

Bestimmung der massebezogenen Aktivität von Radionukliden

ÄQUIVAL/MASSAKT

Bearbeiter:

G. Kanisch

M.-O. Aust

F. Bruchertseifer

A. Dalheimer

A. Heckel

S. Hofmann

C. Kowalik

F. Ober

K. Rupprecht

U.-K. Schkade

H. Wershofen

Redaktionsausschuss der Messanleitungen

Bestimmung der massebezogenen Aktivität von Radionukliden

Die Aktivität eines Radionuklids ist als die Anzahl der Kernumwandlungen (Zerfälle) pro Zeiteinheit definiert. Aufgrund des radioaktiven Zerfalls nimmt die Aktivität mit der Zeit ab. Es existieren Fragestellungen, bei denen die Aktivität pro Masse des Radionuklids interessiert. Die Masse des Radionuklids wird über die Anzahl der Atome berechnet. Die Aktivität ist zu jedem Zeitpunkt direkt proportional zur Anzahl der Atome des Radionuklids, wobei die Zerfallskonstante des Radionuklids der Proportionalitätsfaktor ist. Mit Hilfe dieses fundamentalen Zusammenhangs kann aus der Aktivität A die Masse m_r des Radionuklids r und damit die massebezogene Aktivität $a_{m,r}$ des Radionuklids berechnet werden. Diese wird üblicherweise in Bq pro Gramm Radionuklid angegeben.

Anmerkung 1:

Im Unterschied dazu wird bei der Definition der spezifischen Aktivität eines radioaktiven Stoffes $a = A/m$ mit m die Masse des gesamten radioaktiven Stoffes einschließlich aller nicht radioaktiven Beimengungen bezeichnet [1].

Anmerkung 2:

Früher wurde dagegen nur die auf die Masse des Radionuklides r bezogene Aktivität $a_{m,r}$ als spezifische Aktivität bezeichnet.

Die massenbezogene Aktivität wird nach Gleichung (1), die in Anhang A hergeleitet wird, berechnet:

$$a_{m,r} = \frac{A_r}{m_r} = \frac{\ln 2 \cdot N_A}{t_r \cdot M_r} = \frac{4,1742 \cdot 10^{23}}{t_r \cdot M_r} \quad (1)$$

Dabei bedeuten:

- $a_{m,r}$ auf die Masse eines Radionuklids r bezogene Aktivität, in $\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$;
- A_r Aktivität des Radionuklids r , in Bq;
- m_r Masse des Radionuklids r , in g;
- N_A Avogadro-Konstante (Loschmidtsche Zahl): $6,02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$;
- t_r Halbwertszeit des Radionuklids r , in s;
- M_r stoffmengenbezogene Masse des Radionuklids r , in $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$
(der Zahlenwert für M entspricht der Massenzahl eines Radionuklids).

In Tabelle 1 sind für ausgewählte künstliche Radionuklide und in Tabelle 2 für ausgewählte natürliche Radionuklide die massenbezogenen Aktivitäten, wie sie sich nach Gleichung (1) ergeben, zusammengestellt.

In Tabelle 3 sind für ausgewählte Radionuklide deren Massenkonzentrationen angegeben, die einer Aktivitätskonzentration von jeweils $1 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ entsprechen.

Tab. 1: Auf die Masse von ausgewählten künstlichen Radionukliden bezogene Aktivität

Radionuklid	Halbwertszeit [#] t_r	auf die Masse bezogene Aktivität [#] $a_{m,r}$
	in s	in Bq·g ⁻¹
P-32	$1,23 \cdot 10^6$	$1,06 \cdot 10^{16}$
Cr-51	$2,39 \cdot 10^6$	$3,42 \cdot 10^{15}$
Mn-54	$2,70 \cdot 10^7$	$2,87 \cdot 10^{14}$
Co-58	$6,12 \cdot 10^6$	$1,18 \cdot 10^{15}$
Co-60	$1,66 \cdot 10^8$	$4,18 \cdot 10^{13}$
Fe-55	$8,67 \cdot 10^7$	$8,76 \cdot 10^{13}$
Fe-59	$3,84 \cdot 10^6$	$1,84 \cdot 10^{15}$
Ni-63	$3,11 \cdot 10^9$	$2,13 \cdot 10^{12}$
Zn-65	$2,11 \cdot 10^{-7}$	$3,05 \cdot 10^{14}$
Sr-90	$9,09 \cdot 10^8$	$5,10 \cdot 10^{12}$
Tc-99m	$2,16 \cdot 10^4$	$1,95 \cdot 10^{17}$
I-125	$5,13 \cdot 10^6$	$6,51 \cdot 10^{14}$
I-131	$6,93 \cdot 10^5$	$4,60 \cdot 10^{15}$
Cs-134	$6,51 \cdot 10^7$	$4,78 \cdot 10^{13}$
Cs-137	$9,48 \cdot 10^8$	$3,21 \cdot 10^{12}$
Tl-201	$2,63 \cdot 10^5$	$7,90 \cdot 10^{15}$
Pu-238	$2,77 \cdot 10^9$	$6,33 \cdot 10^{11}$
Pu-239	$7,61 \cdot 10^{11}$	$2,30 \cdot 10^9$
Pu-240	$2,07 \cdot 10^{11}$	$8,40 \cdot 10^9$
Pu-241	$4,52 \cdot 10^8$	$3,83 \cdot 10^{12}$
Am-241	$1,37 \cdot 10^{10}$	$1,27 \cdot 10^{11}$
Cm-242	$1,41 \cdot 10^7$	$1,23 \cdot 10^{14}$
Cm-244	$5,72 \cdot 10^8$	$2,99 \cdot 10^{12}$

[#] Bezugsquelle: Laboratoire National Henri Becquerel (siehe Allgemeines Kapitel „KERN DATEN“ dieser Messanleitungen)

Tab. 2: Auf die Masse von ausgewählten natürlichen Radionukliden bezogene Aktivität

Radionuklid	Halbwertszeit [#] t_r in s	auf die Masse bezogene Aktivität [#] $a_{m,r}$ in Bq·g ⁻¹
U-238	$1,41 \cdot 10^{17}$	$1,24 \cdot 10^4$
U-235	$2,22 \cdot 10^{16}$	$8,00 \cdot 10^4$
U-234	$7,48 \cdot 10^{12}$	$2,30 \cdot 10^8$
Th-232	$4,42 \cdot 10^{17}$	$4,07 \cdot 10^3$
Th-230	$2,38 \cdot 10^{12}$	$7,63 \cdot 10^8$
Th-228	$6,04 \cdot 10^7$	$3,03 \cdot 10^{13}$
Ra-228	$1,82 \cdot 10^8$	$1,01 \cdot 10^{10}$
Ra-226	$5,05 \cdot 10^{10}$	$3,66 \cdot 10^{10}$
Ra-224	$3,14 \cdot 10^5$	$5,94 \cdot 10^{15}$
Po-210	$1,20 \cdot 10^7$	$1,66 \cdot 10^{14}$
Pb-210	$7,02 \cdot 10^8$	$2,83 \cdot 10^{12}$
U _{nat} ¹⁾		$2,53 \cdot 10^4$
Th _{nat} ²⁾		$8,14 \cdot 10^3$

Bezugsquelle: Laboratoire National Henri Becquerel (siehe Allgemeines Kapitel „KERNDATEN“ dieser Messanleitungen)

1) Natürliches Uran U_{nat} setzt sich aus den Uranisotopen U-238, U-235 und U-234 zusammen, die in einem definierten Verhältnis zu einander stehen. Die spezifische Aktivität für U_{nat} wird deshalb wie folgt ermittelt:

$$a_{m,U_{nat}} = 0,992745 a_{m,U-238} + 0,0072 a_{m,U-235} + 0,000055 a_{m,U-234}$$

2) Die verwendete Bezeichnung Th_{nat} bezieht sich auf die in der Thorium-Zerfallsreihe vorkommenden Thoriumisotope Th-232 und Th-228, die wiederum in einem durch den radioaktiven Zerfall definierten Verhältnis zueinander stehen [2]. Die spezifische Aktivität von Th_{nat} wird dann für eine unbehandelte, mehr als 60 Jahre alte im radioaktiven Gleichgewicht befindliche Probe als mit relativen Massenanteilen gewichtete Summe der spezifischen Einzelaktivitäten berechnet:

$$a_{m,Th_{nat}} = a_{m,Th-232} + \left(\frac{a_{m,Th-232}}{a_{m,Th-228}} \right) \cdot a_{m,Th-228} = 2 \cdot a_{m,Th-232}$$

Der in Klammern angeführte Wichtungsfaktor wird dabei aus den inversen Werten der spezifischen Aktivitäten $(a_{m,Th-228})^{-1} / (a_{m,Th-232})^{-1}$ berechnet.

Anmerkung:

Bei dem vormals angegebenen Wert von $1,52 \cdot 10^{13}$ Bq·g⁻¹ für Th_{nat} wurden die gleichen Massenanteile angenommen, obwohl Th-228 aufgrund seiner im Verhältnis zu Th-232 kurzen Halbwertszeit so gut wie keinen Massebeitrag liefert.

Tab. 3: Massenkonzentrationen ausgewählter Radionuklide bei einer Aktivitätskonzentration von $1 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$

Radionuklid	Massenkonzentration in $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$
Co-60	$2,4\cdot 10^{-8}$
Ra-226	$2,7\cdot 10^{-5}$
Th-232	246
U-235	13
U-238	81
Pu-240	$1,2\cdot 10^{-4}$

Anmerkung:

Für die Praxis bedeutet dies, dass wegen der relativ hohen Massenkonzentrationen von Th-232, U-235 und U-238 gegenüber anderen Radionukliden diese mittels Massenspektrometrie mit induktiv erzeugtem Plasma (ICP-MS), beispielsweise in Wasser, empfindlicher nachgewiesen werden können als nach der in der Radioaktivitätsmesstechnik zur Bestimmung von Alphastrahlern üblichen Methode der Alphaspektrometrie.

Literatur

- [1] DIN 6814-4:2006 *Begriffe in der radiologischen Technik – Teil 4: Radioaktivität.*
- [2] Walz, K. F., Schötzig, U.: *Natürlich radioaktive Substanzen als Aktivitätsnormale.* PTB-Ra-23. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1989. ISBN 3-88314-966-7.

Anhang A

Herleitung der auf die Masse bezogenen Aktivität

In diesem Anhang wird die Vorgehensweise bei der Berechnung der massebezogenen Aktivität eines Radionuklids aufgezeigt.

A.1 Gesetz des radioaktiven Zerfalls

Das Gesetz des radioaktiven Zerfalls lautet gemäß Gleichung (A1):

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda_r \cdot N \quad (\text{A1})$$

mit

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda_r \cdot t} \quad (\text{A2})$$

Dabei bedeuten:

- N Anzahl der Atome des Radionuklids r ;
- N_0 Anzahl der Atome des Radionuklids r zum Zeitpunkt $t = t_0$;
- λ_r Zerfallskonstante des Radionuklids r , in s^{-1} ;
- t Zeitdauer, in s.

A.2 Aktivität eines Radionuklids

Die Aktivität eines Radionuklids A_r wird nach den Gleichungen (A3) und (A4) berechnet:

$$A_r = \lambda_r \cdot N \quad (\text{A3})$$

mit

$$\lambda_r = \frac{\ln 2}{t_r} \quad (\text{A4})$$

Dabei bedeuten:

- A_r Aktivität des Radionuklids r , in Bq;
- t_r Halbwertszeit des Radionuklids r , in s.

A.3 Stoffmengenbezogene Masse

Die stoffmengenbezogene Masse M ist in Gleichung (A5) definiert als:

$$M = \frac{m}{n} \quad (\text{A5})$$

Dabei bedeuten:

- M stoffmengenbezogene Masse, in $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$;
 m Masse des Stoffes, in g;
 n Stoffmenge, in mol.

Die Masse m eines Systems aus N Atomen wird nach Gleichung (A6) berechnet:

$$m = N \cdot m_a \quad (\text{A6})$$

wobei m_a die Masse eines Atoms oder eines Moleküls in g ist.

Aus den Gleichungen (A5) und (A6) folgt Gleichung (A7):

$$M = \frac{m}{n} = \frac{N}{n} \cdot m_a = N_A \cdot m_a \quad (\text{A7})$$

mit der Avogadro-Konstanten $N_A = N/n$, d. h. N_A ist gleich der Anzahl N der Atome oder Moleküle in einem Mol Stoffmenge.

Damit folgt gemäß Gleichung (A8):

$$m_a = \frac{M}{N_A} \quad (\text{A8})$$

Anmerkung:

m_a kann in der Einheit u (atomare Masseneinheit) angegeben werden. Das heißt, der Zahlenwert von M in $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ist gleich dem Zahlenwert der Teilchenmasse in u (Massenzahl des Isotops).

A.4 Auf die Masse bezogene Aktivität eines Radionuklids

Die Aktivität eines Radionuklids mit der Masse m_r wird ausgehend von den Gleichungen (A3), (A6) und (A8) gemäß Gleichung (A9) berechnet:

$$A_r = \lambda_r \cdot \frac{m_r \cdot N_A}{M} \quad (\text{A9})$$

Für die Masse m_r von einem Gramm, d. h. für die auf die Masse eines Radionuklids bezogene Aktivität $a_{m,r}$ gilt dann unter Berücksichtigung von Gleichung (A4) die Gleichung (A10):

$$a_{m,r} = \frac{4,1742 \cdot 10^{23}}{t_r \cdot M_r} \quad (\text{A10})$$