14-AWASS-01, Abbildung 3). Daher wird für die Bestimmung der Aktivität in den Messpräparaten, bei ähnlichen Werten des Quenchparameters von Messpräparat und C-14-Präparat, der aus der Zählrate und der Aktivität des mit gemessenen C-14-Präparates berechnete Wert des Nachweisvermögens  $\varepsilon$  oder des Kalibrierfaktors  $\varphi_A$  verwendet.

In Abbildung 5 ist ein bei der Messung erhaltenes Impulshöhenspektrum des Flüssigkeitsszintillationsspektrometers dargestellt.





**Abb. 5:** Impulshöhenspektrum bei der Messung der C-14-Aktivität mit einem Flüssigkeitsszintillationsspektrometer

## 5 Berechnung der Analyseergebnisse

### 5.1 Gleichungen zur Berechnung

Die Aktivitätskonzentration von C-14 wird nach Gleichung (1) berechnet:

$$c = \frac{\varphi_A \cdot f_C}{m} \cdot (R_b - R_0) \quad (1)$$

Die relative Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration  $s(c) \cdot c^{-1}$  wird nach Gleichung (2) berechnet:

$$\frac{s(c)}{c} = \sqrt{\frac{\frac{R_b}{t_m} + \frac{R_0}{t_0}}{(R_b - R_0)^2} + \left(\frac{s(\varphi_A)}{\varphi_A}\right)^2 + \left(\frac{s(m)}{m}\right)^2} \quad (2)$$

Dabei bedeuten in den Gleichungen (1) und (2):

- $c$  Aktivitätskonzentration von C-14 in der Luft in  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ;
- $R_b$  Bruttozählrate in  $\text{s}^{-1}$ ;
- $R_0$  Nulleffektzählrate in  $\text{s}^{-1}$ ;
- $t_m$  Messdauer in s;
- $t_0$  Messdauer des Nulleffektes in s;
- $\varphi_A$  Kalibrierfaktor in  $\text{Bq} \cdot \text{s}$ ;
- $f_C$  Umrechnungsfaktor ( $f_C = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );
- $m$  Masse des Bariumcarbonates im Messpräparat in kg;
- $s(c)$  Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration in  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ;
- $s(\varphi_A)$  Standardmessunsicherheit des Kalibrierfaktors in  $\text{Bq} \cdot \text{s}$ ;
- $s(m)$  Standardmessunsicherheit der Masse des Messpräparates in kg.

## 5.2 Rechenbeispiel

Über ein Vierteljahr wurde ein Molekularsieb kontinuierlich mit einem Teilluftstrom der Fortluft eines Kernkraftwerkes bei einem Volumenstrom von  $0,5 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$  durchströmt. Nach vollständiger thermischer Desorption des adsorbierten Kohlenstoffdioxides vom Molekularsieb und nachfolgender Herstellung des Bariumcarbonat-Messpräparates wurde dieses zusammen mit einem C-14-Präparat bekannter Aktivität und einer Nulleffektprobe mehrmals 6000 s gemessen. Nach Ende der Messung liegen für die Berechnung der Aktivitätskonzentration von C-14 folgende Daten vor:

$$\begin{aligned} R_b &= 5 \text{ s}^{-1}; & R_0 &= 0,25 \text{ s}^{-1}; \\ t_m &= 6000 \text{ s}; & t_0 &= 6000 \text{ s}; \\ m &= 0,001 \text{ kg}; & f_c &= 0,0029 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}; \\ \varphi_A &= 1,25 \text{ Bq}\cdot\text{s}; \end{aligned}$$

Der Wert der Aktivitätskonzentration  $c$  von C-14 in der Fortluft beträgt :

$$c = \frac{1,25 \cdot 0,0029}{0,001} \cdot (5 - 0,25) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3} = 17,2 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$$

Bei einer relativen Standardmessunsicherheit der Massenbestimmung des Bariumcarbonates infolge einer unvollständigen Fällung von 5 % und einer relativen Standardmessunsicherheit des Kalibrierfaktors von 5 % gilt:

$$\frac{s(c)}{c} = \sqrt{\frac{\frac{5}{6000} + \frac{0,25}{6000}}{(5 - 0,25)^2} + 0,05^2 + 0,05^2} = 0,071$$

Der zu dokumentierende Wert der Aktivitätskonzentration  $c$  von C-14 in der Fortluft beträgt demnach:

$$c = (17,2 \pm 1,2) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$$

## 5.3 Unsicherheiten der Analyseergebnisse

Die Hauptbeiträge zur Standardmessunsicherheit der Aktivitätskonzentration sind die zählstatistischen Standardmessunsicherheiten der Bruttozählrate und der Nulleffektzählrate, die Standardmessunsicherheit des Kalibrierfaktors sowie die Standardmessunsicherheit der Massenbestimmung des Bariumcarbonates.

## 6 Nachweisgrenzen des Verfahrens

### 6.1 Gleichungen zur Berechnung

Die Nachweisgrenze  $g$  der Aktivitätskonzentration von C-14 in der Fortluft wird gemäß Kapitel IV.5 dieser Messanleitungen nach Gleichung (3) mit den Quantilen  $k_{1-\alpha}$  und  $k_{1-\beta}$  berechnet:

$$g = \frac{\varphi_A \cdot f_C}{m} \cdot \left[ (k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}) \cdot \sqrt{R_0 \cdot \left( \frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_m} \right)} + \frac{(k_{1-\alpha} + k_{1-\beta})^2}{4} \cdot \left( \frac{1}{t_0} + \frac{1}{t_m} \right) \right] \quad (3)$$

### 6.2 Rechenbeispiel

Der Wert der Nachweisgrenze der Aktivitätskonzentration von C-14 beträgt bei dem Beispiel aus Abschnitt 5.1 mit den folgenden Werten für die Quantile  $k_{1-\alpha} = 3$  und  $k_{1-\beta} = 1,645$ :

$$\begin{aligned} g &= \frac{1,25 \cdot 0,0028}{0,001} \cdot \left[ 4,645 \cdot \sqrt{0,25 \cdot \left( \frac{1}{6000} + \frac{1}{6000} \right)} + \frac{21,6}{4} \cdot \left( \frac{1}{6000} + \frac{1}{6000} \right) \right] \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} = \\ &= 3,363 \cdot [4,645 \cdot 0,0091 + 5,4 \cdot 0,0003] \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} = 0,16 \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \end{aligned}$$

## 7 Verzeichnis der erforderlichen Chemikalien und Geräte

### 7.1 Chemikalien

Die verwendeten Chemikalien sollten analysenrein sein.

- Ammoniumchloridlösung,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ :  $1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ;
- Bariumchloridlösung,  $\text{BaCl}_2$ :  $0,5 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ;
- Bariumhydroxidlösung,  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ : kaltgesättigt;
- Siliciumdioxidpulver, feinkörnig: Cab-O-Sil, Fa. Zinsser, Frankfurt/Main;
- Molekularsieb: Porendurchmesser 0,4 nm bis 1,0 nm;
- Natronlauge,  $\text{NaOH}$ :  $1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ;
- Szintillatorlösung: z. B. Quickszint 701; Fa. Zinsser, Frankfurt/Main.

### 7.2 Geräte

- Probeentnahmeeinrichtung;
- Sammeleinrichtung, z. B. Fa. Bonnenberg und Drescher, Aalen;
- übliche Ausrüstung eines radiochemischen Labors;
- Apparatur zur thermischen Desorption;
- Gaswaschflaschen;
- Abdeckfolie, z. B. Parafilm<sup>®</sup>
- Ultraschallbad;
- Zählfläschchen, 20 ml Volumen, aus kaliumarmem Glas;
- Flüssigkeitsszintillationsspektrometer, vorzugsweise Low-level-Ausführung.

## Literatur

- (1) Sicherheitstechnische Regel des Kerntechnischen Ausschusses KTA 1503.1 Messung und Überwachung der Ableitung gasförmiger und aerosolgebundener 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: Probenahmeverfahren. 1987-03  
*Hinweis:* Diese Norm wird voraussichtlich durch die Norm DIN ISO 2889 ersetzt.
- (3) Vogl, K.: Rechnerische Abschätzung der Aerosolpartikelverluste in Probeentnahmesystemen bei kerntechnischen Anlagen: Physikalische Modelle, Vorgehensweise, Ergebnisse und weitere Ausblicke. Fachbereich Strahlenschutz des Bundesamtes für Strahlenschutz, 1992, ST 2-32/1992
- (4) Eickhoff, W., Quecke, C., Putz, W., Neumann, H.: Die Notwendigkeit der isokinetischen Probenahme von dampf- und gasförmigen Emissionen. Staub-Reinhaltung Luft, 1980, Vol 40, Nr. 3, S. 105
- (5) Norm DIN EN 1822 Teil 1 Schwebstofffilter (HEPA und ULPA); Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung. 1998-07
- (6) Gesewsky, P.: Verfahren zur Abtrennung von Kohlenstoff-14 aus der Abluft kerntechnischer Anlagen. Bericht des Institutes für Strahlenhygiene, 1980, ISH-82
- (7) Rudolph, J.: Ein einfaches empfindliches Verfahren zur kontinuierlichen Überwachung von Kohlenstoff-14 und Tritium in der Luft. Institut für Umweltphysik, 1976, Heidelberg, Diplomarbeit
- (8) Riedel, H., Gesewsky, P., Schwibach, J.: Untersuchungen über die Emission von Kohlenstoff-14 mit der Abluft aus Kernkraftwerken Bericht des Institutes für Strahlenhygiene, 1976, STH 13/76
- (9) Riedel, H., Gesewsky, P.: Zweiter Bericht über Messungen zur Emission von Kohlenstoff-14 mit der Abluft aus Kernkraftwerken. Bericht des Institutes für Strahlenhygiene, 1977, STH 13/77
- (10) Winkelmann, I., Gesewsky, P., Vogl, K., Schwibach, J.: Bericht über die Emission von  $^{14}\text{C}$  mit der Abluft aus Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 1978 bis 1981. Bericht des Institutes für Strahlenhygiene, 1982, ISH-10