

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

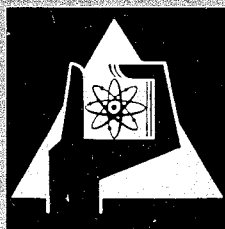
September 1967

KFK 677

Abteilung Strahlenschutz und Dekontamination

Tritiummessungen im Strahlenschutz

R. Maushart



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

R. MAUSHART, Karlsruhe*)

Tritiummessungen im Strahlenschutz

Tritium ist – sieht man von den in der Bestrahlungstechnik verwendeten Multi-Curie-Quellen ab – das meist verwendete Radio-Isotop. Infolge seiner geringen Energie (max. Energie 18 keV) weist dieses Nuklid erhebliche meßtechnische Probleme auf. Tritium, das als Wasserdampf inkorporiert wird, erscheint in außerordentlich kurzer Zeit nahezu vollständig im Blut, mit ein Grund, weswegen dieses Nuklid auch im Strahlenschutz ein besonderes Gewicht erhält. Neben einigen spezifischen Eigenschaften des Tritiums werden spezielle Meßverfahren diskutiert und hinsichtlich ihrer jeweiligen Eignung verglichen.

Tritium Measurements in Radiation Protection

Tritium – apart from the multi-curie sources used in radiation technique – is the most frequently used radioisotope. Due to its low energy (maximum energy = 18 keV), this nuclide demonstrates substantial problems of measuring technique. Tritium is incorporated as water vapour and will show in an extremely short interval in the blood. This is one more reason why its importance in radiation protection should not be underestimated. Apart from some specific properties of tritium, the paper discusses special measuring procedures, comparing them to their specific aptitudes.

Mesures de tritium pour la protection contre les radiations

Le tritium – abstraction faite des sources multi-curie employées dans la technique d'irradiation – représente le radio-isotope le plus utilisé. Par suite de sa petite énergie (énergie maxima 18 keV), cette nucléide démontre de considérables problèmes du secteur de la technique des mesures. Le tritium est incorporée sous guise de vapeur d'eau, et en peu de temps on le trouve dans le sang. Ceci est une raison de plus d'observer attentivement cette nucléide dans la protection contre les radiations. Ensuite l'article traite de quelques propriétés spécifiques du tritium qui sont comparées avec leurs aptitudes.

1. Eigenschaften von Tritium

1.1 Vorkommen und Verwendung

Tritium ist ein Wasserstoffisotop mit einer Halbwertszeit von 12,26 Jahren. Es sendet in 100% aller Zerfälle eine weiche β -Strahlung mit einer Maximalenergie von 18 keV aus. Tritium entsteht in der Atmosphäre auf natürliche Weise über eine n,T-Reaktion des stabilen Stickstoffisotops N-14 in einer Menge von etwa 1 MCi pro Jahr. Der natürliche atmosphärische Tritiumgehalt hat sich durch die Fusionsbombenversuche erheblich erhöht; bei der Explosion einer solchen Bombe entstehen etwa 10 MCi Tritium pro Megatonne TNT [1].

In der Kernindustrie tritt Tritium hauptsächlich in Reaktoranlagen auf, wo es durch die Neutronenbestrahlung von schwerem Wasser, Helium und Lithium gebildet wird (Tabelle 1, [2]). In der wissenschaftlichen und industriellen For-

schung hat es fast unbegrenzte Anwendungsmöglichkeiten in verschiedenen physikalischen, chemischen und biologischen

Tabelle 1: Erzeugung von Tritium durch Neutronenbestrahlung ($10^{12}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$, ein Monat lang) [2]

Element	Vorkommen	Tritium $\mu\text{Ci/g}$
H-2 (Deuterium)	natürliches Wasser	10^{-4}
	natürlicher Wasserstoff	10^{-3}
	Schweres Wasser	0,7
He-3	Luft	5×10^{-5}
	Helium	56
Li-6	Lithium	$0,75 \times 10^6$

*) Herr Dr. R. Maushart ist Leiter des Strahlenmeßdienstes im Kernforschungszentrum Karlsruhe.

Formen. Weiterhin wird es für die Lichterregung in Leuchtphosphoren benutzt.

Infolge der geringen Strahlungsenergie ist die äußere Strahlenbelastung vernachlässigbar. Tritium tritt hauptsächlich als Tritium-Gas (TD oder TH) und Tritiumoxyd oder tritiiertes Wasser (T_2O , TDO oder THO) auf. Die zulässige Konzentration für Tritium in Luft liegt nach ICRP [3] für die Erscheinungsform des Wasserdampfs wesentlich niedriger als für die Gasform ($5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ per 40-Stunden-Woche gegenüber $2 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$). Da außerdem Tritiumgas bei freier Diffusion in der Luft und auf Oberflächen rasch oxydiert, ist die weitaus gefährlichere Form der Wasserdampf.

1.2 Verhalten von Tritium im Körper

Untersuchungen haben gezeigt, daß Tritium in der Form von Wasserdampf von Arbeitern ohne besondere Schutzkleidung zu etwa gleichen Teilen durch Lunge und Haut mit einer Geschwindigkeit von 15 bis 20 μCi Tritium/min pro μCi Tritium/l Luft aufgenommen wird. Das Tritium aus eingeatmetem Wasserdampf erscheint bereits nach etwa 10 min zu 99 % im Blut [4], während der durch die Haut aufgenommene Anteil sich mit Halbwertszeiten von 20 bis 50 min in der Körperflüssigkeit verteilt [5]. Die biologische Halbwertszeit der Ausscheidungen liegt bei etwa 10 Tagen [6–8]. Jedoch scheint auch eine längerlebige, möglicherweise organisch gebundene Tritiumkomponente im Körper zu existieren [9, 10].

Die dem Körper durch das inkorporierte Tritium verabfolgte Dosis hängt von der Masse ab, in der sich das Tritium befindet. Diejenige Menge Tritium, die ein Dosisäquivalent von 100 mrem pro Woche hervorruft, wenn sie ständig im Körper vorhanden ist, beträgt 1,2 mCi verteilt in den 43,4 kg Körperwasser eines Mannes von 70 kg Gesamtgewicht. Bei Vorhandensein dieser Menge finden sich demnach in den Ausscheidungen 28 μCi pro Liter Urin. Infolge der relativ gut bekannten Aufnahmerate von Tritium in den Körper beim Arbeiten in tritiumhaltiger Atmosphäre und der zumindest in den ersten Tagen und Wochen nach Inkorporation einfachen Ausscheidungsfunktion, kann der Zusammenhang zwischen Tritiumkonzentration in Luft, Arbeitszeit und Tritiumkonzentration in den Körperausscheidungen angegeben werden (Abb. 1, [11]).

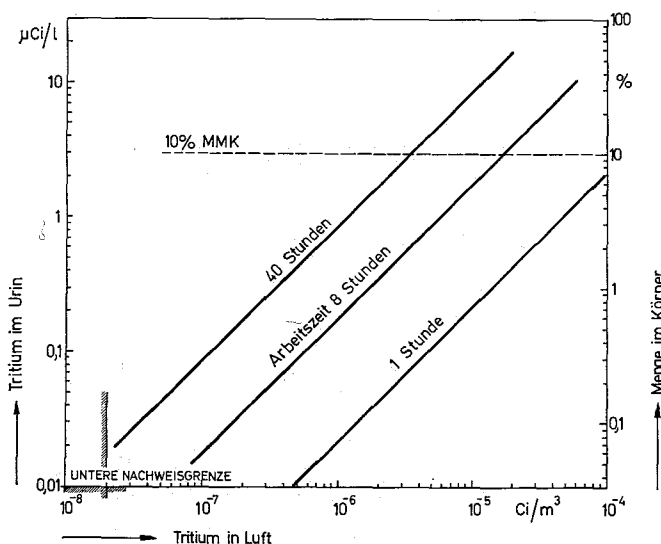


Abb. 1 Tritiumgehalt im Körper und im Urin in Abhängigkeit von der Tritiumkonzentration in Luft (Wasserdampf) für verschiedene Arbeitszeiten bei Personen ohne Schutzkleidung [11]

Der Strahlenschutz beim Umgang mit Tritium erhält sein besonderes Gepräge dadurch, daß infolge der chemischen Natur und der geringen Strahlungsenergie des Tritiums eine spezielle und ausgefeilte Meßtechnik notwendig wird, um eine Gefährdung des Menschen durch Tritium rechtzeitig zu erkennen und ihr Ausmaß mit genügender Genauigkeit bestimmen zu können. Im folgenden soll ein Überblick über den derzeitigen Stand der Tritium-Meßtechnik im Strahlenschutz gegeben werden.

2. Messung von Tritium in Luft

2.1 Allgemeines

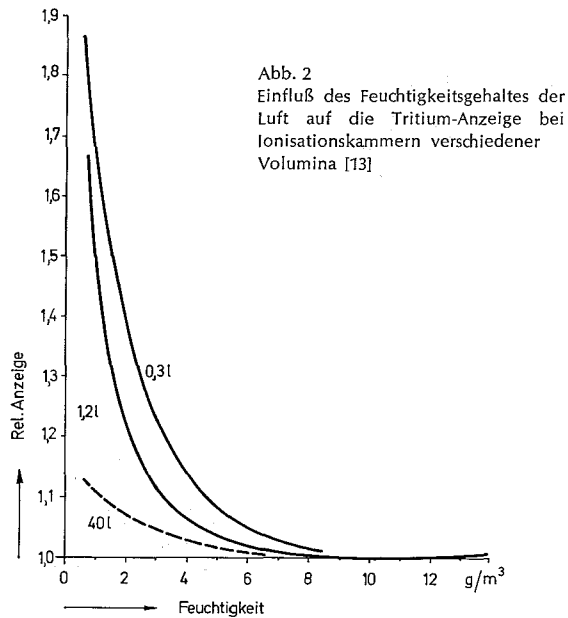
Infolge der gas- oder dampfförmigen Natur des Tritiums und der hohen Inkorporationswahrscheinlichkeit ist eine Tritium-Luftüberwachung mit einer Empfindlichkeit zumindest in der Größenordnung der zulässigen Konzentration ($6 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ für die 40-Stunden-Woche nach der Ersten Strahlenschutzverordnung [12]) erforderlich, wo Tritiummengen von mehr als etwa 100 mCi vorhanden sein können oder mit ihnen umgegangen wird. Die Urinuntersuchung von Beschäftigten kann dadurch zwar nicht ersetzt, aber doch ihre Häufigkeit verringert werden.

Bei der Messung von Tritium in Luft treten eine ganze Reihe technischer Schwierigkeiten in stärkerem Maße als bei den anderen Strahlern auf. Sie liegen einmal in der Erfassung des Tritiums selbst; zum anderen in der Ausschaltung von störenden Einflüssen.

Die weiche Strahlung bringt es mit sich, daß keine Fensterzähler verwendet werden können, sondern daß das Tritium in den Zählraum selbst hineingebracht werden muß. Man kann entweder die Luft direkt durch den Detektor strömen lassen oder man holt den Wasserdampf durch geeignete Methoden aus der Luft heraus, um ihn getrennt zu messen, wobei vorausgesetzt wird, daß ein wesentlicher Anteil des Tritiums als Wasserdampf vorliegt. Vor allem für die Anwendung bei Reaktoren sollte die Meßmethode in der Lage sein, gegenüber anderen gasförmigen Strahlern in der Luft, z. B. Ar-41, zu diskriminieren. Das Meßgerät sollte außerdem eine möglichst geringe Empfindlichkeit der Anzeige gegenüber äußeren γ -Feldern besitzen oder ihre Wirkung durch Differenzbildung kompensieren. Man kann jedoch auch beide Einflüsse bewußt mit in die Messung einbauen derart, daß für die zulässige Konzentration der einzelnen radioaktiven Edelgase (z. B. Ar-41 2×10^{-6}) ebenso wie für die Toleranzdosisleistung eines äußeren γ -Feldes gerade der gleiche Anzeigewert erreicht wird wie für die zulässige Tritiumkonzentration [13]. Dann wird aus der Not eine Tugend und aus dem Tritium-Meßgerät eine Art Universalmonitor, der unabhängig von ihrer Ursache die momentane Gefährdung der Beschäftigten anzeigt.

Eine weitere für die Tritiummessung typische Erscheinung ist der sog. Memory-Effekt, der durch die innere Kontamination des Meßgerätes mit Tritium entsteht. Diese Erscheinung kann vor allem bei zeitweiligem Auftreten höherer Tritiumkonzentrationen eine erhebliche Behinderung oder Verfälschung der Messungen mit sich bringen [14–16]. Man muß dabei unterscheiden zwischen einer momentanen Erhöhung der Meßempfindlichkeit und einem verzögerten Abklingen der Anzeige bei nachlassender Tritiumkonzentration. Der erste Effekt wird durch Adsorption des tritiierten Wasserdampfes an den Innenwänden des Detektors selbst hervorgerufen. Seine Höhe hängt von den Detektorabmessungen (Verhältnis Wandfläche zu Volumen), den verwendeten Materialien und der relativen Feuchtigkeit der Meßluft ab. Wegen der relativ großen Wandfläche sind hier kleinvolumige Ionisationskammern als Detektor am ungünstigsten, Proportionalzähler mit

dünnen Drähten als Elektroden am günstigsten. Als kontaminationsunanfälliger Werkstoff wird für die Innenseite der Kammerwand Stahl oder Goldauflage vorgeschlagen [14, 29]. Der Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf die Messung bei verschiedenen Ionisationskammer-Volumina ist in Abb.2 [13] gezeigt.



Die Abklingverzögerung wird außer durch die Detektor-kontamination wesentlich vom übrigen Aufbau des Meßgerätes, wie Pumpen, Durchflußmesser, Schläuche und Aerosolfiltern, bestimmt und ist deshalb für Ionisationskammern und Proportionalzähler gleichermaßen vorhanden. An diesen Teilen adsorbierter Wasserdampf wird nur langsam wieder abgeführt und täuscht so tritium-kontaminierte Außenluft vor. Alle Zusatzgeräte sollten daher nach Möglichkeit hinter dem Detektor angebracht sein. Die Zuluft muß durch Filtrierung von grobem Staub gereinigt werden, ohne daß am Filter Wasserdampf adsorbiert wird. Auch durch die Verwendung von wasserabstoßenden Filtermaterialien läßt sich hier immer nur ein Kompromiß erreichen; zwar wird durch den geringen Wasserdampfanteil, der im Filter zurückbleibt, die Messung nicht nennenswert verfälscht, doch kann das Filter als Wasserdampf-Reservoir für den Memory-Effekt eine entscheidende Rolle spielen. Bei allen Luftmonitoren ist nach Auftreten größerer Tritiumkonzentrationen eine Spülung mit feuchter Luft notwendig, wenn die untere Empfindlichkeitsgrenze der Messung rasch wieder erreicht werden soll.

2.2 Kontinuierliche Messung

2.2.1 Ionisationskammern

Die einfachste Methode ist die, Luft nach entsprechender Reinigung von groben Stäuben durch eine Ionisationskammer hindurchzusaugen und den Ionisationsstrom zu messen [14, 16, 17]. Wo es auf einfache Geräte in großer Stückzahl, z. B. bei militärischen Einrichtungen [18], ankommt, sind Ionisationskammern am häufigsten in Gebrauch. Sie haben jedoch eine Reihe von Nachteilen, die dazu geführt haben, daß man sich seit einigen Jahren in zunehmendem Maße anderen Meßmöglichkeiten zugewendet hat. Die Nachteile sind einmal die relativ geringe Empfindlichkeit trotz großem Kammer-volumen (einige $10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ für etwa 10 Liter Kammerinhalt), dann die Unmöglichkeit, auf physikalische Art und Weise gegenüber anderen radioaktiven Edelgasen zu unterscheiden (Messung des Ionisationsstroms, daher keine Impulshöhendiskriminierung oder ähnliches möglich) und die Emp-

findlichkeit gegenüber Änderungen im γ -Untergrund. Weiterhin können Fremdionen in der Luft stören, die nicht durch Radioaktivität entstanden sind. Die Notwendigkeit einer Ionenfalle wird jedoch von den einzelnen Autoren verschieden beurteilt. Sie ist jedenfalls wegen der unvollständigen Rekombination um so wichtiger, je größer der Luftdurchsatz wird; bis zu 30–40fachem Luftwechsel pro Stunde in der Kammer kann man ohne Ionenfalle auskommen [14]. Unbedingt erforderlich ist sie dann, wenn ein besonderes Ionisationsvolumen vor der eigentlichen Meßkammer verwendet wird [17]. Die γ -Empfindlichkeit kann man dadurch verringern, daß man mit einer zweiten Kompensationskammer arbeitet, deren Ausgangsstrom von dem der Meßkammer abgezogen wird. Während frühere Geräte zwei getrennte Kammern benutzten, die einen Kompensationsabgleich infolge der Richtungsabhängigkeit sehr schwierig machten [19, 20], enthalten moderne Geräte zwei ineinander gebaute Kammern, die einen besseren Kompensationsfaktor ergeben [13].

Eine andere Anlage arbeitet dadurch tritium-spezifisch, daß der Kompensationskammer zuvor getrocknete Luft zugeführt wird, so daß die Differenz der Anzeigen der Wasserdampf-Tritium-Aktivität entspricht [21]. Durch diese Art der Kompensierung wird auch der Einfluß der natürlichen Luftaktivität auf die Messung vermindert, die bei einfachen Ionisationskammern eine Anzeige entsprechend etwa $1 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ Tritium ergibt, so daß ihre Schwankungen bereits das Ergebnis verfälschen können.

Eine Zusammenstellung der Daten von Ionisationskammern zur Tritiummessung ist in Tabelle 2 gegeben.

Tabelle 2: Kennwerte von Ionisationskammern zur kontinuierlichen Tritiummessung in Luft

Literatur	Unkompensierte Ionisationskammern			γ -kompensierte Ionisationskammern		
	[17]*	[16]	[14]	[13]		
Kammer-volumen l	46	18,5	9,8	40	1,2	0,3
Luftdurchsatz l/min	1500	50–100	30	36	3	3
kleinster Meßbereich $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$				$0-7,5 \times 10^{-6}$	$0-5 \times 10^{-5}$	$0-2 \times 10^{-4}$
Nachweisgrenze $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	2×10^{-6}	5×10^{-6}	$\approx 5 \times 10^{-6}$			
Anstiegszeit auf 90 % des Meßwertes min				2,5	1	0,5
Abfallzeit auf 10 % des Meßwertes min				3	1	0,5
γ -Feld, das eine $5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ Tritium entspr. Anzeige gibt mR/h	0,06	0,05		2,5	2,5	2,5
Vielfaches der Ar-41-Toleranz (2×10^{-6}), das eine $5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ Tritium entspr. Anzeige gibt	0,25		0,25			
Kalibrierfaktor $A/\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	5×10^{-8}	$1,5 \times 10^{-8}$	8×10^{-9}	$3,8 \times 10^{-8}$		

*) Ionisierungsvolumen vor der eigentlichen Meßkammer

2.22 Szintillationszähler

Der Wunsch, bei erhöhter Tritiumempfindlichkeit besser gegen γ -Strahlung und gasförmige Strahler in der Meßluft diskriminieren zu können, hat zur Entwicklung eines Gerätes mit Szintillationsdetektor geführt. Ein Plastikszintillator in Spiralform wird als Meßkammer verwendet. Die verschiedenen Impulshöhen von Tritium und anderen β -Strahlern ebenso wie durch das äußere γ -Feld machen eine elektronische Diskriminierung möglich [22]. Die Eigenschaften des Gerätes sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Kenndaten eines Meßgerätes mit Szintillatorkammer zur kontinuierlichen Tritiummessung in Luft [22]

	ohne γ -Kompensation	mit γ -Kompensation durch Impulshöhendiskriminierung
Meßvolumen l	0,07	
Luftdurchsatz l/min	5	
Meßbereich $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-3}$ log.	
Nachweisgrenze $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	$\sim 1 \times 10^{-6}$	
Anstiegszeit auf 90 % des Meßwertes min	1	
Abfallzeit auf 10 % des Meßwertes min	5	
γ -Feld, das eine $5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ Tritium entspr. Anzeige gibt mR/h	0,1	1,5
Vielfaches der Ar-41-Toleranz (2×10^{-6}), das eine $5 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ Tritium entsprechende Anzeige gibt	nicht angegeben	
Kalibrierfaktor $\text{ipm}/10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$	30	

2.23 Proportionalzählrohre

Infolge der Möglichkeit zur Impulshöhen- und Reichweiten-diskriminierung und der damit verbundenen Untergrundunterdrückung liegt es nahe, als Detektoren für besonders meßempfindliche Tritiummonitore Proportionalzählrohre zu verwenden. Das Haupthindernis liegt darin, daß Luft nicht unmittelbar als Zählgas benutzt werden kann, so daß man eine Gasversorgung, meist Methan, benötigt. Dieses Zählgas wird der auszumessenden Luft zu einem gewissen Prozentsatz beigemischt [23].

Moderne Detektorstrukturen [24] und die Anwendung von Antikoinzidenzzählvolumina [25,26] haben die Eigenschaften von Proportionalzählern zur Tritiummessung in der letzten Zeit erheblich verbessert, so daß der Proportionalzähler heute das empfindlichste Meßgerät zur kontinuierlichen Tritiummessung in Luft bei gleichzeitig recht guten Eigenschaften in bezug auf interne und externe Diskriminierung darstellt [27]. Man findet recht verschiedene Detektorstrukturen, von denen in Abb. 3 verschiedene Ausführungen im Schema gezeigt sind [27].

Die Zählräume sind stets so angeordnet, daß eine möglichst allseitige Abschirmung erreicht wird, wobei die Trennung zwischen Meß- und Schirmzähler nicht durch Wandmaterial, sondern durch ein Massengitter aus einzelnen Drähten erfolgt. Die Abmessungen des Meßzählers sind klein genug, um β -Teilchen mit wesentlich größerer Reichweite als die des Tritiums noch in den Schirmzähler gelangen zu lassen. Ihre Impulse werden durch eine Antikoinzidenzschaltung unterdrückt, so daß Tritium spezifisch gemessen wird.

Als Verbesserung der Methode kann man in einfacher Weise durch Differenzkompensation den Einfluß sowohl von gasförmigen β -Strahlern als auch des äußeren γ -Feldes auf den Untergrund weiter herabsetzen [24, 27].

Als Kompensationsgröße kann die Impulsrate der im Meß- und Schirmzähler koinzidenten Ereignisse benutzt werden. Dazu ist allerdings außer dem Differenzratemeter eine zusätzliche Koinzidenzstufe im Elektronikteil notwendig. Um sie einzusparen, kann die Differenzbildung auch mit der reinen Zählrate des Schirmzählers erfolgen. Dabei tritt zwar ein Meßfehler auf, da auch solche Teilchen, die nur im Schirmzähler einen Impuls auslösen, vom Meßeffect subtrahiert werden. Der Fehler ist aber in der Praxis nicht größer als 5 % [24].

Das Verhältnis zwischen Koinzidenz- und Antikoinzidenzrate hängt von der Energie der β -Teilchen ab. Dieser Effekt kann dazu benutzt werden, die gasförmigen β -Strahler in Luft zu identifizieren [27].

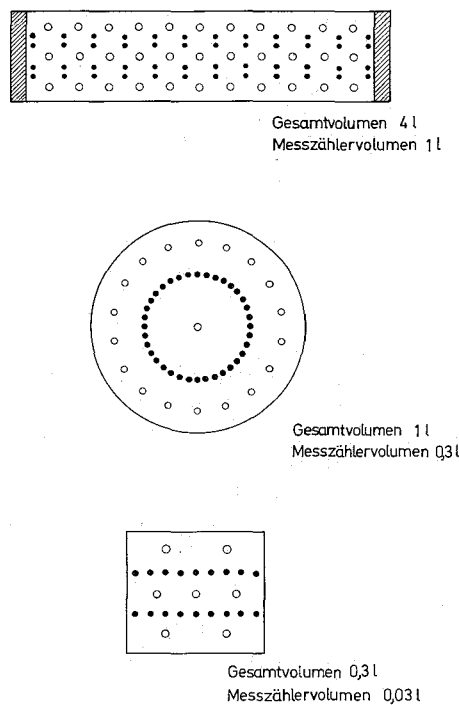


Abb. 3 Schematischer Aufbau von Proportionalzählern zur Tritiumüberwachung in Luft [27]: o Anodendraht (Zählrohr), ● Kathodendraht

Aus Gründen des Zählgasverbrauchs ist der Luftdurchfluß bei den Proportionalzählern erheblich niedriger als bei im Volumen vergleichbaren Ionisationskammern (bei einem Methanfluß von 25 l/h reicht eine Druckflasche von 20 l/200 atü für eine Woche Zählerbetrieb). Daraus ergibt sich gemäß dem langsamen Luftwechsel im Zählvolumen eine längere Ansprechzeit bis zur vollen Zählrate.

Zwar sind Luftbeimischungen von 30–50 % noch möglich, doch verschlechtern sich dann die Zähleigenschaften, was zu instabilem Betrieb führen kann. Man arbeitet daher mit 10–20 % Luftzusatz [27]. Wo, wie zum Beispiel in Reaktorkernen, die Verwendung von Methan wegen seiner Explosivität verboten ist, wird Argon mit 10 % Methan als Zählgas verwendet.

Die Eigenschaften im einzelnen sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Kenndaten von Proportionalzählrohren zur kontinuierlichen Tritiumüberwachung in Luft [27]

	Abschirm. 2,5 cm Pb	Abschirm. 2 cm Pb	keine Abschirmung
Gesamtvolumen l	4	1	0,3
Meßzählervolumen l	1	0,2	0,03
Gasdurchfluß l/min	~ 0,33	~ 0,4	~ 0,4
Luftanteil %	20	22	22
Nachweisgrenze pCi/cm ³	5×10 ⁻⁸	1×10 ⁻⁷	5×10 ⁻⁷
Anstiegszeit auf 50 % des Meßwertes min	14	8	
γ-Feld, das eine 5×10 ⁻⁶ μCi/cm ³ Tritium entspr. Anzeige gibt mR/h		unkom- kom- pensiert pensiert 1,4 10	
Vielfaches der Ar-41- Toleranz (2×10 ⁻⁶), das eine 5×10 ⁻⁶ μCi/cm ³ Tritium entspr. Anzeige gibt	1	0,75	2,5
Kalibrierfaktor ipm/10 ⁻⁶ μCi/cm ³	350	90	9,5
Nulleffekt (unkompensiert) ipm	25	10	3-5

2.24 Kontinuierliche Flüssigkeitsabscheidung

Alle bekannten Kompensations- und Diskriminierungsverfahren mindern zwar den Einfluß von gasförmigen Störstrahlern teilweise erheblich, können ihn aber nicht gänzlich ausschalten.

Zur vollständig spezifischen Tritiummessung bleibt daher nur übrig, den Wasserdampf aus der Luft abzuscheiden und die Tritiumaktivität im Kondensat zu messen. Dazu ist eine kontinuierliche Methode entwickelt worden [28], die durch Wasserkondensation bei +1° C einen Kondensatanfall von 10 g/ Stunde liefert. Als Meßzelle wird eine mit Anthrazen-Kristallen gefüllte Plastikkammer benutzt, die allerdings bei kontinuierlichem Betrieb infolge Verschmutzung von Zeit zu Zeit ausgewechselt werden muß. Der Detektor ist mit 7,5 cm Blei abgeschirmt. Zur Kompensation des γ-Untergrundes kann die Anzeige von eingebauten Geiger-Müller-Zählrohren verwendet werden. Die Eigenschaften der Anlage sind in Tabelle 5 aufgeführt.

2.3 Diskontinuierliche Messung

In Fällen, in denen stichprobenartige Messungen für den Strahlenschutz ausreichen oder wo an einer großen Anzahl von verschiedenen Stellen gemessen werden muß, wird man sich mit wesentlich weniger aufwendigen diskontinuierlichen Methoden begnügen. Die Messung kann wiederum direkt oder nach Wasserabscheidung aus der Luft erfolgen.

2.31 Füllzählrohre bzw. Ionisationskammern

Die Probe wird entweder direkt mittels evakuierter Ionisationskammern oder Zählrohren genommen, oder sie wird aus dem Probenahmegefäß, einer Glas- oder Plastikflasche von einigen Litern Inhalt, in den Detektor übergeführt. Ionisationskammern sind die billigsten Geräte zur Direktmessung, besonders, wenn man nicht den Ionisationsstrom mißt, sondern mittels Elektrometer die Entladungszeit bestimmt [29]. Sie sind jedoch wenig empfindlich (1-l-Kammer 5×10⁻⁶ μCi/cm³ mit 25 % Genauigkeit in 1 h Meßzeit [30]) und die Messung ist nicht tritium-spezifisch. So können sie dort nicht

verwendet werden, wo, wie z. B. in Leuchtfarbenfabriken, ein erhöhter Rn-Gehalt in der Luft vorliegen kann [31]. Ein typischer Anwendungsfall für die einfache Messung mit Ionisationskammern ist dagegen etwa die Messung der DTO-Kontamination an in Fässern gelagertem Schwerwasser [32].

Tabelle 5: Kenndaten eines Meßgerätes mit kontinuierlicher Wasserabscheidung zur Tritiummessung in Luft [28]

Luftdurchsatz l/min	75
Meßbereich μCi/cm ³	10 ⁻⁷ – 10 ⁻³ log
Nachweisgrenze μCi/cm ³	4×10 ⁻⁷
Anstiegszeit	nicht angegeben
Abfallzeit auf 10 % des Meßwertes min	3 min (Spülen mit dest. Wasser)
γ-Feld, das eine 5×10 ⁻⁶ μCi/cm ³ Tritium entspr. Anzeige gibt mR/h	30 (7,5 cm Bleiabschirmung)
Vielfaches der Ar-41-Toleranz (2×10 ⁻⁶), das eine 5×10 ⁻⁶ μCi/cm ³ Tritium entspr. Anzeige gibt	∞
Kalibrierfaktor ipm/10 ⁻⁶ μCi/cm ³	300
Nulleffekt ipm	360

Bei Proportionalzählrohren [33, 34] muß eine entsprechende Menge Zählgas beigemischt werden. Hier hat man den Vorteil, bei der Ausmessung alle üblichen Mittel der Nulleffektreduktion, wie starke Abschirmung und Antikoinzidenzmeßanlagen, ausnutzen zu können. Die Nachweisempfindlichkeit beträgt für ein Zählrohr von 0,2 l Volumen etwa 1×10⁻⁷ μCi/cm³ [34], doch ließe sie sich durch entsprechenden Aufwand sicher noch bis zu einer Größenordnung steigern.

2.32 Wasserabscheidung

Hierbei sind 3 Methoden gebräuchlich:

- 1) Ausfrieren des Wasserdampfs [35]
- 2) Absorption des Wasserdampfs an einem hygroskopischen Salz [36]
- 3) Durchsaugen der Luft durch einen wassergefüllten „Bubbler“ [31]

In allen Fällen erfolgt die Ausmessung am einfachsten im Flüssigszintillationszähler. Dabei ist die erste Methode die teuerste, die letzte Methode die ungenaueste. Man wird daher bei einer großen Anzahl von Proben bevorzugt die zweite Methode benutzen.

Als Salze werden hauptsächlich CaCl₂ und LiCl verwendet. Entweder pumpt man die Luft durch eine Trockenflasche, die mit den genannten Salzen gefüllt ist oder man setzt diese einfach solange der Luft aus, bis sie anfangen zu zerfließen. Um die Wasserextraktion aus dem feuchten Salz zu beschleunigen, wird eine Xylol-Destillation verwendet [36]. Aus der Gewichtszunahme des Salzes und der relativen Feuchtigkeit läßt sich die Tritiumaktivität in Luft mit guter Genauigkeit bestimmen.

Bei Reaktoren kann das Problem auftreten, Tritium als Gas und Wasserdampf in einer weitaus stärker durch Spaltgase und Spaltprodukte kontaminierten Atmosphäre bestimmen zu müssen. Hierzu wird eine Methode angegeben, bei der nach Entnahme einer Luftprobe der tritiierte molekulare Wasserstoff oxidiert, eventuell vorhandene wenig stabile Metalltritiide zerstört und zusammen mit dem zuvor an

Silicagel adsorbierten tritiierten Wasserdampf erfaßt werden. Die Messung erfolgt in Flüssigszintillationszählern mit einer Meßempfindlichkeit von $1 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ [38].

3. Messung von Tritium in Flüssigkeiten

Zur Routinearbeit des Strahlenschutzes gehört die Bestimmung von Tritium in Abwässern kerntechnischer Anlagen; dazu kommt die Messung des Tritiumgehaltes in Kreisläufen, insbesondere solchen mit Schwerwasser, von Reaktoren, um die Möglichkeit einer Tritiuminkorporation bei Reparaturarbeiten oder bei Undichtwerden abschätzen zu können, und die Kontrolle der Niederschläge im Rahmen der Umgebungsüberwachung.

An erster Stelle bei der Tritiumüberwachung stehen jedoch Inkorporationsmessungen durch Bestimmung des Tritiumgehaltes im Urin bei Reaktorpersonal und bei allen sonstigen Beschäftigten, die mit Tritium umgehen oder sich in einer tritiumhaltigen Atmosphäre aufgehalten haben können. Zur genauen Bestimmung der Körperbelastung aus den Urinwerten muß der Inkorporationszeitpunkt und die Art der Inkorporation (einmal oder chronisch) bekannt sein [11]. Deshalb ist regelmäßige Urinkontrolle notwendig, so daß meist laufend eine große Anzahl von Proben aufgearbeitet werden muß.

Das übliche Meßverfahren ist die Flüssigszintillationsmeßmethode. Sie ist heute zu einer solchermaßen allgemein verwendeten Standardmethode nicht nur im Strahlenschutz, sondern vor allem auch in der medizinischen und biologischen Forschung geworden, daß auf die eigentliche Meßtechnik an dieser Stelle nicht mehr näher eingegangen, sondern für den interessierten Leser nur auf zwei Bibliographien, [39,40], ein Symposium [41] und eine Übersicht [42] hingewiesen werden soll.

Die Nachweisempfindlichkeit der Flüssigszintillationsmessung reicht für alle Strahlenschutzmessungen bei weitem aus. Man vermag ohne Schwierigkeit noch etwa $1/1000$ der zulässigen Abwasserkonzentration ($3 \times 10^{-2} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$) und – über die Urinausscheidung – der zulässigen Menge im Körper nachzuweisen.

Die früher häufig verwendeten Methoden der Umwandlung des Tritiumoxyds in die Gasphase mit anschließender Ausmessung in Ionisationskammer oder Zählrohr sind fast immer unempfindlicher, umständlicher und im routinemäßigen Strahlenschutz daher heute kaum noch in Gebrauch. Sie werden dann eingesetzt, wenn solche Flüssigkeiten vorliegen, deren Verschmutzung oder chemische Zusammensetzung keine Mischung im Szintillator zuläßt oder wenn hohe Konzentrationen anderer radioaktiver Nuklide als Tritium vorhanden sind, die eine Tritiummessung im Flüssigszintillator unmöglich machen und auch durch einfache Destillation nicht abgetrennt werden können.

3.1 Flüssigszintillationsmessung

Der große Vorteil dieser Methode ist der, daß flüssige Proben in der Regel direkt ohne vorherige Aufbereitung zur Messung gelangen können und daß nur wenige ml Probenmenge notwendig sind. Decolorierung [43, 44] oder Destillierung [45] von Urin ist nur bei höchsten Genauigkeits- und Empfindlichkeitsansprüchen erforderlich [46]. Die Meßgeräte sind vom Standpunkt des Anwenders her in der letzten Zeit insofern verbessert worden, als durch Verwendung neuer Photomultiplier die Messung bei Raumtemperatur möglich wird [47–49]. Außerdem ermöglicht die Methode der relativen Kalibrierung und Quenchfaktorbestimmung durch externen Standard [50], auf das umständliche und zeitraubende Versetzen der Ein-

zelprobe mit bekannten Tritiummengen zu verzichten. Durch Dreifachkoinzidenz [51] kann, wenn auch mit nicht unerheblichem elektronischen Aufwand, die Bestimmung des Wirkungsgrades durch eine Art statistischer Analyse der pro Lichtblitz entstehenden Photonenzahl auch ohne radioaktiven Standard gleichzeitig mit der Aktivitätsmessung des Tritiums erreicht werden.

Gerade bei der Tritiumbestimmung im Urin wird oft großer Wert auf schnelle und einfache Messung gelegt, um das Personal, das die Routineauswertungen durchführen muß, zu entlasten und um nach Unfällen so rasch wie möglich zu Ergebnissen zu kommen, wobei es auf die maximale Empfindlichkeit weniger ankommt. Beim normalen Flüssigszintillationsverfahren werden außer einer kurzen Meßzeit vor allem automatische Szintillator-Portionierer für die einzelnen Meßfläschchen [46] oder ganze Proben-Szintillatormischer eingesetzt. Das derzeit am weitesten entwickelte Gerät dieser Art ist ein „Self Service“-Urinmonitor, der keinerlei manuelle Handhabung der Probe mehr erfordert [52]. Der Urin wird vom Toilettenbecken weg gesammelt und der Tritiumgehalt nach 2 min im Meßbereich von 0,3 bis 3000 $\mu\text{Ci}/\text{l}$ entsprechend der 0,01- bis 100fachen der zulässigen Menge im Körper angezeigt.

Eine weitere technisch weniger aufwendige Möglichkeit, die Urinmessung zu beschleunigen, ist die Verwendung einer Meßzelle mit detergentienüberzogenen Anthrazen-Kristallen an Stelle des Flüssigszintillators [53]. Die Nachweisempfindlichkeit beträgt bei 3 ml Probenmenge etwa 0,5 $\mu\text{Ci}/\text{l}$ und läßt sich nach Angabe der Autoren noch verbessern.

Wo, wie z. B. bei Messungen in Niederschlägen, eine besonders niedrige Nachweisgrenze erforderlich wird, muß das Tritium in verhältnismäßig mühsamer Weise durch Isotopentrennung mittels elektrolytischer oder Thermodiffusionsmethoden angereichert werden. Ein etwas einfacheres Verfahren der Aufkonzentrierung von Tritium im Probenvolumen besteht darin, die Tritiumatome in den Benzolring einzubauen [54, 66] und das so hergestellte Benzol direkt als Lösungsmittel für den Szintillator zu verwenden. Die untere Nachweisgrenze der Flüssigszintillationsmessung wird dadurch um den Faktor 10 bis 20 herabgesetzt.

3.2 Überführung in die gasförmige Phase

Die einfachste Methode, die ohne chemische Probenaufbereitung auskommt, besteht darin, den Wasserdampf unmittelbar der Argon-Alkohol-Füllung eines Geiger-Müller-Zählrohrs zuzusetzen [55]. Bei 60 min Zählzeit wird für Probenmengen von 0,5 ml eine Nachweisgrenze von 20 $\mu\text{Ci}/\text{l}$ erreicht. Bei kontinuierlicher Beimischung des Wasserdampfs zum Zählgas eines Proportionalzählers kann im ständigen Betrieb noch eine Tritiumkonzentration von 0,1 $\mu\text{Ci}/\text{l}$ nachgewiesen werden [26].

Der nächste Schritt ist die Erzeugung von Wasserstoff durch Auftropfenlassen des Wassers auf metallisches Kalzium. Mit der Ionisationskammer als Detektor lassen sich 10 $\mu\text{Ci}/\text{l}$ [56], mit dem Geiger-Müller-Zählrohr 1 $\mu\text{Ci}/\text{l}$ noch nachweisen [57]. Durch die Herstellung von Azetylen [58] oder Methan werden noch niedrigere Nachweisgrenzen möglich.

Schließlich erhält man durch radiogaschromatographischen Nachweis des Tritiums eine Methode, die weit empfindlicher als die Flüssigszintillationsmessung und schneller und einfacher als elektrolytische oder Thermodiffusionsmethoden ist. Die Probemenge beträgt 50 ml Wasser, die Meßzeit ist einschließlich Wasserstoffbildung und Zählung im Proportionalzählrohr kleiner als 4 Stunden. Die erreichbare Empfindlichkeit liegt unterhalb $3 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{l}$ [59].

4. Messung von Tritiumkontamination auf Oberflächen

Infolge der kurzen Reichweite der Tritium- β -Strahlung von wenigen mm in Luft und der entsprechend hohen Selbstabsorption bei schmutzigen, rauhen oder porösen Oberflächen gleicht die Erfassung der Tritiumkontamination im Labor oder gar auf der Haut mehr einer Kunst als einem Handwerk. Spezielle Geräte zur Bestimmung einer Tritiumoberflächenkontamination sind kaum im Handel; meist werden selbstgebaute oder modifizierte kommerzielle Detektoren, z. B. solche zur Gaschromatographie, verwendet [34]. Fensterlose Ionisationskammern, die auf die Oberfläche aufgesetzt werden [60], können zwar mit Luft betrieben werden und benötigen keine Zählgasversorgung, sind aber relativ unempfindlich (Nachweisgrenze etwa 10 000 Zerfälle/min). Gewöhnlich werden Geiger-Müller- [61] oder Proportionalzählrohre [34, 62, 26] mit Zählgasdurchfluß benutzt (Nachweisgrenze einige 100 Zerfälle/min), die entweder einen schmalen Schlitz haben, dessen Ränder als Kathode dienen, oder mit einer größeren Öffnung bei mehreren Zähldrähten die auszumessende Oberfläche berühren. Bei den berührungslosen Blendenzählern ist innerhalb eines Abstandes bis zu 2 mm die Anzeige relativ konstant, da das elektrische Feld durch die Blende hindurchgreift und auch negative Ladungsträger in das Gebiet der Gasverstärkung hineinzieht [34].

Die Diskriminierung gegenüber anderen Aktivitäten ist mühsam; sie kann noch am einfachsten durch Differenzmessung mit einer dünnen Fensterfolie erreicht werden. Die Direktmessung der Kontamination kann fast nur bei ebenen Oberflächen erfolgen. In anderen Fällen müssen die Messungen durch Wischtests oder durch Abwaschen der Kontamination mit einer organischen Flüssigkeit ausgeführt werden, wobei man am besten eine Verbindung benutzt, die direkt als Szintillatorlösung Verwendung finden kann.

Die Kontamination auf der menschlichen Haut kann nur annähernd durch Abwaschen und anschließendem Untersuchen des Waschwassers im Flüssigszintillationszähler erfaßt werden.

5. Messung von Tritium im biologischen Material

Bei der Umgebungsüberwachung kerntechnischer Anlagen oder Tritium verarbeitender Industrien und auch bei der Untersuchung des Tritiumgehaltes in der Biosphäre als Folge der Fusionsbombentestexplosionen muß Tritium in biologischem Material, vor allem in Pflanzen, Milch und Fleisch, bestimmt werden. Die ganze notwendige Meßtechnik ist ausschließlich eine Angelegenheit der Probenaufbereitung. In der Literatur findet sich darüber wenig [63, 64, 37], obschon die Extraktion des Wassers aus den Pflanzen in der nötigen Menge von einigen ml und in so reiner Form, daß die Beimischung zum Szintillator möglich wird, in der Praxis erhebliche Schwierigkeiten bereitet. Spuren von organischen Bestandteilen können sowohl durch Eigenfluoreszenz, als auch durch Löschen die Flüssigszintillationsmessung völlig unproduzierbar machen.

Die beste zur Zeit bekannte Destillationsmethode scheint die Xylol-Extraktion zu sein, bei der die Probe im Destillierkolben zusammen mit Xylol angesetzt und überdestilliert wird [37]. Zur Ermittlung des Tritiumgehaltes der Frischpflanze muß noch der Wassergehalt durch Trocknen und Wiegen bestimmt werden. Zwar wird auf diese Weise nicht das organisch gebundene Tritium erfaßt. Da jedoch die Pflanzen in frischem Zustand zu etwa 90 % aus Wasser bestehen, dürfte der Fehler zumindest für die Umgebungsüberwachung vernachlässigbar sein.

Ein höchst einfaches Routineverfahren zur Wassergewinnung aus Frischpflanzen besteht darin, sie unmittelbar nach der Sammlung in Plastikbeuteln einzuschweißen. Innerhalb weni-

ger Stunden sammelt sich genügend Schwitzwasser an, das unmittelbar oder gegebenenfalls nach normaler Destillation zur Messung verwendet wird [65].

Literatur

- [1] ROULIN, J.: Contamination par le Tritium a partir de l'atmosphere, in: Seminaire sur la protection contre les dangers du Tritium, Le Vésinet, 1964, S. 5
- [2] BRAMATI, L.: Production of Tritium in Nuclear Reactors, in: Seminaire sur la protection contre les dangers du Tritium, Le Vésinet, 1964, S. 28
- [3] Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation ICRP Publication 2, Pergamon Press, 1959
- [4] BLOOM, J.: Laboratory and clinical Medicine 55, 1960, S. 164
- [5] OSBORNE, R. V.: Absorption of tritiated water vapour by people, Health Physics 12, 1966, S. 1527
- [6] BUTLER, H. L., LEROY, J. H.: Observation of biological half-life of Tritium, Health Physics 11, 1965, S. 283
- [7] BUTLER, H. L.: AEC Research and Development Report DP-831, 1962, S. 38
- [8] REINIG, W. C., ALBENESIUS, E. L.: Control of Tritium Health Hazards at the Savannah River Plant, Am. Ind. Hyg. Ass. Journ. 24, 1963, S. 276
- [9] REINIG, W. C., SANDERS, S. M.: Assessment of Tritium in Man, Paper presented at the Symp. Diagnosis and Treatm. Depos. Radio-nucl. May 15-17, 1967, Richland, Wash.
- [10] SEELENTAG, W.: Private Mitteilung, 1967, Berlin
- [11] MAUSHART, R.: Accuracy of methods and interpretation of results of H-3 monitoring, Paper pres. Symp. on Radiation Dose Measurements, Stockholm, 1967
- [12] Neufassung der 1. Strahlenschutzverordnung vom 15. 10. 65 Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 61, S. 1653
- [13] OSBORNE, R. V., COWPER, G.: The detection of Tritium in air with ionisation chambers. AECL-2604, 1966
- [14] SOUDAIN, G.: Detection et mesure de la contamination par le Tritium des gaz et vapeurs, in: Seminaire sur la protection contre les dangers du Tritium, Le Vésinet, 1964, S. 53
- [15] FRY, R. M.: The calibration of flow ionisation chambers for Tritium monitoring in air, AERE-M-429, 1959
- [16] HOY, J. E.: Operational experience with Kanne ionisation chambers, Health Physics 6, 1961, S. 203
- [17] BRINKERHOFF, J., ZIEGLER, C. A., BERSIN, R., CHLECK, D. J.: Continuous air monitor for H-3, Nucleonics 17, No. 2, 1959, S. 76
- [18] BAKER, R. P., RICHARDS, D.: Reliable and versatile instrumentation for detection of tritium hazard designed for military application, Health Physics 13, 1967, S. 926 (abstract)
- [19] ANTHONY, J. D.: Portable Tritium monitor has gamma compensation, Nucleonics 17, 1959, No. 4, S. 110
- [20] COWPER, G., SIMPSON, S. D.: A monitor for airborne Tritium, AECL-1049, 1960
- [21] KOWALSKY, E.: Messung der Radioaktivität der Luft, Atomwirtschaft 7, 1962, S. 481
- [22] SANNES, F., BANVILLE, B.: A portable Tritium in air monitor, AECL-2283, 1965
- [23] DRIVER, G. E.: Tritium survey instruments, Rev. Sci. Instr. 27, 1956, S. 300
- [24] DREUTLER, U.: Strahlenschutzmeßtechnik, Kerntechnik, Isotopentechnik und -chemie 8, 1966, S. 367
- [25] EHRET, R., KIEFER, H., MAUSHART, R.: Fortschritte bei der kontinuierlichen Tritium-Überwachung in Luft, Direct Information 2/63, Braun-Verlag Karlsruhe, 1963
- [26] KIEFER, H., MAUSHART, R.: Kontinuierliche Tritium-Überwachung in Luft und Wasser, in: Seminaire sur la portection contre les dangers du Tritium, Le Vésinet, 1964, S. 83
- [27] EHRET, R.: Proportional flow counters for measurement of Tritium in air, Symp. Instr. and Techniques for the assessm. airborne radio-act. nucl. operat. IAEA Wien, 1967
- [28] GIBSON, J. A. B., BURT, A. K.: A method for continuous measurement of tritiated water in air, J. Nucl. Energy, Parts A/B, Vol. 20, 1966, S. 185
- [29] ZIEGLER, C. A., SCHWEBEL, A.: Technique for monitoring tritiated water vapour in air, Nucleonics 15, No. 1, 1957, S. 64
- [30] LITTLE, G. A.: Ionisation chamber air sampling system for Tritium, HW-SA-2413, 1962
- [31] DANNECKER, A., SPITTEL, H.: The measurement of the Tritium concentration in air, Symp. Instr. Techni. assessm. airborne. radioact. in nucl. operat. IAEA Wien, 1967
- [32] FRY, R. M.: Monitoring of D₂O for Tritium contamination, AERE-M-428, 1959
- [33] SIMON, H., BERTHOLD, F.: Die Messung weicher β -Strahler in der Gasphase, Atomwirtschaft 7, 1962, S. 498

- [34] BERTHOLD, F.: Meßgerät für Tritium, in: Seminaire sur la protection contre les dangers du Tritium, Le Vésinet, 1964, S. 67
- [35] IYENGAR, T. S., SADARANGANI, S. H., SOMASUNDARAM, S., VAZE, P. K.: A cold strip apparatus for sampling Tritium in air, Health Physics 11, 1965, S. 313
- [36] DARUSCHY, P.: Über die Bestimmung von tritiumhaltigem Wasserdampf in Luft, Atompraxis 12, 1966, S. 301
- [37] DARUSCHY, P.: Eine schnelle und einfache Methode zum Nachweis von Tritium in biologischem Material, Atompraxis 11, 1965, S. 273
- [38] PATIGNY, P.: Detection et mesures de la contamination par le Tritium des gaz et vapeurs, in: Seminaire sur la protection contre les dangers du Tritium, Le Vésinet, 1964, S. 62
- [39] FOSKETT, A. C.: Tritium detection and measurement, A Bibliography, AERE-Bib-132, 1961
- [40] MCKNOWN, D. A.: Health Physics Bibliography on Tritium, LAMS-2946, 1964
- [41] Tritium in the Physical and Biological Sciences, Proc. Symp. Vienna, 1961
- [42] RAPKIN, E.: Messung mit flüssigen Szintillatoren, Atomwirtschaft 7, Nr. 10, 1962, S. 508
- [43] LANGHAM, W. H., EVERSOLE, W. J., HAYES, F. N., TRUJILLO, T. T.: Assay of Tritium activity in body fluids with use of a liquid scintillation system, J. Laboratory and Clin. Medicine 47, 1956, No. 5, S. 819
- [44] OKITA, G. T., SPRATT, J., LE ROY, G. V.: Nucleonics 14, 1956, S. 76
- [45] WERBIN, H., CHAIKOFF, I. L., MILES, R. I.: Proc. Soc. exptl. Biol. Med. 102, 1959, S. 8
- [46] BUTLER F. E.: Assessment of Tritium in production workers, in: Assessment of Radioactivity in Man, Vol. II, S. 431, IAEA Wien, 1964
- [47] HUTCHINSON, W. P.: Liquid scintillations counting of Tritium at 22° C, AERE-R-3238, 1960
- [48] SANDALLS, J.: A method for routine determinations of Tritium in urine using a coincidence liquid scintillation counter, AERE-R-3716, 1961
- [49] HODGSON, T. S., GORDON, B. E., ACKERMAN, M. E.: Single channel counter for C-14 and Tritium, Nucleonics 16, Nr. 7, 1958, S. 89
- [50] HIGASHIMURA, T., et al.: External Standard method for the determination of the efficiency in liquid scintillation counting, Intern. J. Appl. Rad. and Isotopes 13, 1962, S. 308
- [51] SCHWERDTEL, E.: Neuere Entwicklungen bei der Flüssig-Szintillator-Meßtechnik, Kerntechnik 8, 1960, S. 517
- [52] OSBORNE, R. V.: Monitoring for H-3 at low levels, Symp. Instr. and Techniques for the assessm. airborne radioact. nucl. operat., IAEA Wien, 1967
- [53] MYERS, L. S., ROSENBLUM, C.: A rapid method for determining Tritium water in urine following acute exposure, Health Physics 9, 1963, S. 354
- [54] PIETIG, F., SCHARPENSEEL, H. W.: Altersbestimmung mit dem Flüssig-Szintillations-Spektrometer – ein neuer Katalysator zur Benzolsynthese, Atompraxis 12, 1966, S. 95
- [55] FRY, R. M.: The determination of Tritium as water vapour in a GM counter, AERE-R-2867, 1959
- [56] EUTSLER, B. C., ROBBINS, M. C., HIEBERT, R.: A portable apparatus for the determination of H-3 in body fluids and aqueous solutions, LA-1894, 1966
- [57] McCLELLAND, J., MILLIGAN, M. F.: Determination of H-3 in urine and water, LA-1645, 1954
- [58] FRY, R. M.: Tritium in urine monitoring by the Acetylene flow ion chamber method, AERE-HP/R 2858, 1959
- [59] HOY, J. E.: Tritium measurement by gas-solid chromatography, Health Physics 13, 1967, S. 933 (abstract)
- [60] COLVIN, D. W.: A simple monitor for H-3 contamination on surfaces, DP-242, 1957, Savannah River Laboratory
- [61] KASSAKER, D. G.: A monitor for surface adsorbed Tritium, DP-34, 1959 Savannah River Laboratory
- [62] BOULENGER, R., GOURSKI, E., KOCH, G.: Detection de contamination de surface, in: Seminaire sur la protection contre les dangers du Tritium, Le Vésinet, 1964, S. 98
- [63] STEEL, G. G.: Inst. J. Appl. Radiat. 9, 1960, S. 94
- [64] BUCHANAN, D. L., CORORAN, B. J.: Analyt. Chem. 31, 1959, S. 1635
- [65] DIERKES, L.: Private Mitteilung, Kernforschungszentrum Karlsruhe
- [66] TAMERS, M., BIBRON, R., DELIBRIAS, G.: A new method for measuring low level Tritium using a benzene liquid scintillator, in: Tritium in the Physical and Biological Sciences, IAEA Wien, 1962, S. 303