



**KfK 4444**  
**September 1988**

# **Strahlenschutz: Eine aktuelle und stetige Aufgabe**

**Kolloquium der  
Hauptabteilung Sicherheit  
Kernforschungszentrum Karlsruhe  
23. Juni 1988**

**Redaktion:  
M. Urban, W. Koelzer  
Hauptabteilung Sicherheit**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH  
HAUPTABTEILUNG SICHERHEIT

KfK 4444

## Strahlenschutz: Eine aktuelle und stetige Aufgabe

Kolloquium der Hauptabteilung Sicherheit  
Kernforschungszentrum Karlsruhe  
23. Juni 1988

Redaktion: M. Urban, W. Koelzer



Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

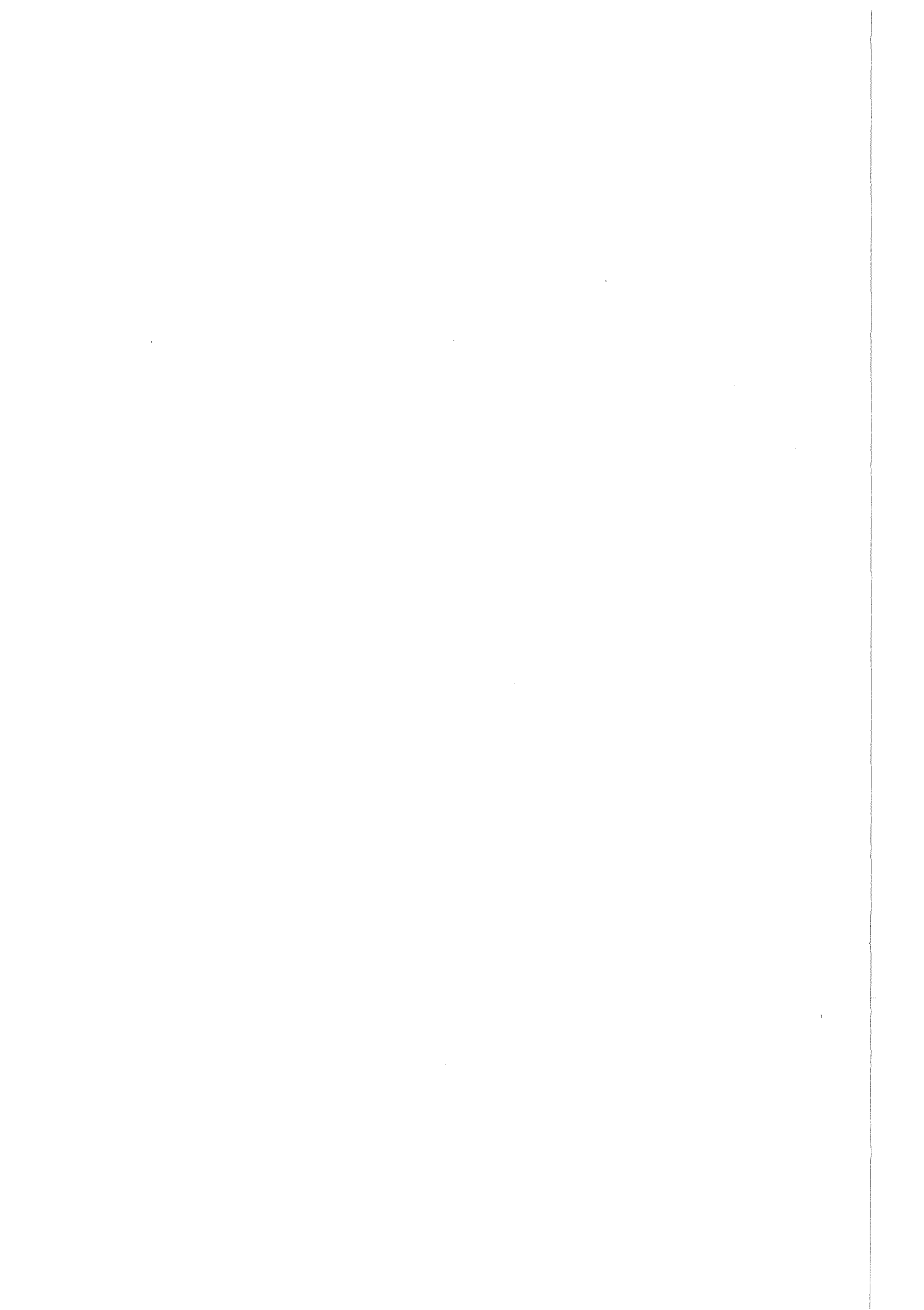


Herrn Professor Dr. Hans Kiefer

zum 65. Geburtstag

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
Eröffnung und Begrüßung H. Böhm	3
Proportionalzählrohre: Physik, Technik, Anwendung im Strahlenschutz R. Maushart	5
Tritium in der Nahrungskette L. A. König	43
Phosphatglasdosimeter - das Routinedosimeter der Zukunft? E. Piesch	69
Current Radiological Protection Issues in the UK R. H. Clarke	95
Betrachtungen zum Strahlenkrebsrisiko: Epidemiologische Beobachtungen und Extrapolationsmodelle W. Jacobi	115
Molekulare Basis der biologischen Strahlenwirkung H. Dertinger	117
Zur in vivo-Messung von Transuranen H.-R. Doerfel	127
Strahlenschutzmedizinische Probleme aus der Sicht der Berufsgenossenschaften K. Renz	143
Panel-Schlußwort H. Kiefer	151
Teilnehmerliste	155



**Eröffnung und Begrüßung  
H. Böhm**

**Vorsitzender des Vorstands  
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH**

Ich darf Sie im Kernforschungszentrum Karlsruhe sehr herzlich zu diesem Symposium begrüßen. Ich freue mich, daß die Initiative der Hauptabteilung Sicherheit eine so große Resonanz gefunden hat, sowohl hinsichtlich der hervorragenden Redner, als auch was die große Zahl von Besuchern, anbetrifft die zu diesem Symposium nach Karlsruhe gekommen sind.

Meine Damen und Herren, ich glaube, für viele von uns ist Strahlenschutz eine alltägliche Selbstverständlichkeit, aber sicherlich zugleich Zeit auch ein permanenter Ansporn für eine stetige Verbesserung und für eine weitere Entwicklung. Sie werden mir zustimmen, daß in kaum einem anderen Bereich der Schutz der Bevölkerung und der Beschäftigten vor möglichen Schäden so konsequent und zugleich so wissenschaftlich fundiert erfolgt wie beim Umgang mit Strahlen. Nirgendwo anders ist die Vorsorge so ausgeprägt wie im Bereich des Strahlenschutzes.

Wenn dennoch große Teile der Bevölkerung mit einer rational sicherlich nicht zu begreifenden und durch Medien wohl nachdrücklich geförderten und durch politischen Druck verstärkten Strahlenfurcht leben oder von ihr erfaßt sind, dann ist dies von unserem Standpunkt aus sehr zu bedauern. Dies aber sollte Sie nicht zu resignativem Verhalten veranlassen, sondern im Gegenteil, Sie sollten verstärkt darauf hinarbeiten, Aufklärungsarbeit in der Öffentlichkeit zu leisten. Ängste sind sehr leicht und ohne jegliche Fachkenntnis in die Öffentlichkeit zu übertragen. Unberechtigte Ängste abzubauen, erfordert nicht nur einen hohen Grad an Fachkenntnis, sondern auch eingehende Überzeugungskraft. So sind die meisten von Ihnen, die heute zu diesem Symposium hier versammelt sind, nicht nur Wissenschaftler, nicht nur Techniker, sondern zwangsläufig auch mehr oder weniger in der Öffentlichkeitsarbeit Tätige, um die notwendige Aufklärungsarbeit zu leisten.

Einer, für den dieses in ganz besonderem Maße zutrifft, ist Herr Professor Kiefer, der Leiter unserer Hauptabteilung Sicherheit. Auch wenn diese Veranstaltung,

wie Sie ja aus der Einladung entnehmen können, kein offizielles Kolloquium zu Ehren von Herrn Kiefer ist, so wissen Sie jedoch alle, daß er in den wohlverdienten Ruhestand geht und dieser für uns bedauerliche Umstand Anlaß für dieses Symposium ist. Die große Beteiligung an der heutigen Veranstaltung ist sicher nicht nur ein Zeichen des Interesses an Strahlenschutzfragen, an Fragen der Strahlenmeßtechnik oder den biologischen Einwirkungen der Strahlen, sie ist insbesondere auch als Zeichen der großen Hochachtung Ihnen gegenüber, Herr Kiefer, zu werten. Ich darf mich hier ganz persönlich uneingeschränkt in den Kreis derjenigen einreihen, die Ihnen Hochachtung und Wertschätzung entgegenbringen. Ich möchte darauf hinweisen, daß mit Ihnen, Herr Kiefer, nicht nur einer der angesehensten Strahlenschützer der Bundesrepublik in den Ruhestand geht, sondern auch einer der dienstältesten Mitarbeiter des Kernforschungszentrums. Sie gehören mit zu den ersten Mitarbeitern dieses Zentrums und haben hier bereits 1956 begonnen, Strahlenschutzmaßnahmen einzuleiten. Dies unterstreicht die Bedeutung, die wir von vornherein dem Strahlenschutz und der Strahlenmeßtechnik beigemessen haben.

Sie haben in diesen mehr als 30 Jahren mit bewundernswertem Engagement und Stetigkeit nicht nur den Strahlenschutz im Kernforschungszentrum zu seiner heutigen Bedeutung und Größe auf- und ausgebaut, Sie haben auch bemerkenswerte wissenschaftliche Leistungen erbracht und über Jahre hinweg im Hochschulbereich die Ausbildung in Fragen des Strahlenschutzes und der Strahlenmeßtechnik vorangetrieben und auf die Ausbildung der technischen Assistentinnen und Assistenten ausgedehnt.

Dienstleistung, Forschung, Lehre und Öffentlichkeitsarbeit waren für Sie, lieber Herr Kiefer, gleichermaßen wichtige Aufgaben, denen Sie sich mit Hingabe und Engagement gewidmet haben. Hierfür darf ich Ihnen unseren herzlichen Dank und unsere Anerkennung aussprechen.

Ihnen, meine Damen und Herren, wünsche ich eine interessante Tagung. Sie möge dazu beitragen, die Kenntnisse auf dem Gebiet des Strahlenschutzes, der Strahlenmeßtechnik und der biologischen Wirkung der Strahlen zu vertiefen, in der Hoffnung, daß damit auch ein weiterer Schritt getan wird, die rationale Basis in der öffentlichen Diskussion über Strahlenschutz zu verbreitern. Nochmals: herzlich willkommen im Kernforschungszentrum. Ich wünsche Ihnen eine angenehme Veranstaltung.

# **Proportionalzählrohre: Physik, Technik, Anwendung im Strahlenschutz**

**Dr. Rupprecht Maushart**

**Labor Berthold, Wildbad**

**Juni 1988**

## **Zusammenfassung**

Proportionalzählrohre werden häufig als eine Art Übergang zwischen Ionisationskammer und Auslösezählrohr betrachtet. Diese Ansicht wird durch die in vielen Lehrbüchern übliche Darstellung der Impulshöhen-Abhängigkeit von der Spannung gestützt. Wie jedoch die nähere Betrachtung der physikalischen Vorgänge im Zählrohr zeigt, ist die angelegte Spannung keineswegs das einzige Kriterium dafür, ob ein Zählrohr im Proportional- oder im Auslösebereich arbeitet. Für den praktischen Betrieb bestimmend sind vielmehr die Entstehung und Absorption von UV-Fotonen im Zählgas einerseits, und die Auslösung von Elektronen durch die positiven Ionen an der Kathode andererseits. Dies wird im ersten Teil dieser Arbeit dargestellt und daraus Folgerungen für die konstruktiven Merkmale und den sicheren Betrieb von Proportionalzählrohren abgeleitet.

Aber auch bei der praktischen Anwendung in der Strahlenschutzmeßtechnik erweist sich das Proportionalzählrohr als eigenständige Detektorart. Die mögliche Vielfalt der Bauformen und die günstigen meßtechnischen Eigenschaften haben diesem Zählrohrtyp breite Einsatzgebiete erschlossen, die im zweiten Teil des Aufsatzes aufgelistet und an Hand von Einzelbeispielen näher erläutert werden. Abschließend folgt ein kurzer Ausblick auf zukünftige Entwicklungstendenzen.

## **Summary**

Proportional counters are frequently considered to be just a kind of transition stage between an ionization chamber and a GM-counter. This view is mainly based on the presentation of pulse heights versus applied voltage that can be found in most text books.

However, a closer look on the physical phenomena taking place in a counter tube reveals that the voltage is by no means the only criterion for the detector to be operating in the proportional or in the geiger region. This is, on the contrary, determined in practice by the creation and absorption of UV photons in the counting gas on the one hand, and by the release of electrons by ions arriving at the cathode on the other hand.

These relations are being investigated in the first part of the publication. The results are applied to derive consequences for better construction and practical operation of proportional counters.

But not only in theory but in practical use as well proportional counters prove to be a quite original kind of radiation detector. The many possible variations of sizes and shapes, and the favourable operational properties have opened, in the past years, a broad field of applications in radiation protection measurements. This is shown in the second part, giving many specific examples. A short third part points out where the future development will be going.

## **Einiges zur Geschichte der Gasionisations-Detektoren, oder: wer hat das Proportionalzählrohr erfunden?**

In der Familie der Gasionisations-Detektoren – Ionisationskammer, Proportionalzählrohr und Geiger-Müller-Zählrohr – hat sich das GM-Zählrohr als Star und Publikumsliebling schon immer in den Vordergrund gedrängt. Schließlich ist sein Name sogar zum Gattungsbegriff für Zählgeräte überhaupt geworden.

Über die Entstehungsgeschichte des Geiger'schen Zählrohrs ist schon vielfach berichtet worden. Ort – das physikalische Institut der Universität von Manchester –, Jahr – 1908 –, ja beinahe Monat seiner Geburt sind bekannt. Bestenfalls wird unter Insidern um den Anteil gestritten, den E. Rutherford an dieser ersten frühen Entwicklung gehabt haben könnte.

Doch die anderen, um mit B. Brecht zu sprechen, sind im Dunkeln, – so scheint es zumindest, denn wer kennt schon den Erfinder des Proportionalzählrohrs?

Die Frage ist interessant, aber falsch gestellt. Die theoretischen Grundlagen für das Proportionalzählrohr – die Bedingungen für das Entstehen von Ladungslawinen in Gasen – hat Townsend schon in den Jahren 1901 bis 1903 geliefert. Wir müssen unsere Frage nach dem Zählrohr-Erfinder daher in mehreren Teilen beantworten.

Erster Teil: wer hat zum erstenmal ein Zählrohr im Proportionalbereich **betrieben**, möglicherweise ohne es zu wissen; und zweiter Teil: wer hat zum erstenmal klar unterschieden zwischen Proportional- und Auslösebereich und daraus praktische Betriebsbedingungen für den einen und den anderen abgeleitet? Und man könnte noch einen dritten Teil der Frage anhängen: wer hat das Proportionalzählrohr so benannt?

Die Antwort auf Teil 1 scheint mir eben so eindeutig wie möglicherweise überraschend. Das erste Geiger'sche Zählrohr hat bereits im Proportionalbereich gearbeitet! Aus dem in Abb. 1 gezeigten Auszug der Originalarbeit von Rutherford und Geiger (1) um 1908 – und aus vielen weiteren Hinweisen in dieser Arbeit – geht eindeutig hervor, daß bei ihrem Zählrohr die Impulshöhen unterschiedlich groß und der Laufstrecke der Alphateilchen im Gas proportional waren.

### **Aus der Geschichte der Gasionisations-Detektoren**

#### **Wer hat das Proportionalzählrohr erfunden?**

**Wir müssen gezielter fragen:**

**Wer hat zum ersten Mal**

- |  |   |
|--|---|
| <b>– ein Zählrohr als Proportionalzählrohr betrieben?</b>              | <b>E. Rutherford und H. Geiger<br/>1908</b> |
| <b>– klar zwischen Proportional- und Auslösebereich unterschieden?</b> | <b>K. G. Emeléus<br/>1925</b>               |
| <b>– den Unterschied systematisch untersucht?</b>                      | <b>H. Geiger und O. Klemperer<br/>1928</b>  |

Abb. 1

## Aus der Geschichte der Gasionisations-Detektoren

### Das erste Proportionalzählrohr?

*An Electrical Method of Counting the Number of  $\alpha$ -Particles  
from Radio-active Substances.*

By E. RUTHERFORD, F.R.S., Professor of Physics, and H. GEIGER, Ph.D.,  
John Harling Fellow, University of Manchester.

(Read June 18; MS. received July 17, 1908.)

of the brass tube. An  $\alpha$ -particle projected near the end of the tube in the direction of the axis of the tube would produce a throw of the electrometer needle of about the same magnitude as that due to an  $\alpha$ -particle fired through the opening parallel to the axis of the tube. The great majority of the  $\alpha$ -particles emitted by the tube will only travel a short distance before being stopped by the walls, and consequently will only give rise to small individual movements of the needle. The greater part of the current observed by the electrometer with the aperture closed was due to this natural ionisation increased several thousand times by the agency of the strong electric field.

Proc. Roy. Soc. 81, 141 - 161, 1908

Ich bin wohl kaum der erste und der einzige, der diesen Tatbestand herausgefunden hat. Aber jedenfalls habe ich bisher noch nirgends gehört oder gelesen, daß die Bezeichnung „Geigerzähler“ eigentlich dem Proportionalzählrohr zustehen müßte. Oder, präziser, daß man beim Proportionalzählrohr vom „Rutherford-Geiger-Zählrohr“ sprechen müßte, wie beim Auslösezählrohr heute von „Geiger-Müller-Zählrohr“.

Leider war es mir aus vielerlei Gründen bisher nicht möglich, die weitere Literatur über das Arbeiten mit Zählrohren systematisch zu verfolgen. Jedenfalls hat ein gewisser Herr Emeléus 1925 als erster klar ausgesprochen, daß „je nach den speziellen Versuchsbedingungen ein als Multiplikationseffekt bzw. Auslöseeffekt charakterisierbarer Unterschied im Mechanismus des Zählvorgangs zu erwarten ist“ (2). Und 1928 war es dann wieder H. Geiger, der in einer zusammen mit O. Klemperer veröffentlichten Arbeit (3) feststellt: „Unterhalb der ... Spannungswerte ist der Stromstoß im Zähler der Primärisation proportional“.

Umso bemerkenswerter scheint es mir deshalb, daß im ebenfalls 1928 erschienenen Aufsatz von H. Geiger und W. Müller (4) mit dem Titel „Das Elektronenzähl-

rohr“ – der ja ausschlaggebend war für die Bezeichnung Geiger-Müller-Zählrohr – die physikalischen Vorgänge gar nicht mehr diskutiert werden. Aber wenn man bedenkt, daß zum Nachweis der Impulse nach wie vor nur ein Fadenelektrometer zur Verfügung stand, dann mußte damals ein im Auslösebereich arbeitendes Zählrohr als ein großer Fortschritt gegenüber dem Proportionalzählrohr erscheinen, bei dem nur die hochionisierenden Alphateilchen erkennbare Signale hervorriefen. Folglich konzentrierte man sich lieber auf das „empfindlichere“ Nachweissystem; das Proportionalzählrohr war eher uninteressant.

Diese Betrachtung der Zählrohr-Historie legt für mich zwei Folgerungen nahe. Erstens: es wäre so abwegig gar nicht, beide Zählrohr-Spielarten als „Geiger-Zähler“ zu bezeichnen. Aber weil dies der langjährigen Gewöhnung zuwiderliefe und nur Verwirrung schaffen würde, deshalb zweitens: man vermeidet jede Kennzeichnungs-Problematik, indem man von Proportional- und Auslösezählrohren spricht, wie ich das im folgenden durchweg tun werde.

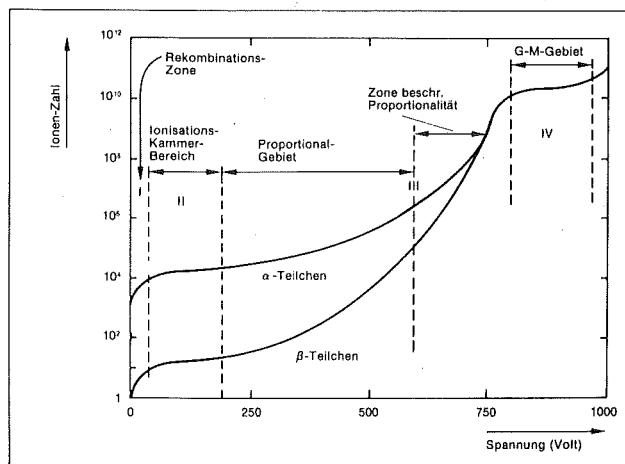
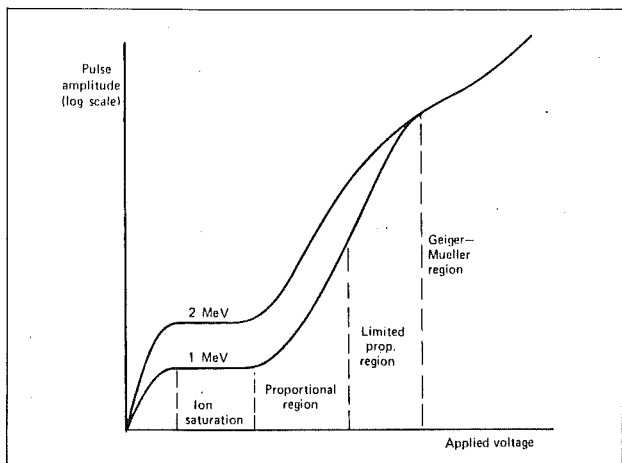
Aber wo liegt denn jetzt der physikalische Unterschied zwischen den beiden? Darüber mehr im nächsten Abschnitt.



# Einiges zur Physik des Proportionalzählrohrs, oder: was unterscheidet ein Proportionalzählrohr von Ionisationskammer und Auslöse-Zählrohr?

Proportionalzählrohre werden häufig als eine Art Übergangserscheinung zwischen Ionisationskammer und Auslöse-Zählrohr betrachtet. Diese Ansicht gründet sich auf die in vielen Lehrbüchern übliche Darstellung des Zusammenhangs zwischen Impulshöhe und angelegter Spannung – oder, bei homogenem Feld, und da haben wir schon eines der Probleme, der Feldstärke – von der angelegten Spannung als eine stetige Kurve (Abb. 2). Aber die Feldstärke im Gas ist nur einer – und keineswegs der allein entscheidende – Faktor. Gasart, Gasdruck und Strukturmaterialien des Detektors spielen eine wesentliche Rolle. Was passiert im Zählrohr wirklich bei steigender Feldstärke?

Abb. 2 Zwei Beispiele für die Darstellung von Zählrohr-Kennlinien in Lehrbüchern (5, 43)



Die wesentlichen Vorgänge sollen in den folgenden Abschnitten in vereinfachter Form herausgearbeitet werden, um die Voraussetzung zu schaffen zum besseren Verständnis der Eigenschaften von Proportionalzählrohren.

## Ob ein Zählrohr als Ionisationskammer oder als Proportionalzählrohr arbeitet, bestimmen Feldstärke und Gasdruck!

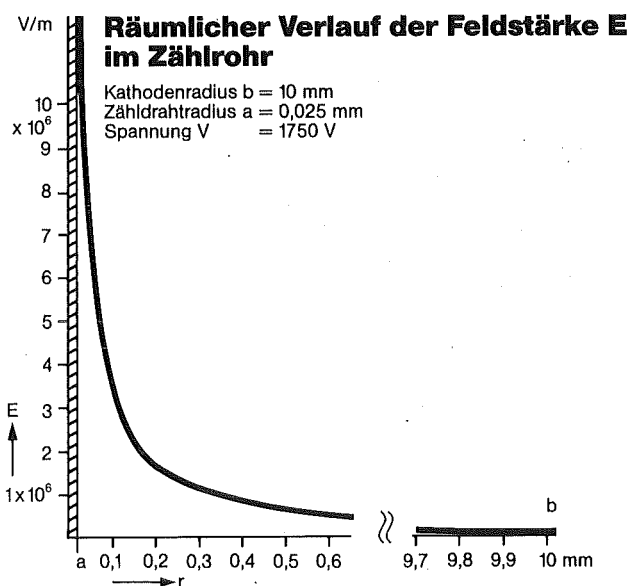


Abb. 3

### Der Verlauf der Feldstärke im Zählrohr

Die Feldstärke  $E$  im zylindersymmetrischen Zählrohr ist umgekehrt proportional der Entfernung  $r$  von der Mittelachse und beträgt

$$E = \frac{V}{r \cdot \ln(b/a)}$$

wobei  $V$  die Spannung,  $b$  der innere Kathodenradius und  $a$  der Zählrohrradius sei. Abb. 3 zeigt die Abhängigkeit der Feldstärke von  $r$  an einem Beispiel mit realistischen Werten für  $a$ ,  $b$  und  $V$ .

Bei genügend niedriger Spannung erreicht die Feldstärke nirgends den kritischen Wert für das Einsetzen einer Gasmultiplikation, der Gasverstärkungsfaktor ist gleich 1. Die Anzahl der gesammelten Ladungen ist, fehlende Rekombination vorausgesetzt, gleich der Anzahl der primär erzeugten Ladungen (Abb. 4). Das Zählrohr arbeitet als Ionisationskammer (Abb. 5).

Abb. 4

### Was geschieht im Zählrohr?

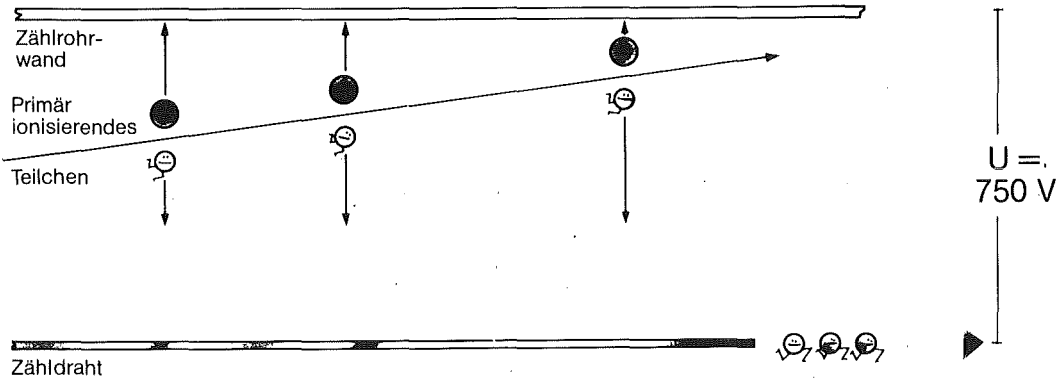


Abb. 5

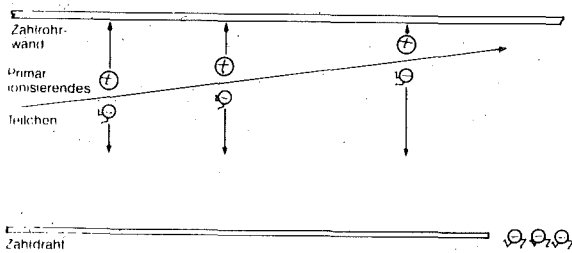
### Folgerungen für die Praxis

Detektorart

Ionisationskammer IK

Betriebsbedingungen

ca.  $10^4 < E/p < \text{ca. } 10^6 \text{ V/m} \cdot \text{bar}$



Fast alle Gasarten geeignet

Merke:

Ob eine IK zum PZ wird, bestimmt die Feldstärke!

## Der Übergang zum Proportionalbereich

Erhöht man die Spannung, so steigt die Feldstärke in einem sehr schmalen Schlauch um den Zähldraht über den kritischen Wert für den Einsatz der Gasmultiplikation. Dieser Wert liegt je nach Gasart zwischen  $1,5 \cdot 10^6$  (96% He, 4% Isobutan) und  $10 \cdot 10^6$  (Propan) V/m·bar, für P-10-Gas bei  $4,8 \cdot 10^6$  V/m·bar (5). Abb. 6 zeigt die charakteristischen Werte und Größenverhältnisse in einem Zählrohr mit dem Fülldruck 1 bar. Je höher die Feldstärke, desto höher der Gasverstärkungsfaktor. Diethorn (6) hat eine Formel zu seiner Berechnung aus den Zählrohr- und Gasparametern abgeleitet, die in erster Näherung auf einen logarithmischen Zusammenhang zwischen dem Verstärkungsfaktor und dem Wert  $V/p$  hinausläuft, während der Radius der Multiplikationszone linear mit  $V/p$  zunimmt. In der Multiplikationszone löst jedes einzelne Primärelektron eine Ladungslawine, die sogenannte Townsend-Lawine, aus (Abb. 7).

Die Anzahl der gesammelten Ladungen ist nur dann proportional den Primärladungen, wenn alle Lawinen praktisch gleich groß und voneinander unabhängig sind. Das ist der Fall bei nicht zu hoher Primärionisationsdichte und bei Gasmultiplikationsfaktoren bis etwa  $10^2$  bis  $10^3$ . Beim Anschauen von Abb. 7 muß man beachten, daß die Multiplikationszone im Verhältnis viel zu groß dargestellt werden muß, um die Abläufe der Lawinenbildung deutlich machen zu können.

## Die Impulsanstiegszeit im Proportionalzählrohr

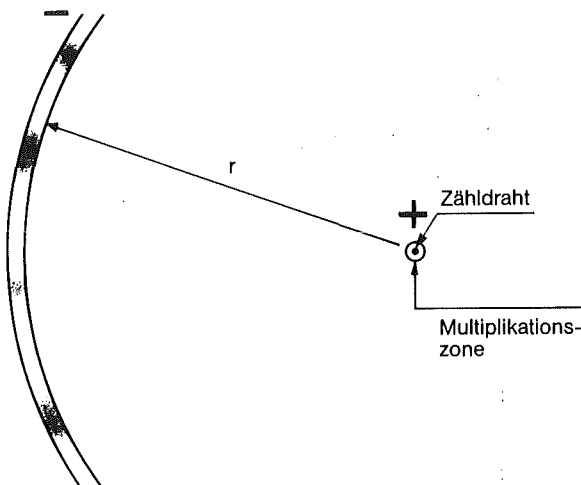
Die Driftzeiten der Elektronen im hohen Feld der Multiplikationszone sind sehr klein. Eine einzelne Townsend-Lawine baut sich in unserem Muster-Zählrohr der Abb. 7 in einigen ns auf. Das wäre in etwa auch die Anstiegszeit des Impulses, – lassen wir die Definition der Anstiegszeit und den Einfluß der Zählrohrkapazität einmal dahingestellt; beides spielt für die folgenden Betrachtungen keine Rolle. Aber es wäre die Anstiegszeit eben nur dann, wenn alle Lawinen zum selben Zeitpunkt getriggert würden. Da jedoch die einzelnen Primärelektronen bei den üblichen Teilchenbahnen im Zählrohr von ihrem Entstehungsort bis zum Rande der Multiplikationszone unterschiedliche Wege zurücklegen müssen – Abb. 7 zeigt dies deutlich – und somit zu unterschiedlichen Zeiten dort ankommen, „verschmieren“ die Lawinen zeitlich. Die Impulsanstiegszeit wird größer. Die Elektronen, die in Kathodennähe starten, brauchen bis zur Multiplikationszone wegen der anfangs sehr niedrigen Feldstärke einige 100 ns. Ihre Laufstrecke bestimmt die tatsächliche Impulsanstiegszeit.

Allerdings: niederenergetische Teilchen, wie die Betas von Tritium, geben ihre ganze Energie auf einer im Vergleich zu den Zählrohrabmessungen sehr kurzen Wegstrecke ab.

Abb. 6

### Proportionalzählrohre: Theorie und Praxis

#### So sieht's wirklich im Zählrohr aus!



$$E = \frac{V}{r \cdot \ln(b/a)}$$

Beispiel:

b Zählrohr-Radius	10 mm
a Zählrohr-Radius	0,025 mm
V Zählrohrspannung	1750 Volt
E Feldstärke	$5 \cdot 10^6$ V/m

Dann wird der Radius der Multiplikationszone 0,065 mm und ihr Volumen 0,004 % des Zählrohrvolumens

Abb. 7

### Was geschieht im Proportional-Zählrohr?

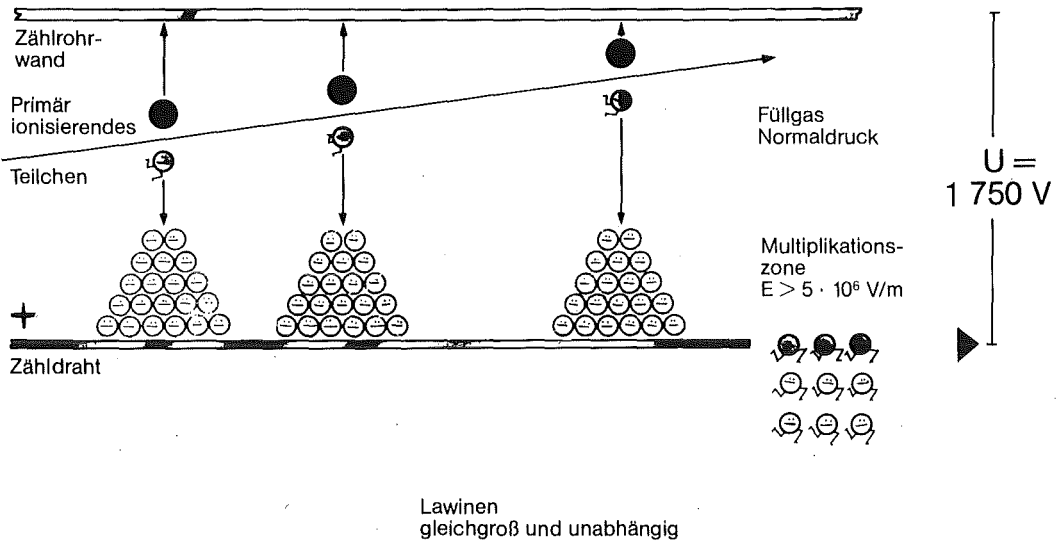
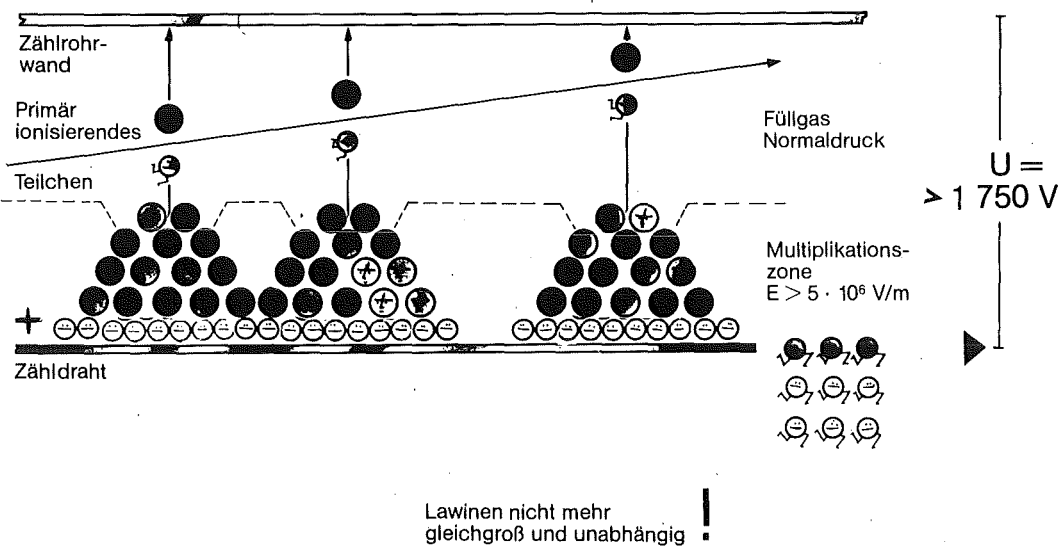


Abb. 8

### Was geschieht im Proportional-Zählrohr?

#### Störeffekt Nr. 1: Raumladung



Die freigesetzten Primärelektronen entstehen dann nahezu am gleichen Ort und haben alle fast gleiche Driftzeiten: der Tritium-Impuls hat eine kurze Anstiegszeit. Er läßt sich dadurch von den übrigen Impulsen trennen (45). Abb. 34 zeigt ein solches Anstiegszeit-Spektrum.

### Der Übergang zum bedingten Proportionalbereich

Bei wachsender Größe der Townsend-Lawinen überschneiden sich die einzelnen Lawinen. Außerdem nimmt die Sekundär-Ionisationsdichte in der Multiplikationszone zu. Jetzt machen sich die Raumladungseffekte der positiven Ionen bemerkbar, die wegen ihrer viel geringeren Beweglichkeit im Vergleich mit den Elektronen nur langsam abgesaugt werden. Die kritische Grenze für das Einsetzen der Gasmultiplikation wird verzerrt und der Multiplikationsfaktor nimmt wenig oder gar nicht mehr zu (Abb. 8).

Das Zählrohr befindet sich unter diesen Bedingungen im bedingten Proportionalbereich. Schließlich werden die Ausgangsimpulse gleich groß, – aber das ist keinesfalls der Auslösebereich. Für den Auslösebereich ist ein ganz anderer Effekt verantwortlich.

## Ob ein Proportionalzählrohr zum Auslösezählrohr wird, bestimmen die Photonen!

### UV-Photonen als Störfaktor im Proportionalzählrohr

Die Gasmultiplikation im Proportionalzählrohr beruht auf der Freisetzung weiterer Elektronen durch Stöße zwischen den ursprünglichen Elektronen und neutralen Gasmolekülen. Die Ionisation ist aber nicht der einzige Weg der Energieübertragung der Elektronen an die Gasmoleküle. Es können auch angeregte Moleküle gebildet werden. Sie tragen zur Townsend-Lawine unmittelbar nicht bei.

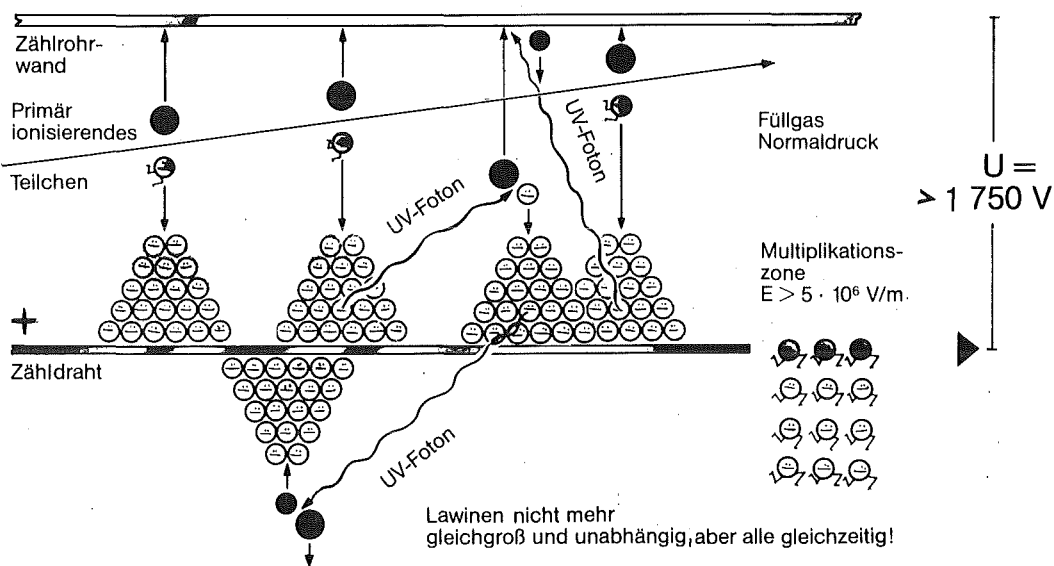
Sie können aber bei der Rückkehr in den Grundzustand ein Photon im sichtbaren oder – mehrheitlich – im UV-Bereich aussenden. Diese UV-Photonen können ihrerseits wieder Elektronen freisetzen, entweder im Gas oder an der Kathodenoberfläche (Abb. 9).

Abb. 9

### Was geschieht im Proportional-Zählrohr?

$$n_{UV} \cdot p_{Ion} \ll 11$$

#### Störeffekt Nr. 2: UV-Photonen



Dadurch entstehen neue Townsend-Lawinen. Da die Fotonen-Emission meist in Nanosekunden erfolgt und die Fotonen sich mit praktisch Lichtgeschwindigkeit im Gas ausbreiten, tragen die neuen Lawinen zum selben Impuls bei und wirken sich wie eine Erhöhung des Multiplikationsfaktors aus. Pro Lawine werden umso mehr Fotonen gebildet, je höher der Gasverstärkungsfaktor ist. Bezeichnet man mit  $n_{uv}$  die Anzahl der UV-Fotonen in einer Lawine und mit  $p_{ion}$  die Wahrscheinlichkeit, daß ein Foton selbst wieder ionisiert, dann läßt sich die kritische Übergangsbedingung vom Proportional- zum Auslösebereich formulieren als  $n_{uv} \cdot p_{ion} \geq 1$ .

### Der Übergang zum Auslöse-Bereich

Unter dieser Bedingung setzt eine von den Fotonen getriggerte Kettenreaktion ein, die Entladung breitet sich im ganzen Zählrohr aus; alle Ausgangsimpulse werden gleich groß. Der dafür kritische Feldstärke/ Druck-Wert liegt bei  $10^8$  V/m·bar. Da sich so hohe Werte durch Erhöhen der Spannung allein meist nicht erreichen lassen, betreibt man Auslösezählrohre vornehmlich mit niedrigerem Gasdruck. Das ist, nebenbei, auch ein Grund dafür, weshalb im Durchfluß betriebene Zählrohre fast durchweg Proportionalzählrohre sind.

## Hohes $n_{uv} \cdot p_{ion}$ ist im Proportionalzählrohr störend und unerwünscht!

### Die Rolle der Gaszusätze im Proportionalzählrohr

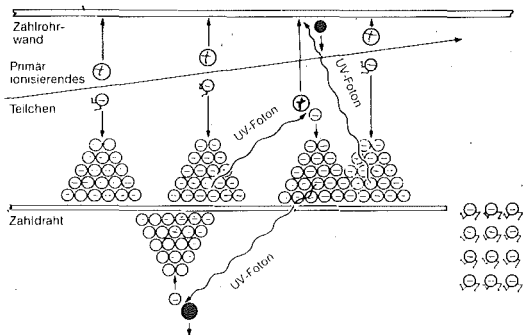
Die UV-Fotonen-Emission, für das Auslösezählrohr entscheidend, ist im Proportionalzählrohr störend und unerwünscht. Werte von  $n_{uv} \cdot p_{ion}$  nahe 1 führen zu Abweichungen von der Proportionalität und machen den Betrieb des Zählrohrs unstabil. Man versucht den Wert daher niedrig zu halten, indem man entweder  $n_{uv}$  klein macht – durch Betrieb mit niedrigem Multiplikationsfaktor oder durch Wahl einer Gasart, wie Methan, die von sich aus wenig oder keine UV-Fotonen emittiert; oder man hält  $p_{ion}$  klein. Das geschieht durch Gaszusätze, meist mehratomige Gase, die ihrerseits Fotonen absorbieren, ohne selbst ionisiert zu werden (Abb. 10). Praktisch alle einatomigen Zählgase – die Edelgase – benötigen solche Zusätze, wenn sie mit einigermaßen hohen Multiplikationsfaktoren betrieben werden. Gegenüber der UV-Ionisation im Gas spielt die Elektronenfreisetzung an der Kathode meist eine kleinere Rolle. Sie kann aber dominierend werden, wenn die Gasionisation durch Zusatzgase unterdrückt wird. Dann muß ein Wandmaterial mit hoher Elektronen-Austrittsarbeit gewählt werden.

Abb. 10

## Folgerungen für die Praxis

### Detektorart

### Proportionalzählrohr PZ



$n_{uv}$  = Anzahl der UV-Fotonen pro Lawine

$p_{ion}$  = Wahrscheinlichkeit für Ionisierung durch UV-Fotonen

### Betriebsbedingungen

$$ca. 10^6 < E/p < ca. 10^8 \text{ V/m} \cdot \text{bar}$$

$$n_{uv} \cdot p_{ion} \ll 1!$$

$n_{uv}$  klein durch  
– kleiner Multiplikationsfaktor  
– Gasart

$p_{ion}$  klein durch  
– Gasart  
– Zusatzgas, das nicht ionisiert wird  
– Kathodenmaterial

Merke:

Ob ein PZ zum GMZ wird, bestimmen die Fotonen!

## Ob ein Auslösezählrohr funktioniert, bestimmen die positiven Ionen!

### Die Bedingungen für den Auslösebereich

Damit ein Zählrohr im Auslösebereich arbeitet, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

$E/p$  muß größer sein als ca.  $10^8 \text{ V/m} \cdot \text{bar}$ , und  $n_{uv} \cdot p_{ion}$  muß größer sein als 1.  $n_{uv}$  wird groß bei großem Multiplikationsfaktor, der bei vorgegebener Spannung durch kleinen Gasdruck erreicht wird.  $p_{ion}$  wird groß durch Wahl der Gasart, vornehmlich monoatomare Gase (Abb. 11). Die Entladung, die sich im Zählrohr ausgebreitet hat, wird durch die hohe Raumladung der entstandenen positiven Ionen beendet. Da bei höherer Feldstärke dazu auch eine höhere Raumladung erforderlich ist, werden bei steigender Spannung am Zählrohr auch die Ausgangsimpulse größer. Die Zunahme erfolgt in erster Näherung proportional zur Differenz zwischen der kritischen Spannung für Erreichen des Auslösebereichs und der tatsächlichen Spannung.

In einem Zählrohr mit Spitzendraht anstelle der Zylindersymmetrie nimmt die Feldstärke in der Nähe der Spitze nicht mit  $V/r$ , sondern mit  $V/r^2$  zu. Das macht die Spitzenzähler – siehe die historische Entwicklung der Jahre von 1908 bis 1928 – besonders geeignet für die Verwendung im Auslösebereich. Als Proportionalzählrohre sind sie dagegen wenig brauchbar, weil die Feldverhältnisse je nach Form von Spitze und umgebender Kathode recht undefiniert sein können.

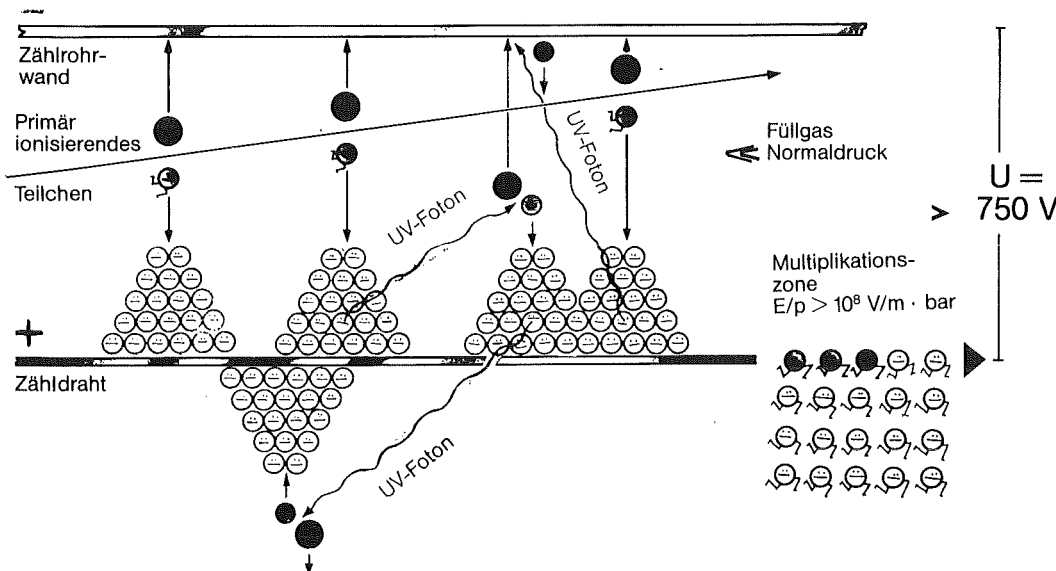
### Das Entstehen von Nachimpulsen

So weit, so gut. Nur: da ist noch ein weiterer Effekt, der sich auf die Funktion eines Auslösezählrohrs auswirkt. Das ist die Freisetzung von Elektronen an der Kathode durch positive Ionen. Diese Ionen, die nach Beendigung der Entladung zur Kathode wandern und diese nach einer in Mikrosekunden zu messenden Zeit erreichen, neutralisieren an der Kathodenoberfläche durch Auslösen und Einfangen eines Elektrons. Dabei kann, wenn die übrigbleibende, bei der Neutralisation frei gewordene Energie dazu ausreicht, ein weiteres Elektron freigesetzt werden. Eine neue Lawine wird getriggert. Die Entladung beginnt von neuem (Abb. 12).

Abb. 11

### Was geschieht im Auslöse-Zählrohr?

$$n_{uv} \cdot p_{ion} \geq 1$$



Je nach den Feldbedingungen im Zählrohr und den zeitlichen Verhältnissen bei der Ionenwanderung führt dieser Effekt also zu einer Dauerentladung oder zu zeitlich vom Erstimpuls unterscheidbaren Nachimpulsen.

Im Proportionalzählrohr spielen diese Vorgänge meist keine störende Rolle, aus zwei Gründen. Zum einen ist die Anzahl der positiven Ionen – und damit die Wahrscheinlichkeit, daß an der Kathode Elektronen ausgelöst werden – viel kleiner. Zum andern führt hier ein einzelnes Elektron nur zu einem sehr kleinen und damit elektronisch unterdrückbaren Ausgangsimpuls, während im Auslösbereich eine vollständige Entladung hervorgerufen wird.

### Die Rolle des Löschgases im Auslösezählrohr

Beim Auslösezählrohr muß man also etwas gegen die Elektronenfreisetzung unternehmen (Abb. 13). Das geschieht entweder durch „äußere Löschung“, indem die Spannung am Zählrohr für eine Zeit von bis zu vielen Millisekunden unter dem kritischen Wert

gehalten wird; oder, bevorzugt, durch „innere Löschung“ mit einem Gaszusatz, der ein niedrigeres Ionisationspotential und/oder eine komplexere Molekularstruktur hat als das – meist monoatomare – Primärgas.

Die Ionen des Primärgases laden auf ihrem Weg zur Kathode auf das Zusatzgas um. Die an der Kathode freiwerdende Energie der Zusatzmoleküle reicht dann entweder nicht zur Freisetzung eines Elektrons aus, oder sie wird dazu benutzt, das Molekül zu dissoziieren. Dann verbraucht sich das Löschgas und das Zählrohr hat eine von der Impulszahl abhängige Lebensdauer. Die heute meist benutzten Löschgase sind organische Dämpfe wie Äthylalkohol oder Halogene. Bei diesen Prozessen spielt nicht nur das Kathoden-Material, sondern auch die Oberflächenbeschaffenheit eine Rolle. Die Veränderung und Verschmutzung dieser Oberfläche durch bei der Entladung entstehende Polymerisationsprodukte scheint ein weiterer Grund für die impulszahlabhängige Lebensdauer von Auslösezählrohren zu sein.

Abb. 12

### Was geschieht im Auslöse-Zählrohr?

$$n_{UV} \cdot p_{ion} \geq 11$$

Störeffekt: Freisetzen von Elektronen an der Wand

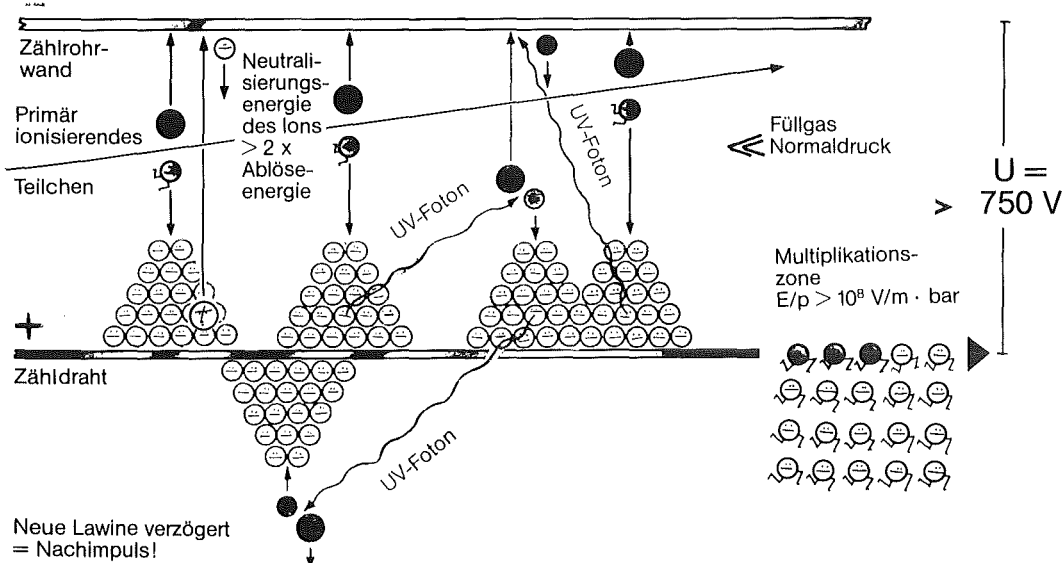


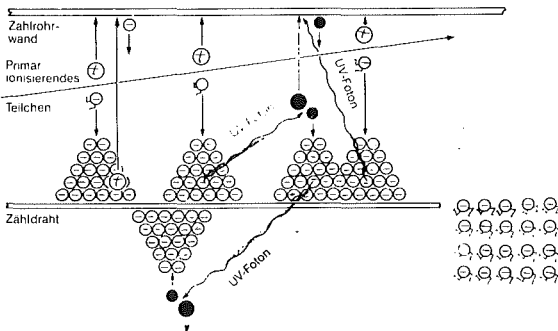


Abb. 13

## Folgerungen für die Praxis

### Detektorart

### Geiger-Müller-Zählrohr GMZ



$n_{UV}$  = Anzahl der UV-Fotonen pro Lawine

$p_{ion}$  = Wahrscheinlichkeit für Ionisierung durch UV-Fotonen

### Betriebsbedingungen

$$E/p > ca. 10^8 \text{ V/m} \cdot \text{bar}$$

$$n_{UV} \cdot p_{ion} > 1!$$

$n_{UV}$  groß durch  
 – großen Multiplikationsfaktor  
 – kleiner Gasdruck

$p_{ion}$  groß durch  
 – Gasart (monoatomare Gase)

Nachimpulse entscheidend, weil  
 – viele auslösende Ionen  
 – ein Elektron triggert komplette Entladung

Durch Löschgas Umladung und Dissoziation

### Merke

Ob ein GMZ funktioniert, bestimmen die Ionen!

## Was heißt das alles für den praktischen Betrieb eines Proportionalzählrohrs?

### Betrieb mit niedrigem Multiplikationsfaktor

Aus den grundlegenden Vorgängen im Zählrohr, wie vorstehend dargelegt, ist abzuleiten, daß es einerseits für den sicheren Betrieb eines Proportionalzählrohrs auf die Konstruktion, auf das Kathodenmaterial und vor allem auf die Wahl des Zählgases und seiner Zusätze ankommt. Allerdings lassen es die konkreten Bedingungen einer Messung oftmals nicht zu, daß die genannten Parameter optimiert werden.

Deshalb ist es andererseits umso wichtiger, daß die Proportionalzählrohre mit einem möglichst niedrigen Multiplikationsfaktor betrieben werden, um Entstehung und Auswirkungen von UV-Fotonen und Kathoden-Elektronen gering zu halten. Beide Effekte sind es auch, die jeweils für sich zum oberen Ende des Plateaus bei einem Proportionalzählrohr führen können.

Bei vorgegebener Verstärkungselektronik hängt der minimal mögliche Multiplikationsfaktor, der notwendig ist um die jeweils gewünschten Primär-Ionisationsereignisse zu erfassen, von der kleinsten Ladungsmenge pro Impuls ab, die noch zu einem auswertbaren Signal führt.

### Einflüsse auf das Plateau

Ob das Plateau eines Proportionalzählrohrs gut ist, also eine kleine Steigung und einen scharfen Einsattpunkt hat, wird zwar weitgehend von der Verteilung der primären Ionenzahlen pro Einzelergebnis bestimmt. Aber diese Verteilung wird im Ausgangssignal des Detektors „verschmiert“ durch eine konstruktionsbedingte Ungleichmäßigkeit der Feldverhältnisse und damit des Multiplikationsfaktors in verschiedenen Zählrohrbereichen. Es gehört zur Kunst der guten Zählrohrherstellung, trotz oftmals geradezu bizarren Bauformen für eine gleichmäßige Feldverteilung zu sorgen.

### **Abgrenzung des Proportionalzählrohrs zu Ionisationskammer und Auslösezählrohr**

Jedenfalls: das richtig betriebene Proportionalzählrohr steht der Ionisationskammer physikalisch sehr nahe. Sein Vorteil ist das höhere Ausgangssignal und damit auch die weitaus höhere Empfindlichkeit, sein – technischer – Nachteil die Einengung auf geeignete Zählgase. In vielen Bereichen der Dosisleistungsmessung im Strahlenschutz ist das Proportionalzählrohr ein geeigneter, heute überwiegend verwendeter Detektor.

Die Abgrenzung zum Auslösezählrohr ist weit fundamentaler. Hier weist das Proportionalzählrohr eine Vielzahl von Vorteilen auf, die für den Einsatz im Strahlenschutz – und dort besonders bei der Aktivitätsmessung – von großer, oft entscheidender Bedeutung sind: es kann, von der Physik her, Informationen über die Primärionisation vermitteln, es kann von der Technik her in fast beliebigen Größen und Bauformen hergestellt werden – was beim Auslösezählrohr zu unververtretbaren Impulsbreiten und Totzeiten führen würde – und es hat vom Gebrauchswert her den

größeren Meßbereich und die weitaus längere Lebensdauer. Die hauptsächliche – und vielleicht sogar letzte – Domäne des Auslösezählrohrs ist das Kleinformat, das Miniaturzählrohr. Da hat das Proportionalzählrohr große Schwierigkeiten mit den zwangsweise extrem ungleichmäßigen Feldverhältnissen, während es beim Auslösezählrohr darauf überhaupt nicht ankommt.

### **Verwendung von Proportionalzählrohren in hohen Stückzahlen**

Es gibt Abschätzungen, die besagen, daß derzeit weltweit rund hunderttausend Auslösezählrohre jährlich produziert werden. Mir scheint dieser Wert recht hoch, wenn man bedenkt, daß diese Zählrohre praktisch ausschließlich für tragbare und nur teilweise für stationäre Dosisleistungsmeßgeräte verwendet werden. Aber die Anzahl von Proportionalzählrohren dürfte inzwischen eher höher liegen, nachdem sich das Großflächenzählrohr zur Kontaminationsmessung auch im Ausland weitgehend durchgesetzt hat.

## **Einiges zur Anwendung, oder: wozu braucht man im Strahlenschutz Proportionalzählrohre?**

Man kann ohne Übertreibung behaupten, daß es heute kaum einen Bereich der Strahlenschutz-Meßtechnik mehr gibt, in den Proportionalzählrohre keine Anwendung finden. Die folgende Übersicht kann deshalb nicht erschöpfend sein, sondern beschränkt sich auf Darstellung von Schwerpunkten oder exem-

plarischen Bereichen. In den frühen Jahren der Entwicklung traten vielfach Meßaufgaben auf, die mit den bekannten Detektoren nur unzulänglich oder gar nicht gelöst werden konnten, so daß spezielle Proportionalzählrohre dafür konzipiert wurden. So ist das Großflächen-Proportionalzählrohr entstanden. Später konnten dann die vorhandenen Zählrohrtypen auch als Ergänzung oder Ersatz weniger geeigneter Detektorarten eingesetzt werden, beispielsweise bei der Dosisleistungsmessung in der Umgebung statt Auslösezählrohren oder bei der Kontaminationsmessung statt Szintillationszählern. Die folgende Darstellung der Anwendungsbereiche folgt jedoch nicht der chronologischen Entwicklung, sondern orientiert sich am heutigen Stand.

Tab. 1

## Anwendung für spezifische Meßaufgaben

Dosisleistungsmessung		
Bauform	Signalverarbeitung	Meßaufgabe
Zählrohre mit Energiefilter, großvolumig	Impulszählung	Gamma-Dosisleistung mit hoher Empfindlichkeit (Umgebung)
Zählrohre BF <sub>3</sub> - oder <sup>3</sup> He-gefüllt	Impulszählung	Neutronen-Dosisleistung (Rem-Counter), Neutronenfluß
Zählrohre Luft- oder gewebe-äquivalent	Strommessung Impulszählung	Gamma-Dosisleistung großer Energiebereich, hohe Empfindlichkeit
TEPC	Impulszählung mit Bewertung der Energieverteilung	Äquivalent-Dosisleistung im gemischten Strahlungsfeld

## Proportionalzählrohre zur Dosisleistungsmessung (Tabelle 1)

### Das Proportionalzählrohr im Strombetrieb

Das Proportionalzählrohr ist als „Ionisationskammer mit Gasverstärkung“ vom physikalischen Prinzip her zur empfindlichen Dosisleistungsmessung optimal geeignet (7). Ein derartiges Gerät, das mit einer luftäquivalenten Proportionalkammer im Strombetrieb arbeitet, wurde schon anfangs der 50er Jahre von Trost und Mitarbeitern beschrieben (8). Mit diesem „Zählrohr“ ließen sich eine gute Energieunabhängigkeit bis herunter in den Bereich unter 10 keV (Abb. 14) mit einem – durch Änderung des Multiplikationsfaktors erreichbaren – enorm großen Dosisleistungsmessbereich verbinden. Trotz dieser Vorteile standen elektrische, thermische und auch mechanische Stabilitätsprobleme einer weiteren Verbreitung entgegen. So gibt es derzeit nur einen kommerziellen Dosisleistungsmesser nach diesem Prinzip. Ich bin aber der Meinung, daß mit moderner Technologie Systeme entwickelt werden könnten, die eine größere Verwendung finden sollten.

DIE  
NATURWISSENSCHAFTEN  
SPRINGER-VERLAG / BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG  
1952 HEFT 10, S. 233 39. JAHRGANG

#### Ein in bezug auf die Röntgeneinheit wellenlängenunabhängiges Zählrohr.

Wegen der hohen Empfindlichkeit und des geringen Raumbedarfes ist ein Zählrohr für Strahlenschutzmessungen geeigneter als eine Ionisationskammer; Dosisleistungen von 10<sup>-6</sup> r/s können in Direktanzeige bei Einstellzeiten von 1 s gemessen werden. Dem steht der Nachteil gegenüber, daß die Empfindlichkeit der bisher bekannten Zählrohre, in r/s ausgedrückt, sich mit der Strahlenqualität ändert. Die amerikanischen Strahlenschutzrichtlinien<sup>1)</sup> lassen deshalb das Zählrohr bei Strahlenschutzprüfungen nur für rohe Orientierungen zu und verlangen für quantitative Bestimmungen eine Ionisationskammer. Nach eigenen Erfahrungen<sup>2)</sup> ist es jedoch

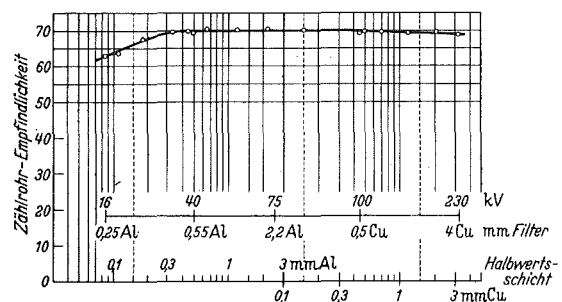


Abb. 14

### Das gewebeäquivalente Proportionalzählrohr

Ähnliches gilt für die gewebeäquivalenten Proportionalzählrohre (TEPC), die mit Impulszählung und Bewertung der Energieverteilung im Zählrohr arbeiten und zur Messung der Äquivalentdosisleistung in gemischten Strahlungsfeldern (Gamma- und Neutronenstrahlung) dienen (9). Hier scheint mir noch ein großes Potential für die Weiterentwicklung gegeben, das allerdings außer in der Zählrohr-Konstruktion auch in der elektronischen Datenverarbeitung liegen dürfte.

### Das großvolumige Proportionalzählrohr

Viel Entwicklungsarbeit ist in den letzten Jahren bei der Anwendung von Proportionalzählrohren zur empfindlichen Messung im Bereich kleiner Dosisleistungen geleistet worden, vor allem zur Umgebungsüberwachung kerntechnischer Anlagen (10). Hierzu werden die Zählrohre im Impulsbetrieb gefahren und mit speziellen Energiefilterhüllen, wie das auch für Auslösezählrohre üblich ist, die notwendige Energieunabhängigkeit hergestellt. Die hohe Empfindlichkeit wird durch das große Volumen der Zählrohre erreicht, wobei sich für Dosisleistungen von  $0,1 \mu\text{Sv/h}$  Zählraten im Bereich von  $2 \text{ s}^{-1}$  bis  $20 \text{ s}^{-1}$  ergeben. Die Abbildung 15 zeigt einige unterschiedliche Bauformen solcher Zählrohre; Abb.16 gibt zwei typische Energieabhängigkeitskurven wieder und zeigt gleichzeitig, welche Energiebereiche sich mit modernen Konstruktionen heute erreichen lassen.

Ionisationskammern erbringen den Proportionalzählrohren vergleichbare Empfindlichkeiten nur als großvolumige Druckkammern und haben dann Probleme mit der Energieabhängigkeit im unteren Bereich, der bei der Umgebungsüberwachung für den Nachweis des  $^{133}\text{Xe}$  von entscheidender Bedeutung ist. Abb. 17 verdeutlicht diese Verhältnisse.

### Das Proportionalzählrohr zur Neutronenmessung

Schließlich werden Proportionalzählrohre mit speziellen Füllgasen, nämlich  $\text{BF}_3$  oder  $^3\text{He}$ , auch zur Neutronenmessung eingesetzt. Dabei weist man die im Proportionalzählrohr durch Neutroneneinfang der Bor- und Heliumkerne entstehenden Alphateilchen bzw. Protonen nach. In Verbindung mit einem Moderator ergeben diese Detektoren sogenannte „Rem-(Sievert?)-Counter“ zur Messung der Neutronen-Äquivalentdosisleistung. Für diesen Anwendungszweck versucht man Zählrohrquerschnitte zu erreichen, die angenähert quadratisch oder sogar kugelförmig sind.

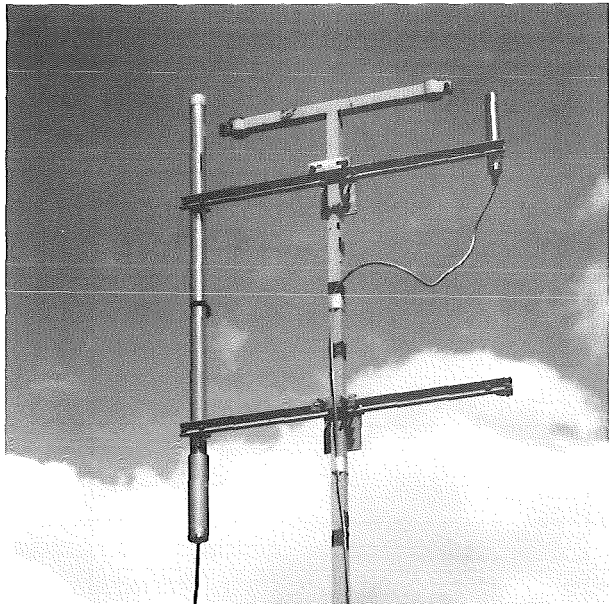
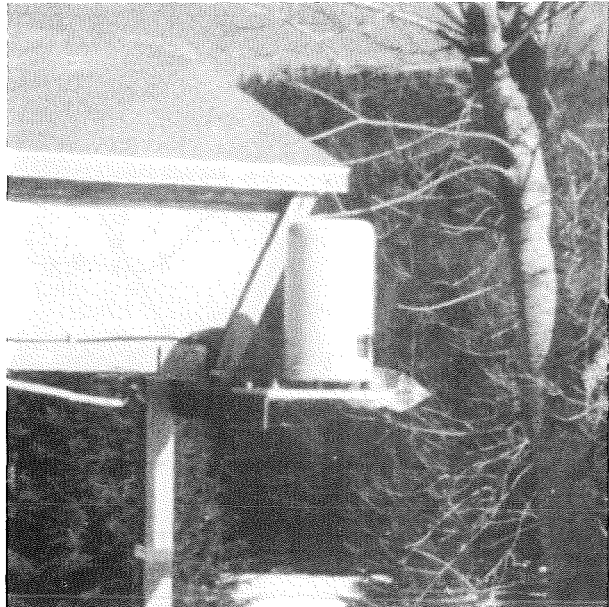


Abb. 15 Beispiele für Bauformen von Proportionalzählrohren zur Dosisleistungsmessung (Werksfotos FAG Kugelfischer, Berthold).

Eine Zusammenstellung der Leistungsdaten von Rem-Countern mit verschiedenen Detektorarten findet sich in der Literatur (11).

$\text{BF}_3$ -Zählrohr-Moderatoranordnungen mit sehr großen Zählrohren von Meterlänge und  $5 \text{ cm } \varnothing$  sind empfindlich genug, um die natürliche Neutronen-Komponente der Umgebungsstrahlung noch nachzuweisen. Sie werden ebenfalls in der Umgebungsüberwachung von Großbeschleunigern und kerntechnischen Anlagen eingesetzt.

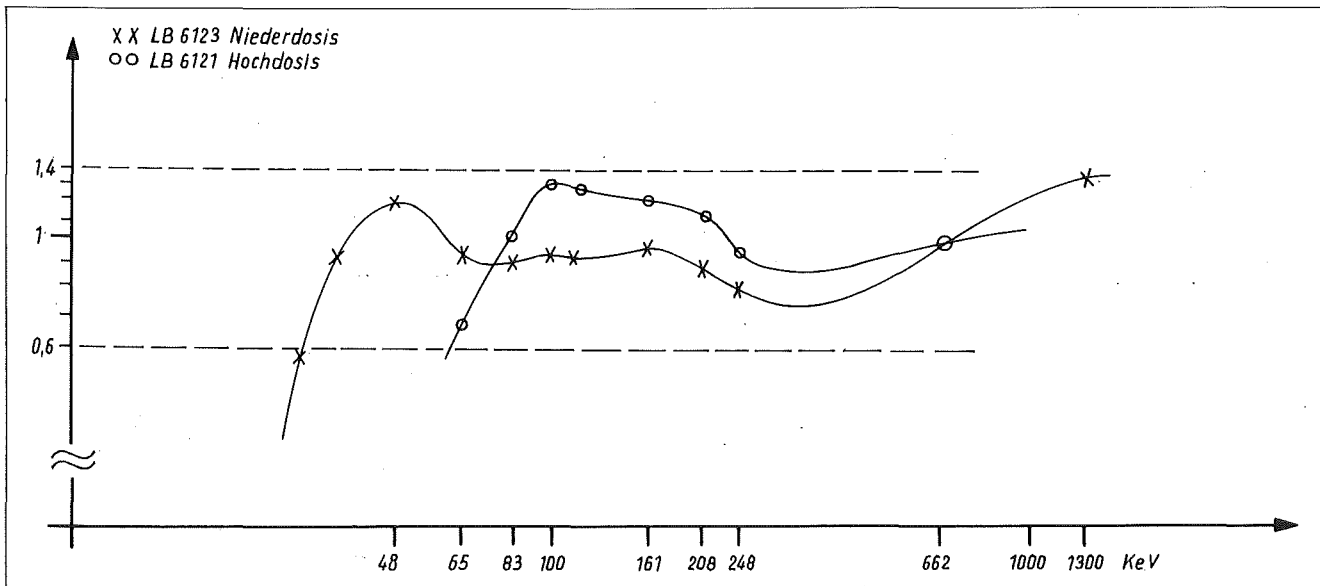


Abb. 16 Beispiele für die Abhängigkeit der Zählrate von Proportionalzählrohren von der Photonenenergie (nach technischen Berichten von Berthold und FAG Kugelfischer).

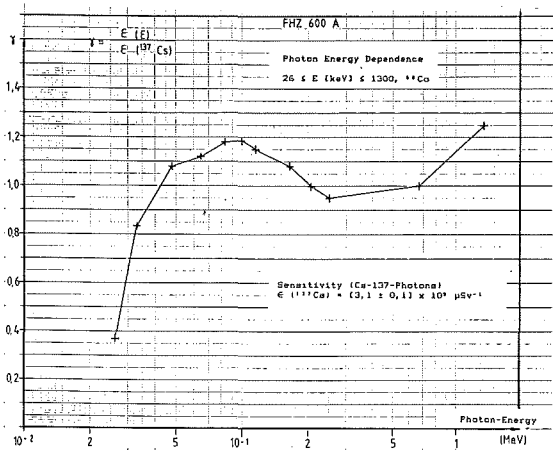
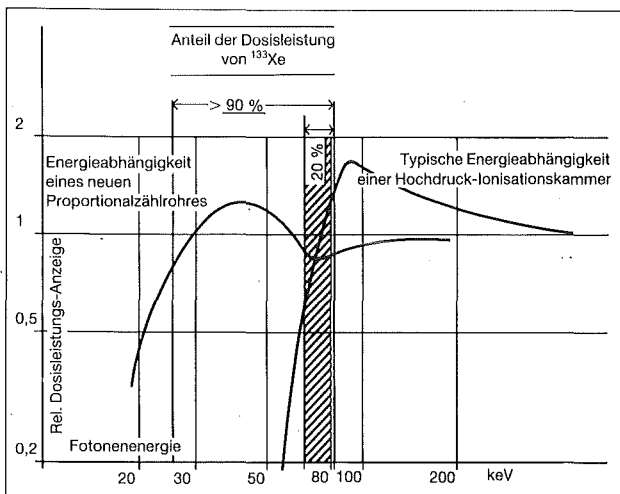


Abb. 17 Energieabhängigkeits-Kurven von Hochdruck-Ionisationskammer und Proportionalzählrohr im Vergleich mit der  $^{133}\text{Xe}$ -Dosisleistung (45).

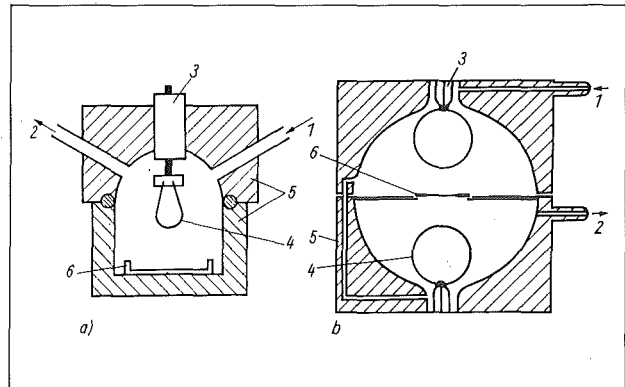


## Proportionalzählrohre zur Messung der Alpha- und Beta-Aktivität in Festproben (Tabelle 2)

Grad verbessern, brachte aber keine grundlegende Änderung in der Größe des Meßfehlers. Das Ausmessen großflächiger Proben war jedenfalls nicht möglich, so der Stand der Technik in den frühen 50er Jahren.

### Der Bedarf für Großflächen-Proportionalzählrohre

Endfensterzählrohre, sowohl im Proportional- wie im Auslösebereich, wurden schon seit eh und je zur Aktivitätsmessung von Festproben benutzt. Später kamen dann auch fensterlose Detektoren dazu. Zwei einander gegenübergestellte Zählrohre dieser Art dienten als sogenannte  $4\pi$ -Zähler zur Absolutbestimmung von Aktivitäten für Standardpräparate. Die Zählrohrform war ursprünglich der Spitzendraht, dann die Zählrohrschleife (Abb. 18). Diese Zählrohranordnungen limitierten allerdings die wirksame Zählfläche auf den Durchmesser einiger Zentimeter. Die Verwendung einer Doppelschleife, der sogenannten Duo-Durchflußzähler, konnte zwar den Wirkungsgrad für flächige Präparate bis zu einem gewissen



**Abb. 18** Schematische Darstellung von Gasdurchfluß-Proportionalzählrohren mit schlaufenförmigem Zählrohr (44); (a)  $2\pi$ -Zähler, (b)  $4\pi$ -Zähler; 1 Gaszuführung, 2 Gasabführung, 3 Isolator, 4 Anodendrahtschleife, 5 Gehäuse (Kathode), 6 Probe

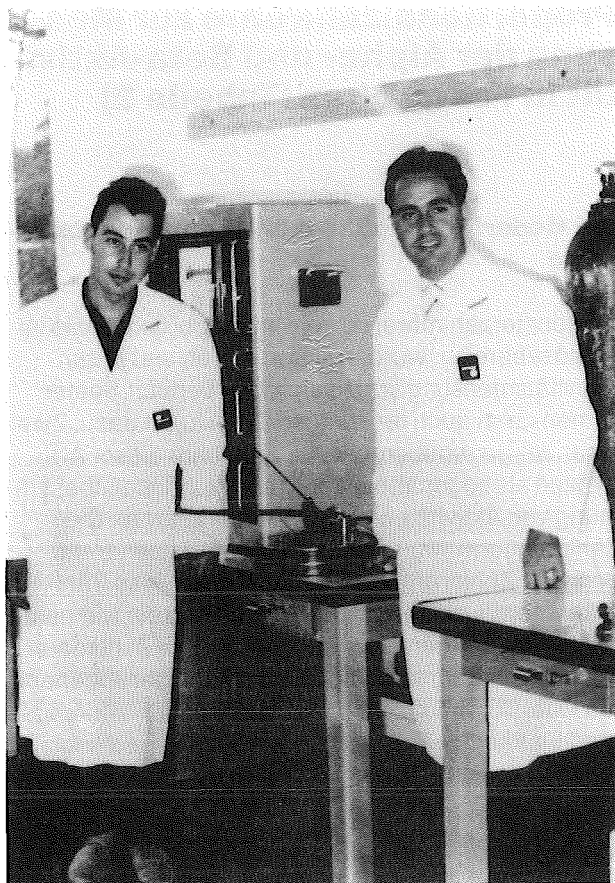
Tab. 2

## Anwendung für spezifische Meßaufgaben

### Messung der Aktivität in Festproben

Bauform	Signalverarbeitung	Meßaufgabe
Glockenzählrohr mit Drahtschleife	Impulszählung	Aktivitätsbestimmung
Großflächenzählrohr mit oder ohne Fensterfolie, bis 20 cm $\phi$	Impulszählung, Antikoinzidenz	Messung kleinster Aktivitäten in: Abwasser Luftfiltern
Mehrfach-Parallel-Zählrohre, bis 6 cm $\phi$	Impulsform-Diskriminierung zur Alpha-Beta-Trennung	Umgebungsproben Wischproben

Damals begannen einerseits die „Nullpegelmessungen“ der Radioaktivität in der Umwelt und der Nachweis des Kernwaffen-Fallouts; andererseits mußten in den jungen Kernforschungsanlagen, wie Jülich und Karlsruhe, rationelle Methoden zur Messung der Aktivität in den zahlreich anfallenden Abwasserproben gefunden werden. Beide Aufgaben erforderten die Ausmessung von Feststoff-Rückständen aus Eindampf-, Fällungs- oder Veraschungsprozessen, die mit kleinflächigen Detektoren nicht ausreichend genau, schnell und empfindlich möglich war.



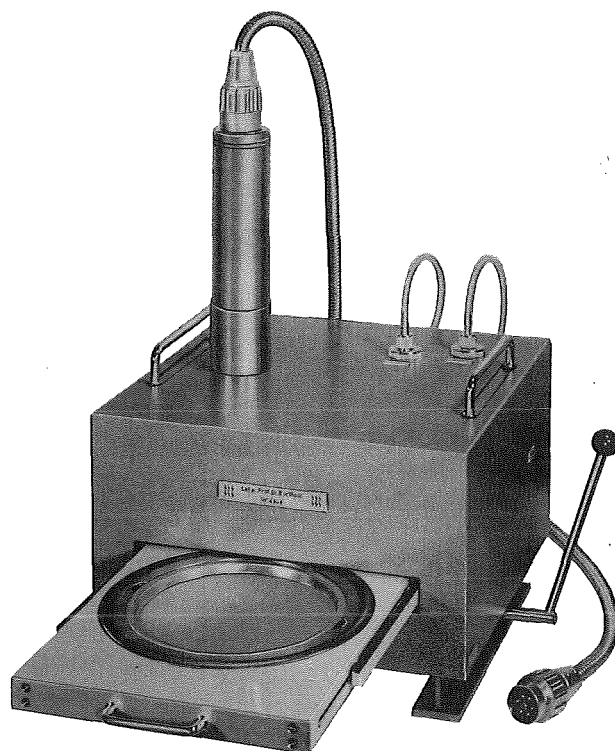
**Abb. 19** H. Kiefer (rechts) und R. Maushart (links) im Jahre 1959 mit dem ersten, selbstgebauten Großflächen-Proportional-Zählrohr.

### Low-level Systeme mit Proportionalzählrohren

Das war für Kiefer und Maushart in Karlsruhe der Anstoß, in den Jahren von 1957 bis anfangs der 60er Jahre das Großflächen-Proportionalzählrohr zu entwickeln (12, 13, 14, 15). Angestachelt durch die Berichte zweier amerikanischer Besucher, sie hätten bereits großflächige Detektoren realisiert, – die sich dann später als eine Anordnung von mehreren sogenannten Pancake-GM-Endfenster-Zählrohren entpuppten – begann man damals mit einigen abenteuerlichen Konstruktionen von Siebenfach-Schlaufenzählern auf einer Fläche von 300 cm<sup>2</sup>. 300 cm<sup>2</sup> deshalb, weil die Konservendosen-Deckel eines benachbarten Blechpackungswerks gerade den entsprechenden Durchmesser aufwiesen und sich hervorragend als Meßschalen für das Eindampfen von Wasserproben eigneten.

Diese ersten Zähler funktionierten zwar, hatten aber, wie zu erwarten war, eine stark ausgeprägte Ortsabhängigkeit des Zählwirkungsgrades. Daraus wurde dann die Idee geboren, ein ebenes Zählraht-Gitter zu verwenden, was fast auf Anhieb zufriedenstellende Ergebnisse einbrachte.

Die weiteren Arbeiten führten dann auch zu einer ganzen Reihe von Patenten. Abb. 19 zeigt Kiefer und Maushart mit einem der ersten – runden, ca. 30 cm Ø aufweisenden – in der Institutswerkstatt hergestellten Großflächenzähler, der zur Aktivitätsmessung von eingedampften Wasserproben verwendet wurde. Abb. 20 zeigt eine frühe kommerzielle Version.

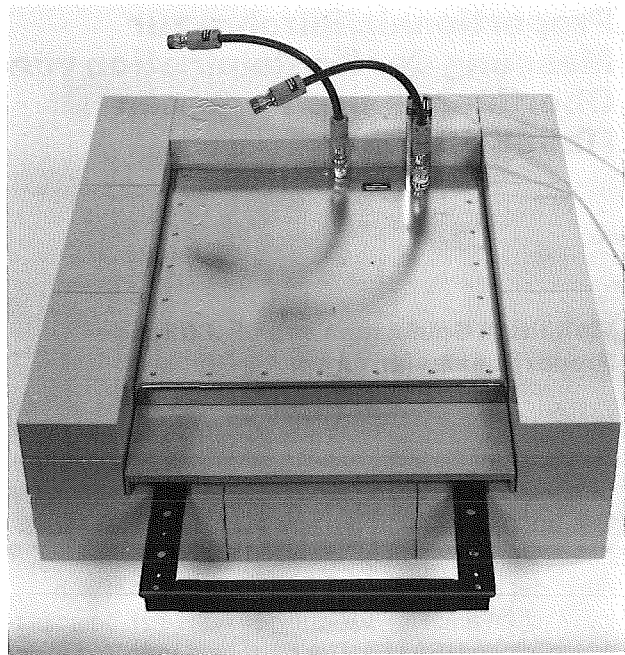


**Abb. 20** Frühe kommerzielle Ausführung eines Low-level-Großflächenproportionalzählers aus dem Jahre 1962 (Werksfoto Berthold)



Diese flachen Zähler hatten den weiteren Vorteil, daß sie sich als Folge ihrer Geometrie leicht zu wirksamen Antikoinzidenzsystemen zusammenfügen ließen. So entstanden Großflächen-Low-level-Zählordnungen, die heute überall in der Radioaktivitäts-Umweltüberwachung eingesetzt werden und die den Nachweis kleinster Alpha- und Beta-Aktivitäten ermöglichen (16). Moderne Systeme erreichen den außerordentlichen niedrigen Beta-Nulleffekt von ca. 5 ipm bei 20 cm Zählflächendurchmesser. Diese guten Werte werden einerseits durch sorgfältige Materialwahl, andererseits durch extreme Flachbauweise der Detektoren erzielt, wie sie durch eine moderne Technologie möglich geworden ist (Abb. 21).

Die Weiterentwicklung ging einerseits zur Alpha-Beta-Trennung durch Impulsformdiskriminierung, andererseits zur Vielfachdetektor-Anordnung für die gleichzeitige parallele Ausmessung mehrerer Proben. Ein 10-Kanal-System dieser Art zeigt Abb. 22.



**Abb. 21** Blick auf den extrem flachen Schirmzähler (darunter verdeckt, der ebenso flache Meßzähler) eines modernen Low-level-Meßplatzes für 200-mm-Schalen (Werksfoto Berthold).

**Abb. 22** Low-level-Meßplatz zur gleichzeitigen Messung von zehn 60-mm-Schälchen (Werksfoto Berthold).





## Proportionalzählrohre zur Messung der Kontamination von Oberflächen und Personen (Tabelle 3)

die ganze Fensterfläche gleichmäßige Ansprechwahrscheinlichkeit besteht. Für Kontaminationsmessungen in Hohlräumen oder in Winkeln sind auch schon Detektoren mit recht großen Fensterflächen in Dreikant- oder in Sechskantform gebaut worden (42).

### Vielfältige Bauformen von Großflächen-Proportionalzählrohren

Die Kontaminationsmessung ist heute die eigentliche Domäne der Großflächen-Proportionalzählrohre im Strahlenschutz. Sie haben die ursprünglich benutzten GM-Endfensterzählrohre und auch die Szintillationsdetektoren weitgehend ersetzt. Diese Entwicklung, die in der Bundesrepublik begonnen hat, hat sich inzwischen auch im Ausland durchgesetzt, beispielsweise in den USA (17). Der entscheidende Vorteil der Großflächenzählrohre für diesen Einsatzzweck ist wahrlich nicht zu übersehen: sie können als sehr flache Baukörper in nahezu beliebigen Formen und Abmessungen hergestellt werden, wobei eine über

### Mehrkammer-Zählrohre

Bei sehr großen Detektoren ist eine elektrische Unterteilung in mehrere Zählkammern möglich, ohne daß zwischen ihnen eine tote Zone entsteht, wie sie durch die Randstreifen vorhanden wäre, wenn man einzelne Detektoren aneinanderstoßen läßt. Koppelt man solche Mehrkammerzähler mit einer modernen Mikroprozessor-Elektronik, so läßt sich einerseits eine gewisse Ortsauflösung für die Verteilung der Kontamination unter dem Detektor erreichen, andererseits – und das ist oft wichtiger – wird infolge der im Verhältnis zum Gesamtdetektor niedrigeren Nulleffektsrate eine entsprechend niedrigere Nachweisgrenze erzielt.

Tab. 3

## Anwendung für spezifische Meßaufgaben

### Kontaminationsmessung an Oberflächen und Personen

Bauform	Signalverarbeitung	Meßaufgabe
Großflächenzählrohr mit dünner Fensterfolie (ca. 0,3 mg/cm <sup>2</sup> ) in Durchfluß oder Butan-Füllung	Impulszählung Impulsform-Diskriminierung zur Alpha-Beta-Trennung	Kontaminationsmessung Alpha - Beta
Großflächenzählrohr mit vakuumdichter Fensterfolie (5 mg/cm <sup>2</sup> )	Impulszählung	Beta
Großflächenzählrohr mit Xenon-Füllung	Impulszählung Impulsdiskriminierung	Beta - Gamma <sup>125</sup> J-Messung mit erhöhter Empfindlichkeit
Proportionalzählrohr ohne Fensterfolie im Durchfluß	Impulszählung	Tritium

## Die lästige Gasversorgung und was man dagegen tun kann

Als Nachteil der Großflächendetektoren kann angesehen werden, daß – zumindest für den Nachweis von Alpha-Kontaminationen – eine kontinuierliche oder diskontinuierliche Zählgasversorgung erforderlich wird. Das kann vor allem für den Einsatz von tragbaren Monitoren recht unangenehm sein. Die moderne Technik hat allerdings durch Entwicklung von abgeschlossenen Detektoren für die Beta- und Gammamessung einerseits, und durch Automatisierung der Zählgaszufuhr, soweit diese noch notwendig wird, andererseits diesen Nachteil weitgehend abgemildert.

## Stufen der Entwicklung

Mehrere entscheidende Weiterentwicklungen markieren den Weg von der Erfindung des ersten, von der Technik her noch recht grobschlächtigen Großflächenzählers bis zu den heutigen Kontaminationsdetektoren. Einen der frühesten, heute völlig unpraktikabel anmutenden Versuche zeigt Abb. 23, mit dem Großflächendetektor der ursprünglichen runden Bauform und der damals verfügbaren Elektronik einen transportablen Kontaminationsmonitor zu schaffen. Es gab weder abgeschlossene, also zählgasunabhängige Detektoren, noch in die Elektronik integrierte Zählrohre, wie wir das heute gewohnt sind.

**Abb. 23** Ein früher „tragbarer“ Kontaminationsmonitor mit Großflächen-Durchflußzählrohr (Werkfoto Berthold).



Der Detektor wurde aus der Gasflasche gefüllt, dann der Zu- und Auslaß abgeschlossen. Das ergab jedoch nur begrenzte Betriebszeiten. Etwas später kamen Geräte auf den Markt, die eine kleine Druckgasflasche von ca. 0,6 l Volumen eingebaut hatten, so daß man unterwegs „nachfüllen“ konnte. Etwa zur gleichen Zeit wurden mit Flüssiggas, wie Butan, zu betreibende Detektoren entwickelt.

Ein gewisser Durchbruch bei diesem Problem wurde anfangs der 70er Jahre mit der Entwicklung einer automatischen „Gastankstelle“ erzielt, verbunden mit dem Einbau des Detektors in die Bodenfläche einer tragbaren Elektronik (18). Diese Entwicklung, der „Contamat“, hat sich bis heute gehalten. Das Einhand-Gerät mit eingebauter Sonde ist zum Standard für Kontaminationsmonitoren geworden und hat gerade die dritte Generation der Entwicklung erreicht. Moderne Geräte dieser Art (Abb. 24, 25, 26) arbeiten mit austauschbaren Detektoren für unterschiedliche Anwendungsbereiche und enthalten ausgefeilte Mikroprozessorelektroniken für die Berechnung der Kontamination in Bq/cm<sup>2</sup> mit Digital- und Graphikanzeigen.

Der Mikroprozessor gestattet außerdem den Ersatz der üblichen Ratemeterfunktion mit ihrer Trägheit und Schwankung der Anzeige durch statistisch optimal korrigierte und geglättete Meßwertdarstellungen, mit denen Aktivitätsänderungen schneller und sicherer als bisher erkannt werden können. Es lassen sich ferner eine Anzahl einzelner Meßwerte speichern und später wieder aus dem Gerät auslesen (13).

## Das abgeschlossene Großflächen-Proportionalzählrohr

Die Gastankstelle dagegen hat durch eine andere Entwicklung auf dem Detektorgebiet mehr und mehr an Aktualität verloren: der abgeschlossene Großflächendetektor mit einer Fensterfolie um die 5 mg/cm<sup>2</sup> Flächengewicht, gelegentlich aus Aluminium, meistens aus Titan. Da sich mit diesen Detektoren auch niederenergetische Betastrahler wie <sup>14</sup>C noch mit einem Wirkungsgrad um die 5 % nachweisen lassen, kann die Zählgasversorgung auf die Messung von Alphastrahlern oder den hochempfindlichen Nachweis weicher Betastrahler beschränkt werden.

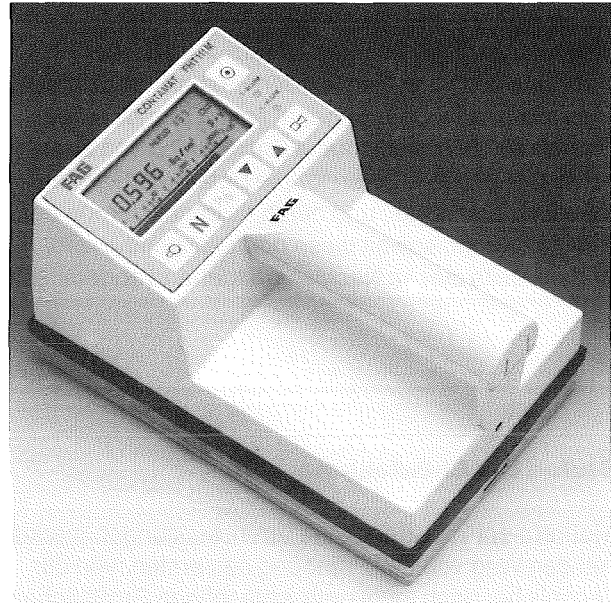
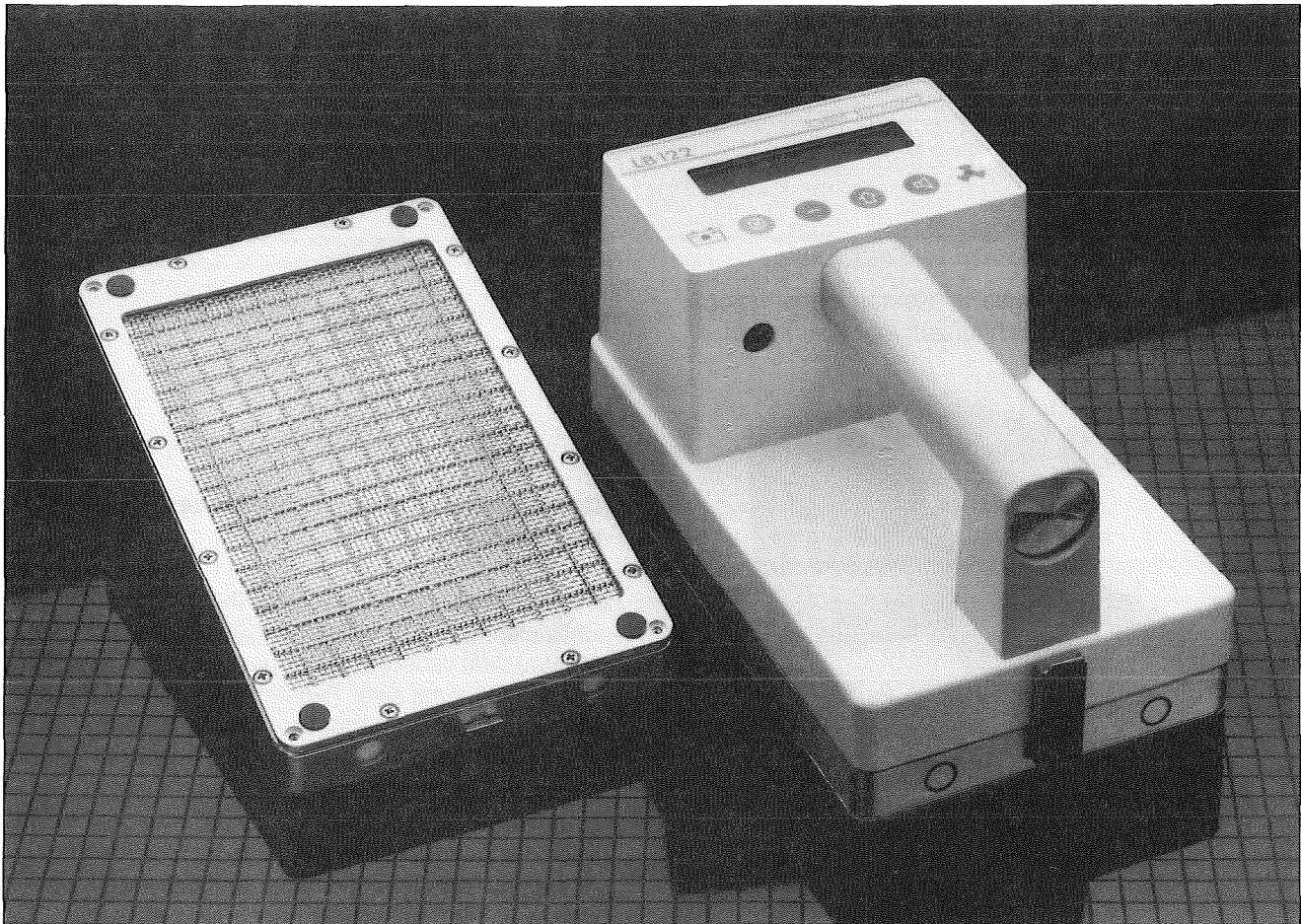


Abb. 24, 25, 26 Beispiele für moderne tragbare Kontaminationsmonitoren mit Großflächendetektoren der dritten Generation (Werksfotos Herfurth, FAG Kugelfischer, Berthold).



### Das Xenon-gefüllte Großflächen-Proportionalzählrohr

Der abgeschlossene Detektor bringt, nachdem seine Technik erst einmal beherrscht wird, gegenüber dem Durchflußzähler einen weiteren und für bestimmte Anwendungsbereiche sehr wichtigen Vorteil mit sich: er kann mit dem jeweils optimalen Zählgas gefüllt werden, ohne Rücksicht auf die Verfügbarkeit oder die Kosten, die bei Durchflußzählrohren häufig Kompromisse erzwingen. Die Notwendigkeit, vor allem in der Nuklearmedizin auch Kontaminationen durch reine Gamma- oder K-Strahler – insbesondere  $^{125}\text{J}$  – nachzuweisen, hat zu der Entwicklung des Xenon-gefüllten Großflächenzählrohrs geführt (20), das heute ebenfalls zu den Standarddetektoren bei Kontaminationsmonitoren gehört. Xenon ist einerseits als Zählgas gut geeignet und weist andererseits einen hohen Wirkungsquerschnitt für die Quantenabsorption auf (Abb. 27). Der Wirkungsgrad eines Xenondetektors für  $^{125}\text{J}$  liegt mit ca. 5 % zwar immer noch erheblich unterhalb dem von Szintillationszählern. Aber er ist in vielen Fällen zum Nachweis der geforderten Kontaminationsgrenzwerte ausreichend und der Einsatzbereich der Großflächendetektoren zur Kontaminationsmessung wird dadurch erheblich erweitert. Bei Verwendung von Methan oder Argon-Methan (P10) als Zählgas wäre der Wirkungsgrad für  $^{125}\text{J}$  4- bzw. 20-mal niedriger (21) und damit um die entscheidenden Faktoren zu gering.

Man könnte jetzt auf den Gedanken kommen, die Nachweisgrenze eines xenongefüllten Proportionalzählrohrs für K-Strahler wie  $^{125}\text{J}$  oder  $^{51}\text{Cr}$  dadurch zu verbessern, daß man es mit einer energiediskriminierenden Auswerte-Elektronik betreibt. Schließlich weist ein Proportionalzählrohr im niederen Energiebereich der Quantenstrahlung gute spektrometrische Eigenschaften auf. Ein typisches Spektrum von  $^{125}\text{J}$  zeigt Abb. 28.

Man kann durch Ausblenden des Energiefensters das Verhältnis von Probenzählrate und Nulleffektszählrate verbessern und damit die Nachweisgrenze senken, – theoretisch und im Prinzip jedenfalls. Praktisch ist aber der Gewinn nicht sehr groß, weil im Fenster ja auch der Wirkungsgrad  $E$  kleiner wird, und der geht in die „Gütekennzahl“  $E^2/B$  ( $B$  = Nulleffektsrate) bekanntlich im Quadrat ein. Außerdem hängen, was hier nicht im Detail diskutiert werden soll, Form und Lage der Peaks gerade beim Großflächenzählrohr mehr oder weniger von der geometrischen Position der Quelle relativ zum Detektorfenster ab.

Weit wirkungsvoller ist dagegen das Verfahren der Impulsform-Diskriminierung, wie es auch für  $^{125}\text{J}$  schon in (45) beschrieben wurde. Bei dieser Technik bleibt der Probenwirkungsgrad, also die Nutzzählrate, unverändert, während die Nulleffektsrate stark reduziert wird.

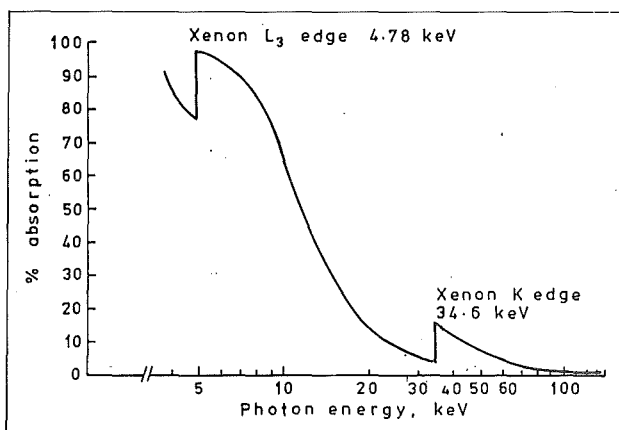


Abb. 27 Absorption von Fotonenstrahlung in einer Xenonschicht von 10 mm Dicke und 1 bar Druck (22).

### Impulshöhenverteilung im Xenon-Proportionalzählrohr BZ 200 bei der Messung von $^{125}\text{J}$

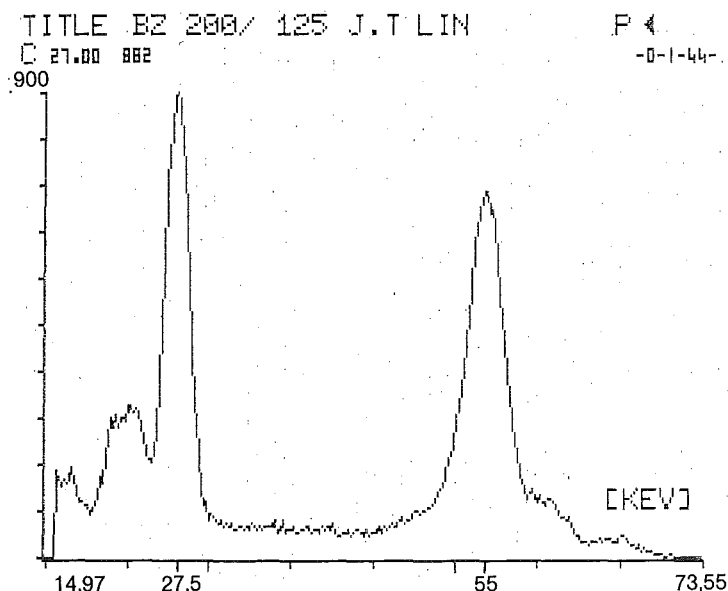


Abb. 28

### Dosisleistungsmessung mit Xenon-Zählrohren?

Allerdings verursacht die Xenonfüllung auch eine extrem starke Energieabhängigkeit der Zählrate von der Gamma-Dosisleistung (Abb. 29)(22). Wie die Abb. 29 zeigt, besteht bei Einstrahlung senkrecht zum Zählrohrfenster zwischen der 662 keV-Energie von  $^{137}\text{Cs}$  und den 30 keV mit der Energie direkt oberhalb der Xenon-K-Kante ein Unterschied um den Faktor 150. Das ist auch die Antwort auf die vielfach gestellte Frage, warum man mit einem Kontaminationsmonitor keine Dosisleistung messen kann. Wenn man noch die Möglichkeit der unterschiedlichen Strahleneinfallsrichtung in Betracht zieht, die zusätzlich den Faktor 3 bewirken kann, sieht man die Sinnlosigkeit solchen Bestrebens leicht ein.

Aber, wie so oft, ist auch diese Regel nicht ohne Ausnahme. Xenon-gefüllte Proportionalzählrohre können mit Vorteil dazu verwendet werden, die Dosisleistung an der Oberfläche von Bildschirmen zu messen, deren Röhrenspannung bekannt ist (23).

Natürlich werden abgeschlossene Detektoren nicht nur mit Xenon (plus, übrigens, entsprechenden UV-absorbierenden Gaszusätzen) als Zählgas verwendet. Der höhere Gamma-Wirkungsgrad des Xenon bringt zwangsläufig auch eine höhere Nulleffekts-Zählrate mit sich. Deshalb kann sich die Xenon-Füllung in Einsatzbereichen mit erhöhtem Strahlungsuntergrund ungünstig auf die Nachweisgrenze von Beta-Strahlern auswirken.

## Xenon-Proportionalzählrohr BZ 100: Gamma-Energieabhängigkeit Einfallsrichtung senkrecht zum Fenster

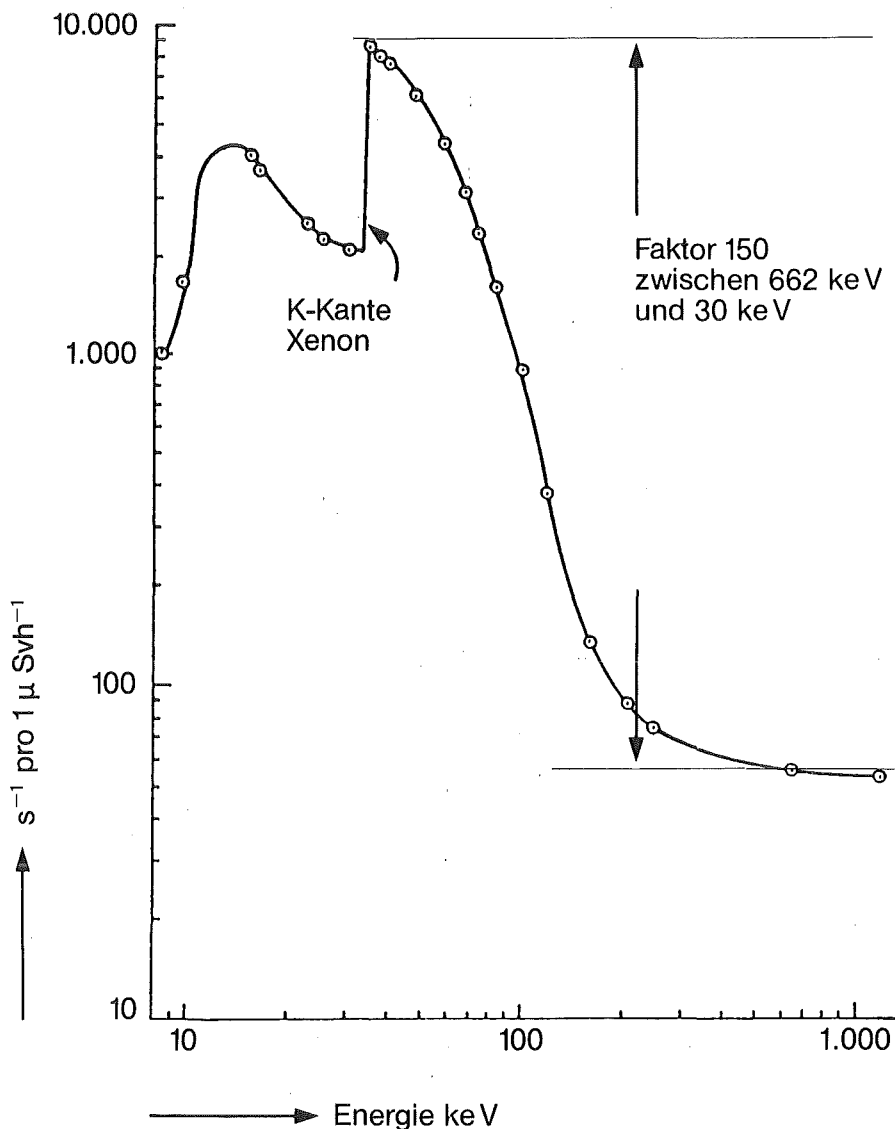


Abb. 29 (22)

### Vor- und Nachteile von Durchflußzählrohren mit dünner Fensterfolie

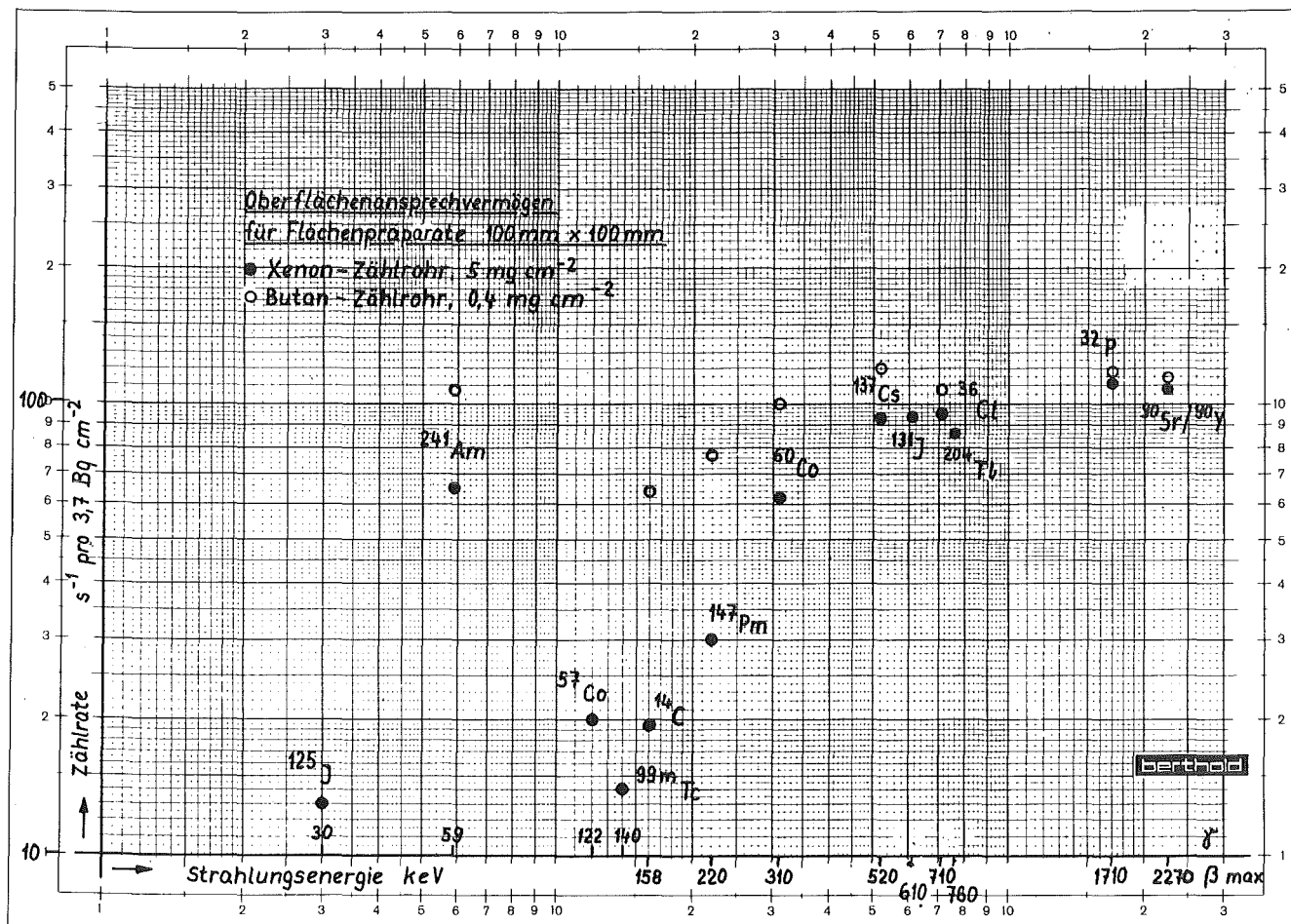
Trotz aller geschilderten Vorteile – es gibt Gründe, abgeschlossene Zählrohre **nicht** zu verwenden. Der erste Grund ist zwingend: wenn Alpha-Strahler gemessen werden müssen, sind die Folien, die in heutiger Technologie die notwendige Vakuum-Dichtheit garantieren, zu dick, um einen auch nur einigermaßen akzeptablen Wirkungsgrad zu sichern. Durch  $5 \text{ mg/cm}^2$  kommen eben nur noch Alphateilchen von über  $6 \text{ MeV}$  Energie durch; und das auch nur bei senkrechtem Einfall und wenn sie beim Eintritt in's Fenster noch ihre volle Energie mitbringen. Andererseits: über die viele Alpha-Zerfälle begleitende Quantenkomponente lassen sich gerade mit dem Xenon-gefüllten Zählrohr diese Nuklide, wie  $^{241}\text{Am}$ , noch mit durchaus brauchbarem Wirkungsgrad messen. (Abb. 30)(24).

Ein zweiter Grund, statt abgeschlossener Detektoren Durchflußzählrohre zu verwenden, kann im Streben nach Optimierung des Wirkungsgrades für niederenergetische Betastrahler gesehen werden. Die dünne Folie ( $0,3 - \text{ca. } 1 \text{ mg/cm}^2$ ) heutiger Durchfluß- oder Butanfüllzählrohre ermöglicht für  $^{14}\text{C}$  einen ca. 4-fach höheren Wirkungsgrad (vergleiche Abb. 30). Allerdings tauscht man diesen Gewinn an Empfindlichkeit

für Betastrahler zumindest gegenüber dem Xenon-Zählrohr ein gegen einen entsprechenden Verlust bei den niederenergetischen Quantenstrahlern.

Der dritte Grund ist eine rein praktische Überlegung. Ist bei einem im Durchfluß betriebenen Zählrohr die dünne Fensterfolie zerstört, so kann der Benutzer, zumindest der geschickte oder geübte Benutzer, sie leicht gegen eine neue auswechseln. Kleine Beschädigungen können sogar abgeklebt werden, etwa mit Tesafilm. Beim abgeschlossenen Zählrohr dagegen führt eine Undichtheit der Fensterfolie unweigerlich dazu, daß der Detektor zur Reparatur und Neufüllung an den Hersteller eingeschickt werden muß. Reparaturpreise liegen bei etwa einem Drittel der Neupreise. Wenn also von den Einsatzbedingungen her die Wahl zwischen den beiden Detektorarten überhaupt besteht, muß der Benutzer sich zwischen den Unannehmlichkeiten der Gasversorgung – die ja auch Geld kostet – und den Reparaturen entscheiden. Ein methanbetriebenes Durchflußzählrohr verursacht bei Dauerbetrieb im Jahr ca. DM 700, – – Gaskosten. Dafür kann man auch einmal das Fenster eines abgeschlossenen Zählrohrs reparieren lassen. Beim etwa doppelt so teuren P-10 als Zählgas verschieben sich die Verhältnisse noch wesentlich zugunsten des abgeschlossenen Zählrohrs.

Abb. 30 Vergleich des Oberflächen-Ansprechvermögens eines Xenon- und eines Butan-Großflächenzählrohrs (46).





## Flüssiggas-Füllzählrohre

Bei tragbaren Geräten zur Alpha-Kontaminationsmessung sind heute Flüssiggas-Zählrohre die Regel. Von der Benutzung des üblichen Feuerzeug-Gases ist jedoch abzuraten, da dieses Gas häufig organische Verunreinigungen enthält, die das Zählrohr intern verschmutzen und bei häufigem Nachfüllen rasch unbrauchbar machen. Die Hersteller liefern spezialgereinigtes Butan.

Butan-Füllzählrohre sind von Natur aus instabil. Wie lange mit einer Füllung gemessen werden kann – in der Regel einige Stunden – hängt nicht nur von der Konstruktion ab, sondern auch von äußeren Einflüssen wie Temperatur- und Druckschwankungen, die das Zählrohr „atmen“ lassen. Die Betriebstemperatur ist nach unten durch den abnehmenden Dampfdruck auf etwa 0° C beschränkt. Das kann bei Katastropheneinsätzen ein entscheidendes Hindernis sein. Xenonzählrohre arbeiten bis zu weit tieferen Temperaturen (ca. -20° C und tiefer) einwandfrei.

## Automatische Plateaukontrolle

Um die Unsicherheiten beim Betrieb von Füllzählrohren in Grenzen zu halten, kann die moderne Technik eine automatische Plateaukontrolle realisieren. In zwei getrennten Kanälen werden laufend die Impulsraten im Arbeitspunkt und im vorderen steilen Plateauanstieg gemessen und miteinander verglichen. Dazu reichen die Nulleffekts-Impulsraten des Beta-Bereichs im allgemeinen aus. Abweichungen des Impulsratenverhältnisses vom Sollwert zeigen frühzeitig Plateauveränderungen an, die durch Zählgasmangel infolge von Diffusion oder niedrigem Dampfdruck verursacht sein können.

## Gleichzeitige Alpha-Beta-Messung?

Die Technik der gleichzeitigen, getrennten Alpha-Beta-Messung durch Impulsformanalyse (41), in stationären Geräten wie Hand-Fuß-Kleider-Monitoren heute weitgehend realisiert, stößt bei tragbaren Geräten noch auf Schwierigkeiten, die in der Gasversorgung begründet sind. Die saubere Impulsformanalyse setzt konstante Zählgasverhältnisse voraus, die eben in Butan-Füllzählrohren nicht gegeben sind. Man kann deshalb bisher mit solchen tragbaren Geräten nur kurzzeitig arbeiten oder muß die Gasflasche zur kontinuierlichen Spülung mitführen.

## Erst durch Großflächen-Proportionalzählrohre möglich geworden: die Ganzkörper-Kontaminationsmonitoren

Ein geradezu ideales Einsatzgebiet für Großflächenproportionalzählrohre sind die modernen Ganzkörper-Kontaminationsmonitoren, die um die 20, gelegentlich sogar bis zu 40 oder 50 einzelne Zähler oder Zählkam-

mern enthalten (Abb. 31). Die Zählrohre werden meist im Durchfluß betrieben. Um derart viele Zählrohre gleichzeitig zuverlässig mit Zählgas zu versorgen, ist einiger konstruktiver Aufwand und eine sorgfältige Überwachung des Zählgasflusses notwendig. Hier werden unterschiedliche Techniken angewandt, wie etwa die Intervallspülung. Nicht zuletzt wegen dieses Aufwands sind auch Geräte mit abgeschlossenen Detektoren im Einsatz, vor allem in der Nuklearmedizin. Insgesamt dürften bislang über zwanzigtausend Proportional-Detektoren allein in Ganzkörperzählern verwendet werden.

Ähnliche geometrische Anordnungen von Großflächenzählrohren werden auch in den unterschiedlichsten Systemkonfigurationen für die Ermittlung der Aktivität in und an Abfallgebinden eingesetzt, wobei sie oft noch mit Gammadetektoren zur Spektroskopie gekoppelt sind.

**Abb. 31** Beispiel für die Anwendung von Großflächen-Proportionalzählrohren in einem Ganzkörper-Kontaminationsmonitor (Werksfoto Herfurth).



### **Das alles geht nur im Proportionalbereich!**

Ich möchte hier besonders anmerken, daß derartige Großflächenzählrohre praktisch nur im Betrieb als Proportionalzählrohre zu realisieren sind. Einerseits würden mit einem Detektor dieser Abmessungen im Auslösebereich unzumutbare Totzeiten entstehen; der nutzbare Meßbereich zwischen Nulleffekts- und Sättigungsrate wäre bei großen Zählrohren noch nicht einmal 3 Dekaden. Andererseits, und entscheidender, ließen sich für den Auslösebereich geeignete Zählgas-mischungen im Durchfluß nur mühsam oder teuer herstellen – was nicht ausschließt, daß es sie für kleinere Detektoren gibt, wie das sogenannte Q-Gas. Aber noch ein dritter Grund kommt hinzu. Da Großflächen-detektoren, ob im Durchfluß oder abgeschlossen, immer mit Atmosphärendruck oder nur wenig darunter gefüllt sind, wären zum Erreichen des Auslösebe-reichs sehr hohe Spannungen notwendig, die wie-derum an die Isolation hohe Ansprüche stellen.

### **Fensterfolienlose Proportionalzählrohre zur Tritium-Messung**

Eine Variante der im Durchfluß betriebenen Proportionalzählrohre sind die fensterlosen Detektoren zur Tritium-Messung (25). Hiervon existieren recht unterschiedliche kommerzielle Ausführungen. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in der Art des Zählgases (Butan oder Argon-Methan) und in Form und Größe der Fensterfläche (eine große oder viele kleine, auf eine größere Fläche verteilte Fensteröffnungen). Man kann das Dilemma bei der Konzeption – das dann wieder auf die Anwendung durchschlägt – von fensterlosen Tritiumdetektoren mit einem Satz umreißen: je größer die Fensteröffnung und je höher der Wirkungsgrad gegenüber Tritium, desto instabiler und von äußeren Bedingungen abhängig wird der Betrieb des Zählrohrs. Zu diesen äußeren Bedingungen gehören Form und Beschaffenheit der auszumessenden Oberfläche, ihr Abstand von Zählrohr, elektrostatische Aufladungen, elektrische Streufelder und schließlich die Verschmutzungsgefahr des Zählrohrin-neren.

### **Eine besondere Anwendung: Messung der Radioaktivität in Wasser und Lebensmitteln**

Großflächenzählrohre sind schon sehr früh zur Direktmessung der Alpha- und Beta-Radioaktivität in Wasser eingesetzt worden (26,27). Dabei werden die Detektoren über einer freien Wasseroberfläche angebracht, was allerdings gewisse technische Probleme mit sich bringt (28). Eine spezielle Variante dieser Meßtechnik waren die Messungen der Radioaktivität in Lebensmitteln mit tragbaren Kontaminationsmonitoren nach Tschernobyl (29,30).

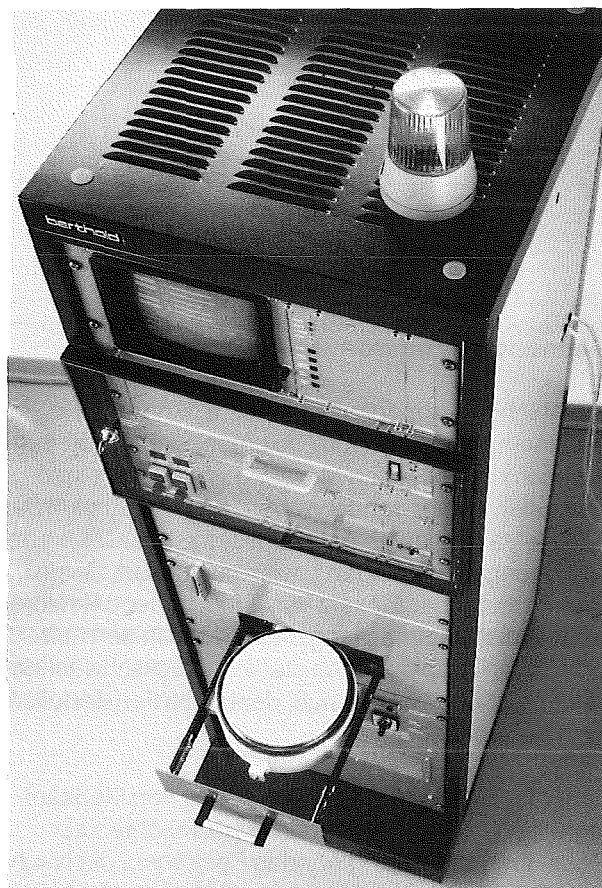
## **Proportionalzählrohre zur Mes- sung der luftgetragenen Aktivität (Tabelle 4)**

### **Messung der Aerosolaktivität**

Die direkte Messung der luftgetragenen Aktivität läßt sich, was die Anordnung der Detektoren betrifft, in drei Verfahren einteilen: die Messung mit einem abge-schlossenen Detektor im Luftraum, und die Messung der Luft im Durchfluß durch einen Detektor.

Die Verwendung von Großflächendetektoren für die Ausmessung eines Filters während der Bestäubung hat es möglich gemacht, Filter mit großer Fläche (300 cm<sup>2</sup>) zu verwenden und dadurch einen hohen Luftdurchsatz zu erzielen. Da mit dem Proportional-zählrohr außerdem Alpha- und Betastrahlung getrennt gemessen werden können, ist dies auch der geeig-nete Detektor zur Anwendung des Pseudokoinzidenz-verfahrens für die Diskriminierung der natürlichen Radioaktivität (31). Eine moderne Anlage dieser Art zeigt Abb. 32.

Die Alpha-Beta-Trennung erfolgt bei der Pseudokoinzi- denz heute noch durch zwei getrennte Zählkammern. Diese Trennmethode ist derzeit noch einfacher zu realisieren als die elektronische Kombination von Impulsform-Diskriminierung und Zeitbeziehungs-Analyse.



**Abb. 32** Alpha-Beta-Aerosolaktivitätsmeßanlage mit großflächigem Filter und einem Dreistufen-Proportionalzählrohr als Detektor (Werksfoto Berthold).



Tab. 4

## Anwendung für spezifische Meßaufgaben

### Messung der luftgetragenen Aktivität

Bauform	Signalverarbeitung	Meßaufgabe
Großflächenzählrohr mit Fensterfolie bis 20 cm $\phi$	Impulszählung	Alpha-Beta-Aerosol-Messung auf Filtern
	Zeitbeziehung (Pseudokoinzidenz)	
Großvolumiges Proportionalzählrohr im Durchfluß	Impulszählung	Alpha-Beta-Gasaktivitätsmessung im Meßbehälter
	Antikoinzidenz	
Großvolumiges Proportionalzählrohr im Durchfluß	Impulszählung	Tritium-in-Luftmessung
	Impulsform-Diskriminierung	

### Messung der gasförmigen Aktivität

Großflächige Proportionalzählrohre, eingebaut in Meßkammern bis ca. 100 l Volumen, sind schon früh zur hochempfindlichen Messung von gasförmiger Radioaktivität verwendet worden (31). Der Einfluß des Nulleffekts wird durch Antikoinzidenz- oder Differenzanordnungen vermindert bzw. kompensiert. Seine Grenze findet der Einsatz von Großflächendetektoren zur Gasaktivitätsmessung dann, wenn in den Luftkreisläufen mit plötzlichen starken Druckschwankungen gerechnet werden muß, denen die Fensterfolien nicht gewachsen sind.

Einer der Gründe für die Verwendung von Meßkammern mit Großflächenproportionalzählrohren zur Gasaktivitätsmessung war das Bestreben, die Nachteile der ursprünglich für diesen Meßzweck fast ausschließlich benutzten Durchfluß-Ionisationskammern zu vermeiden, die in der Tat auch heute aus der Gasaktivitätsmeßtechnik fast völlig verschwunden sind. Mit

einer Ausnahme: zur Messung eines so niederenergetischen Betastrahlers wie Tritium werden sie nach wie vor benutzt. Die Grenzen dieser relativ einfachen Technik sind allerdings erreicht, wenn  $^3\text{H}$ -Konzentrationen unterhalb einiger 100 kBq/m<sup>3</sup> gemessen werden müssen und vor allem, wenn das Tritium in Gegenwart anderer gasförmiger Radionuklide, wie  $^{85}\text{Kr}$  oder  $^{133}\text{Xe}$ , vorkommt.

### Messung der Tritiumaktivität in der Luft

Schon Anfang der 60er Jahre ist deshalb im Kernforschungszentrum Karlsruhe ein großvolumiges Proportionalzählrohr im Durchfluß dazu verwendet worden, Tritium in Luft mit hoher Empfindlichkeit und selektiv zu messen (33). Dabei muß allerdings in Kauf genommen werden, daß die Luft zuvor mit Zählgas – etwa im Verhältnis 1:3 – gemischt werden muß, was die mögliche Gesamt-Durchflußrate aus schieren Kostengründen auf einen oder einige Liter pro Minute begrenzt.

Trotz dieses Handicaps hat sich das Proportionalzählrohr anstelle der Ionisationskammer in der Bundesrepublik rasch durchgesetzt. Heute werden Tritiummonitoren nach diesem Meßprinzip auch im Ausland verstärkt eingesetzt, weil die geforderten niedrigen Nachweisgrenzen in einem Direktmeßverfahren anders nicht erreichbar sind.

Die Trennung von  $^3\text{H}$ - und höherenergetischen Beta-Teilchen erfolgte bei der ursprünglichen Karlsruher Entwicklung nach dem Prinzip der Reichweitendiskriminierung unter Verwendung eines Meß- und eines Schirmzählers (Abb. 33). Da die Reichweite von Tritium in Luft nur 1 bis 2 mm beträgt, kann nur ein geringer Teil der Beta-Teilchen von Tritium im Meß- und Schirmzähler gleichzeitig Impulse auslösen. Der Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, daß nur etwa 25 % der Probe im Meßzähler ist, während der Rest aus konstruktiven Gründen notwendigerweise im Schirmzähler und im Totvolumen verteilt ist.

**Selektive  $^3\text{H}$ -Messung durch Anstiegszeit-Diskriminierung**

Vor einigen Jahren wurde deshalb ein neues Verfahren entwickelt, bei dem zur  $^3\text{H}$ -Trennung die Impulsformdiskriminierung verwendet wird (34). Die Impulsanstiegszeit in einem Proportionalzählrohr ist wesentlich durch unterschiedliche Driftzeiten der in der Ionisationsspur erzeugten Sekundär-Elektronen auf dem Wege zum Zählrohr bestimmt. Je geringer die Reichweite eines Beta-Teilchens ist, umso geringer ist im Mittel die zeitliche Streuung des Eintreffens der Sekundär-Elektronen am Zählrohr, d.h. umso kürzer ist die Anstiegszeit. Abb.34 zeigt ein solches Anstiegszeitspektrum für Tritium.

Durch eine Anstiegszeitdiskriminierung können bis zu einem gewissen Grad unterschiedliche Radionuklide

selektiert werden. Dies gilt nicht nur für Beta-Strahler, sondern auch für andere Elektronenstrahler (Positronen, innere Konversion, Auger-Elektronen).

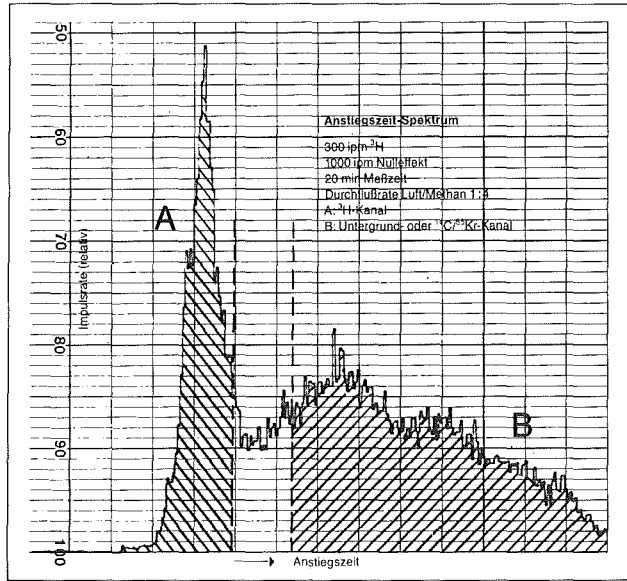


Abb. 34 Anstiegszeit-Spektrum von Tritium- und Background-Impulsen

Die theoretischen Nachweisgrenzen eines solchen Monitors liegen bei  $1 \text{ kBqm}^{-3}$  in 1 min und bei  $0,01 \text{ kBqm}^{-3}$  in 24 h Meßzeit. Allerdings ist darauf hinzuweisen, daß in der Praxis, weit mehr noch als bei anderen Monitoren, die Nachweisgrenze durch Einflußfaktoren wie Langzeitstabilität, Eigenkontamination oder Störstrahlung bestimmt wird. Auf gute Störstrahlungsdiskriminierung und effektive Regelung zur Konstanthaltung des Gas-Luft-Durchsatzes muß deshalb bei der Auswahl von  $^3\text{H}$ -Monitoren großen Wert gelegt werden. Ein generelles Problem bei der Messung von Radioaktivität im Durchflußverfahren ist die interne Kontamination der Detektoren, die gerade beim Tritium besonders ausgeprägt ist. Sie läßt sich durch konstruktive Maßnahmen verringern, aber nicht ganz vermeiden.

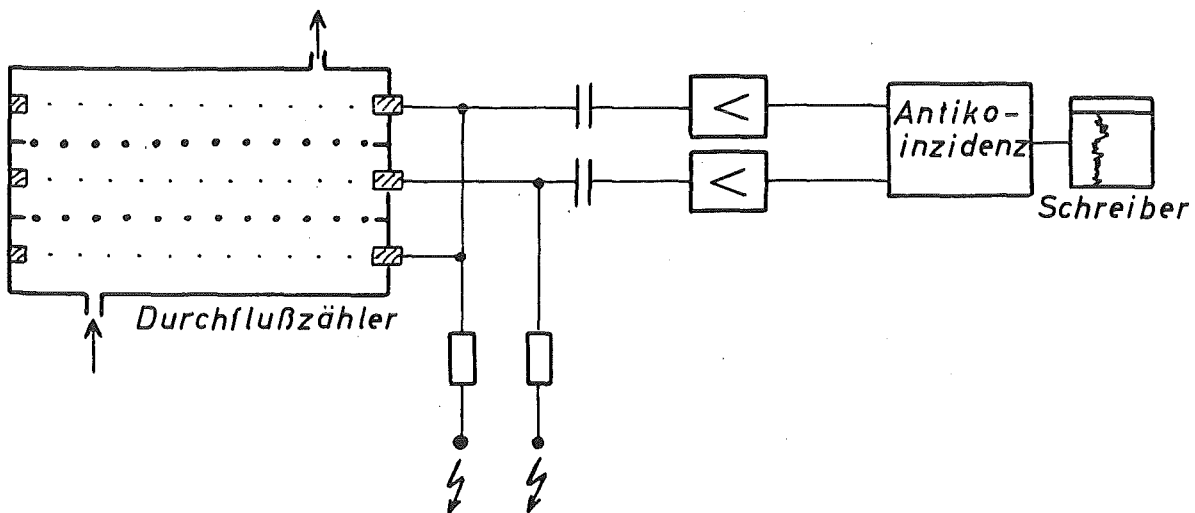


Abb. 33 (34) Schema eines Tritium-Monitors mit Reichweitendiskriminierung.

## Proportionalzählrohre zur Aktivitätsmessung in Grenzgebieten des Strahlenschutzes (Tab. 5)

### Einsatz von Proportionalzählrohren in der Kernphysik

Zählrohre sind, wie wir eingangs gesehen haben, ursprünglich als Werkzeuge zur Lösung physikalischer Fragestellungen in der Kernstrahlungs- und Elementarteilchenforschung entwickelt worden. Auch heute sind insbesondere die Proportionalzählrohre wichtige Detektoren in der Hochenergiephysik. Sie werden ferner verwendet zur Spektroskopie der Röntgenfluoreszenzlinien in der Feinstrukturanalyse. Diese Einsatzgebiete sollen hier, weil zu weit vom Strahlenschutz abliegend, nicht betrachtet werden. Aber es gibt noch einige Anwendungen von Proportionalzählrohren in Grenzgebieten, die ein weiteres Licht auf die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten dieser Detektoren werfen.

### Messung von Spurenaktivität in Halbleiter-Materialien

Low-level-Meßplätze mit Großflächendetektoren zur Messung der Aktivität an ausgedehnten Festproben werden heute dazu verwendet, kleinste Spuren von Radioaktivität in Materialproben zu erkennen.

Die wohl höchste Nachweisempfindlichkeit ist derzeit bei der Kontrolle von Materialien gefordert, die mit elektronischen Speicherbauelementen in Berührung kommen. Alpha-Emissionsraten von  $0,001 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  werden dort noch als ursächlich für die Löschung von Speicherinhalten angesehen.

Um derart kleine Aktivitäten noch nachweisen zu können, müssen auf extrem niedrige Alpha-Nulleffektwerte gezüchtete Meßsysteme eingesetzt werden. Dazu bedarf es nicht nur einer sorgfältigen Materialauswahl, sondern auch der Vermeidung von natürlichem Radon und dessen Folgeprodukten an den Proben selbst und im Zählraum, beispielsweise durch Spülung mit einem Schutzgas wie  $\text{N}_2$ .

Tab. 5

### Anwendung für spezifische Meßaufgaben

#### Aktivitätsmessung in Grenzgebieten des Strahlenschutzes

Bauform	Signalverarbeitung	Meßaufgabe
Großflächenzählrohr	Impulzzählung Antikoinzidenz	Ultra-low-level-Aktivitätsmessung an Materialproben
Bohrlochzählrohr mit Xenonfüllung	Impulzzählung	Multidetektor-Radio-Immuno-Assay
Ortsabhängiges Eindraht-Zählrohr, eindimensional	Delay-Line-Laufzeitmessung, Impulshöhenanalyse	Dünnschicht-Radiochromatographie
Ortsabhängige Vieldraht-Kammer, 2-dimensional Zählfläche 200 mm x 200 mm	Matrix-Speicher	Digitale Autoradiographie

### Einsatz von Xenon-Proportionalzählrohren für den Radioimmuno-Assay

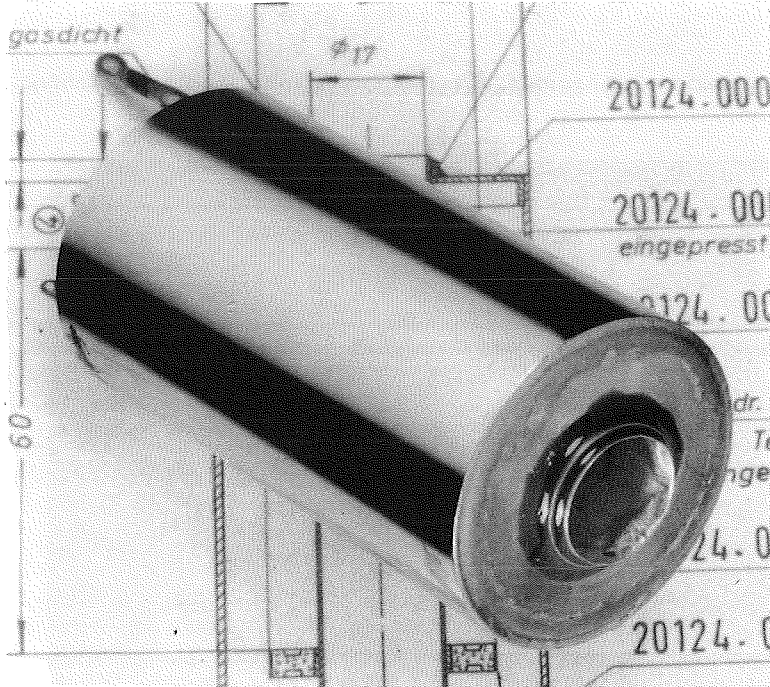
Eine besonders interessante Anwendung hat das Xenon-gefüllte Proportionalzählrohr als Alternative zu einem Bohrloch-Szintillations-Kristall bei der Radioimmuno-Assay-Technik gefunden. Solche ringförmigen Zählrohre (Abb. 35) zur Messung von <sup>125</sup>J-markierten Proben in einem Reagenzglas erreichen bei einem Zählgasdruck von 4 bar Wirkungsgrade von nahe 40 %, verglichen mit den ca. 70 % eines NaJ-Detektors gleicher Geometrie, wobei die Kosten weit geringer sind als die des Kristalls mit Photomultiplier. Abb. 36 zeigt den Abdruck einer automatischen Plateaufaufnahme für dieses Zählrohr mit dem dazugehörigen Wert für den Wirkungsgrad. Mehr als 25000 Exemplare sind bisher hergestellt worden.

TUBE# 7177		
HV	CFM	EFF (%)
3	523	3.7
3.1	2192	15.5
3.2	4357	30.8
3.3	4823	34.1
3.4	5163	36.5
3.5	5205	36.8
3.6	5276	37.3
3.7	5290	37.4
3.8	5347	37.8
3.9	5389	38.1
4	10553	74.6

SLOPE= .7%  
BKGD.....

FILE: T26.2.1985F1  
DATE: 26.2.1985

**Abb. 36** Ausdruckbeispiel für die automatische Plateau- und Wirkungsgradbestimmung eines xenon-gefüllten Bohrloch-Proportionalzählrohrs



**Abb. 35** Bohrloch-Proportionalzählrohr für RIA-Messungen.  
(Werksunterlagen Berthold).

### Messung einer flächigen Radioaktivitätsverteilung

Fensterlose Proportionalzählrohre werden schon seit vielen Jahren als Detektoren in der Dünnschicht-Radiochromatographie für die Ausmessung der Radioaktivitätsverteilung in  $^3\text{H}$ - und  $^{14}\text{C}$ -markierten Platten eingesetzt. Bei den ersten Systemen dieser Art mußte ein Zählrohr mit verhältnismäßig kleiner Fensteröffnung zum Abtasten der 20 cm x 20 cm großen Platte mechanisch in zwei Richtungen – z.B. mäanderförmig – bewegt werden, um die Werte der einzelnen Meßorte nacheinander zu gewinnen. Daraus resultierten lange Gesamt-Meßzeiten.

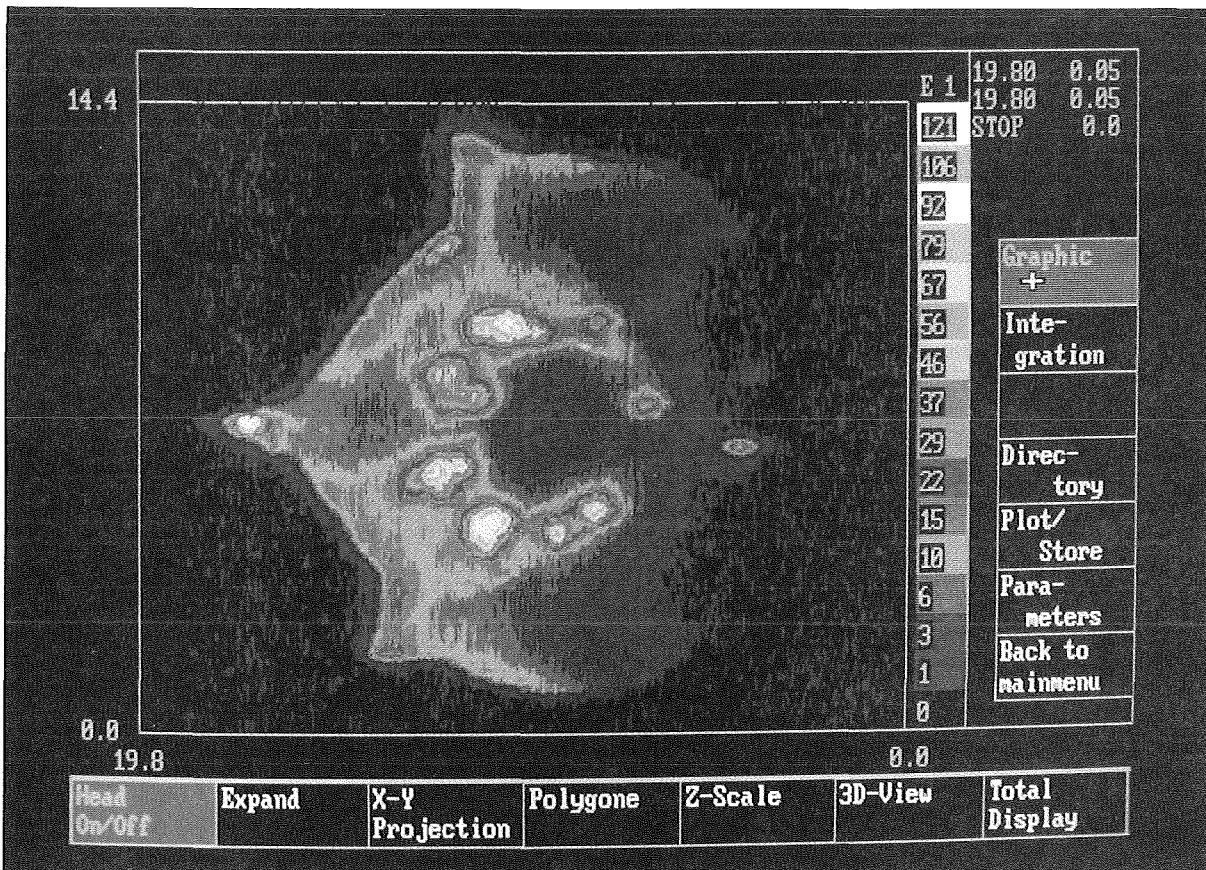
Die Weiterentwicklung konzentrierte sich demgemäß auf ein größeres, eindimensional ortsempfindliches Zählrohr mit ca. 0,5 mm räumlicher Auflösung (35). Damit konnte man nun mit einem Meßvorgang eine Spur abtasten und mußte das Zählrohr, zum Erfassen der ganzen Platte, nur noch in eine Richtung quer zu den Spuren bewegen.

Inzwischen ist mit dem „digitalen Autoradiograph“ ein Stand erreicht, bei dem – durch zwei rechtwinklig

zueinander stehende Zählrahtgitter – mit einem zweidimensional ortsempfindlichen Proportionalzähler die ganze Fläche der Platte gleichzeitig zur Messung gelangt. Mit dem Computer läßt sich dann, bei Meßzeiten von Minuten bis höchstens Stunden, auf dem Bildschirm die Aktivitätsverteilung sichtbar machen, während die jeweilige Intensität durch Grau- oder Farbabstufungen dargestellt wird (36). Die Empfindlichkeit eines solchen Systems ist enorm, da durch hohe Ortsauflösung der Nulleffekt pro Meß- bzw. Bildpunkt von 0,2 mm<sup>2</sup> weniger als 0,005 cpm beträgt. Der dynamische Meßbereich ist um ca. 3 Zehnerpotenzen größer als bei der Autoradiographie, die Meßzeit um 3 Zehnerpotenzen kleiner.

Ein Beispiel für eine mögliche Anwendung im Strahlenschutz zeigt Abb. 37, in der die Aktivitätsverteilung in einem Blatt gezeigt ist, wie sie mit dem digitalen Auto-Radiograph gemessen wurde. Konventionelle Filmschwärzungs-Autoradiographien dieser Art wurden nach Tschernobyl vielfach hergestellt, um eventuelle heiße Teilchen zu finden. Ähnlich könnte die Kenntnis der Aktivitätsverteilung auf Luftfiltern, in Ascheproben etc. für den Strahlenschutz von Interesse sein.

**Abb. 37** Aufnahme der Radioaktivitätsverteilung in einem Pflanzenblatt mit einem zweidimensional ortsempfindlichen Proportionalzählrohr (36).



# Einiges zur Zukunft oder: wie werden sich die Proportionalzählrohre weiterentwickeln?

Das Proportionalzählrohr – und vor allem seine spezifische Bauform als Großflächenproportionalzählrohr – hat in den vergangenen rund 30 Jahren zahlreiche Entwicklungsstufen durchlaufen, die seine Anwendungsmöglichkeit im Strahlenschutz enorm erweitert haben. Seit den frühen 60er Jahren, in denen die Grundpatente für die Großflächen-Proportionalzählrohre erteilt wurden, sind zur Konstruktion und zur Anwendung von Proportionalzählrohren im Strahlenschutz mehr als 50 Patent- und Gebrauchsmuster-Anmeldungen erfolgt. Sie betreffen, um nur einige Gebiete zu nennen, die elektrische Unterteilung in Kammern, die Gasführung in fensterfolienlosen Zählrohren, die Gasführung im Butan-Füllzählrohr, die Verlängerung der Lebensdauer der Gasfüllung, „gewinkelte“ Fenster und den Betrieb der Detektoren bei hohen Zählraten.

Der künftige Fortschritt wird voraussichtlich nicht mehr so sehr in der Erschließung neuer Einsatzbereiche liegen, sondern sich auf technologische Verbes-

serungen zur vereinfachten Fertigungstechnik, erhöhten Betriebssicherheit und möglicherweise zur Erweiterung des Meßbereichs konzentrieren (Tab. 6)

## Proportionalzählrohre zur Gamma-Aktivitätsmessung?

Im Abschnitt „Ausblick“ seiner Habilitationsschrift vom Dezember 1964 nennt H.Kiefer als ein wesentliches Entwicklungspotential des Großflächen-Proportionalzählrohrs seinen Einsatz zur Gamma-Aktivitätsmessung (15). Er führt dann einige Möglichkeiten an, wie das ja an sich kleine Ansprechvermögen dieses Detektortyps für Quantenstrahlung verbessert werden könnte.

Diese Vorhersage hat sich insofern erfüllt, als das Xenon-gefüllte Großflächen-Proportionalzählrohr sich in der Tat zur Kontaminationsmessung im Bereich niederenergetischer Fotonenstrahler weitgehend durchgesetzt hat. Heute werden, wie im Vorangegangenen geschildert wurde, Hochdruck-Xenonzählrohre sogar erfolgreich als Konkurrenten von NaJ-Kristallen für RIA-Messungen verwendet.

Vor allem ist das Proportionalzählrohr dann der geeignete Detektor, wenn es von der Anwendung her seine inhärente Überlegenheit bei der Spektroskopie im niederen Energiebereich der Fotonen voll ausspielen kann.

Tab. 6

### Absehbare Entwicklungstendenzen

Ziel der Weiterentwicklung	zu erreichen durch
vereinfachte Fertigungstechniken	Verwendung von Kunststoffteilen gedruckte Zähldrähte
höhere Betriebssicherheit	integrierte Elektronik automatische on-line-Plateaukontrolle
billiger Betrieb von Durchflußzählrohren	spezifische Konstruktion für CO <sub>2</sub> , Schweißgas, Luft als Zählgas
Erweiterung des Meßbereichs: Dosisleistung Kontamination	automatischer Übergang zu kleinerem Multiplikationsfaktor / Strombetrieb

Allerdings ist die Entwicklung damit wohl auch schon am Ende angelangt, denn einerseits ist und bleibt ein Proportionalzählrohr bei der Messung höherenergetischer Gammastrahler dem Szintillationszähler hoffnungslos unterlegen. Und andererseits haben sich ja auch die Szintillationszähler seit 1964 weiterentwickelt. Das hat beispielsweise dazu geführt, daß der Sandwich-Szintillations-Detektor den ursprünglich recht erfolgreich eingesetzten Großflächen-Antikoinzidenz-Spektroskopie-Proportionalzähler zur in-vivo-Messung der Pu-Lungenaktivität (37) wieder verdrängt hat. Näheres dazu bringt der Vortrag von H. Doerfel in diesem Bericht.

### Vereinfachte Fertigungstechniken

Ein Fortschritt, den der Benutzer von Proportionalzählrohren nicht unmittelbar bemerkt, der aber unter dem Zwang zur Herstellungsrationalisierung, insbesondere bei großen Stückzahlen unumgänglich ist, wird durch vereinfachte Fertigungstechniken erzielt. Die Verwendung von Kunststoff hält auch hier ihren Einzug.

Entgegen der Ansicht mancher Experten, die Kunststoff wegen seiner Oberflächeneigenschaften für einen ungeeigneten Zählrohrwerkstoff hielten, kann heute durch Oberflächenveredelung auch solches Material erfolgreich verwendet werden. Abb. 38 zeigt als Beispiel ein aus Kunststoff gefertigtes Zählrohr zur Verwendung in Kleingeräten der unteren Preisklasse. Von diesem Zählrohr sind schon Stückzahlen über 7000 gefertigt worden.

Kritischer Punkt einer jeden Zählrohrkonstruktion sind die Zähldrähte, insbesondere bei den Großflächendetektoren mit ihren Zähldrahtgittern, sowohl in Bezug auf einfache und sichere Montage, wie auf die mechanische Stabilität. Hier bietet die Ätztechnik der Leiterkartenproduktion heute die Möglichkeit an, gedruckte Zähldrähte zu benutzen. Abb. 39 zeigt einen Auszug aus einer Patentschrift dazu. Allerdings steckt diese Technologie noch in den Anfängen und manche Probleme, wie das der elektrostatischen Aufladung der Platten, bedürfen noch der Lösung.

Ganz allgemein wird sich künftig auch eine weit stärkere Integration von Zählrohr und Elektronik durchsetzen. Abb. 40 und 41 zeigen dafür Beispiele.

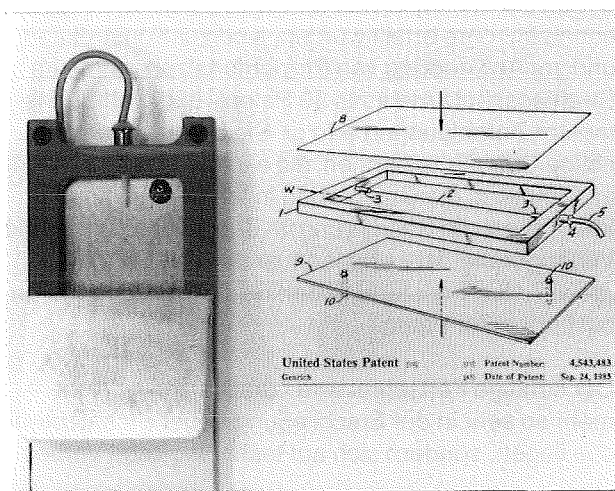


Abb. 38 Ein in Kunststofftechnik aufgebautes Proportionalzählrohr (Werksfoto Genitron).

## Offenlegungsschrift DE 3607 567 A1 vom 10.09.1987: Proportionaldetektor mit Elektroden als gedruckte Schaltung

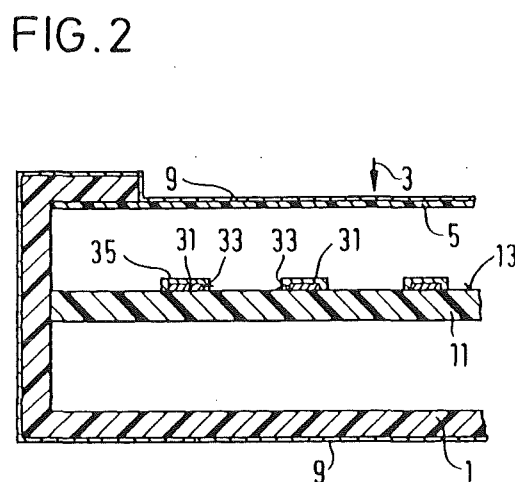
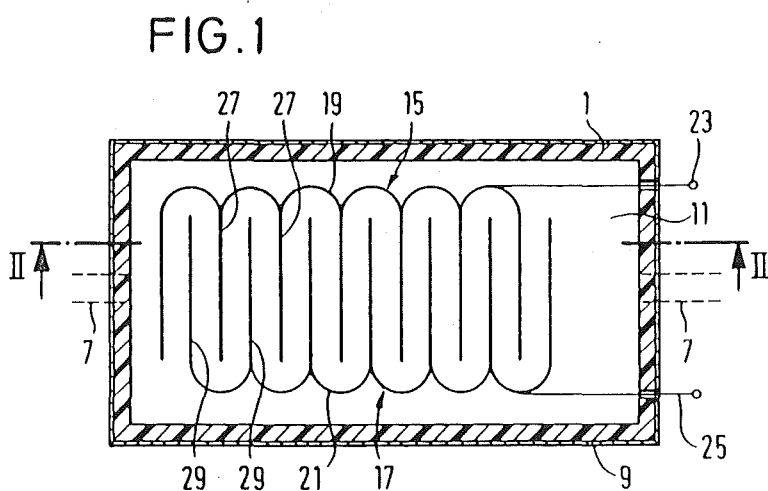


Abb. 39



### Höhere Betriebssicherheit der Zählrohre

Es ist ganz sicher ein wichtiges und den Prinzipien des Strahlenschutzes angemessenes Entwicklungsziel, die Betriebssicherheit der Zählrohre zu erhöhen. Die meisten der im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigten Maßnahmen zur Fertigungsvereinfachung tragen, sozusagen auf passive Weise, auch zu einer höheren Betriebssicherheit bei. Eine aktive Verbesserung der Betriebssicherheit, die sich insbesondere bei Durchfluß- und Füllzählrohren auswirkt, ist die bereits erwähnte automatische on-line-Plateaukontrolle mit Hilfe der natürlichen Nulleffektsstrahlung.

### Senkung der Betriebskosten bei Durchflußzählrohren

Durchflußzählrohre verursachen infolge ihres ständigen Gasverbrauchs nicht unerhebliche Betriebskosten. Bei brennbaren Gasen, wie Methan, schränken oft Sicherheitsvorschriften den Einsatz ein. Es bestehen von Seiten der Anwender daher Bestrebungen, einerseits unbrennbare, andererseits möglichst billige Zählgase wie  $\text{CO}_2$ , das sogenannte „Schweißgas“ ( $\text{Ar-CO}_2$ ) oder in speziell gelagerten Fäßen auch Luft zu verwenden. Das geht aus Gründen, die wir im ersten Teil dieses Vortrags gesehen haben, nicht ohne weiteres mit jedem beliebigen Zählrohr. Die Konstruktion und die verwendeten Materialien müssen spezifisch auf den Betrieb mit bestimmten Zählgasen optimiert sein. Hier bleibt für die Zukunft noch manches zu verbessern.

Versuche, speziell Luft als Zählgas zu verwenden, sind immer wieder gemacht worden. Es hat sich aber gezeigt, daß man entweder doch eine Vorbehandlung der Luft braucht (38), was die Anwendbarkeit des Verfahrens wieder stark einschränkt, oder daß die Instabilitäten des Betriebs die Brauchbarkeit bis zur Nutzlosigkeit mindern. Wenn hier in Zukunft dennoch eine akzeptable Lösung gefunden werden sollte, dann sicher nur für einige sehr genau definierte Anwendungsfälle im Bereich der Alpha-Messung.

### Erweiterung des Meßbereichs nach oben

Zwar ist gerade die Messung niedriger Dosisleistungen und schwacher Aktivitäten der geeignete Einsatzbereich des Proportionalzählrohrs. Dafür ist es ja geradezu erfunden worden. Dennoch gibt es sowohl bei der Dosisleistungs- wie auch bei der Kontaminationsmessung Anwendungsfälle, bei denen ein nach oben größerer Meßbereich erwünscht wäre (39). Infolge der nahen physikalischen Verwandtschaft des Proportionalzählrohrs mit der Ionisationskammer bietet es sich vom Prinzip her an, durch einen – automatisch erfolgenden – Übergang zu einer Strommessung bei höheren Impulsraten zu einer Meßbereichserweiterung mit ein und demselben Detektor zu kommen. Von der praktischen Realisierung her gibt es allerdings erhebliche Schwierigkeiten, die nicht zuletzt in der erforderlichen hohen Stabilität bei der Strom-Betriebsart liegen, solange man mit einem Gasmultiplikationsfaktor größer eins arbeitet. Dennoch besteht der Bedarf und ich sehe hier noch einiges Entwicklungspotential.

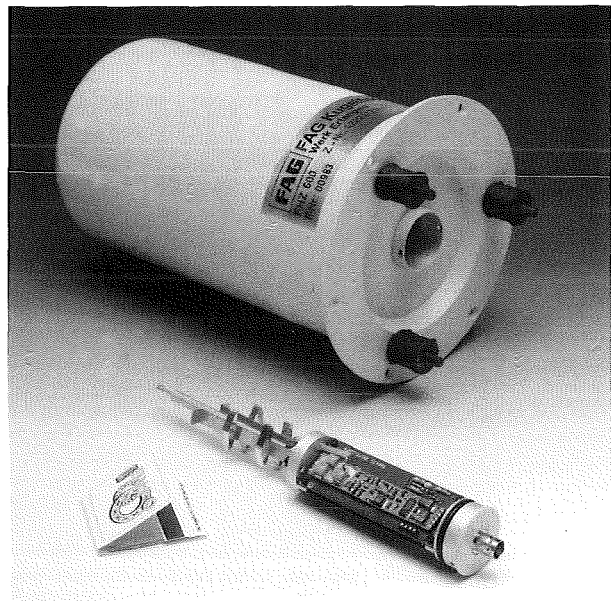


Abb. 41 Ein weiteres Beispiel für die Zusammenfassung von Elektronik und Zählrohr (Werksfoto FAG Kugelfischer)

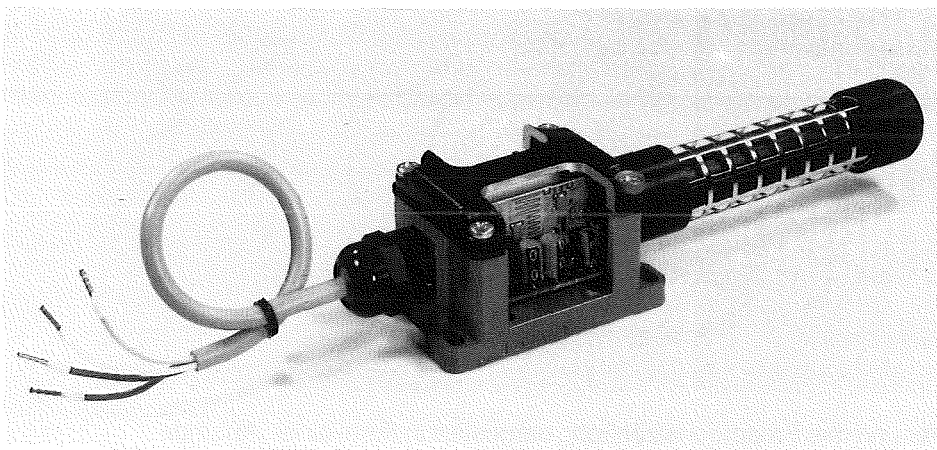


Abb. 40 Durch Aufbau der Elektronik in Dickschicht-Hybridtechnik lassen sich viele Funktionen auf kleinstem Raum zusammenfassen und damit eine räumliche Integration mit der Zählrohrröhre erreichen (Werksfoto Genitron).



## Schlußbemerkung

Der Anlaß zu dieser Übersicht über Proportionalzählrohre im Strahlenschutz war ein Seminar mit dem Thema „Der Strahlenschutz als aktuelle und stetige Aufgabe“. Der Anlaß des Seminars wiederum war die Vollendung des 65. Lebensjahres von Prof. Dr. Hans Kiefer. Die Zeitspanne seines aktiven Berufslebens fällt zusammen mit der Zeitspanne, in der sich der Strahlenschutz zu seinem heutigen Stand entwickelt hat; und Hans Kiefer hat dazu mehr als nur einen kleinen Mosaikstein beigetragen.

Er hat nicht nur wesentlichen Teil an der Entwicklung des Großflächen-Proportionalzählrohrs Ende der 50er und anfangs der 60er Jahre. Hans Kiefer hat auch die Meßmethoden und den Einsatz von Proportionalzählrohren ständig gefördert und weiter vorangetrieben, bis hin zu seinen Patenten über die Alpha-Beta-Trennung im Proportionalzählrohr mit Hilfe der Pulsform-Analyse aus den Jahren 1980 – 83. So wie das Proportionalzählrohr aus der Strahlenschutz-Meßtechnik nicht wegzudenken ist, so ist der Name

Hans Kiefer mit der neueren Geschichte des Proportionalzählrohrs auf das engste verbunden. Der Pforzheimer Graphiker Rainer Mürle hat diese Verbundenheit aus Anlaß des 65. Geburtstages von Hans Kiefer künstlerisch zum Ausdruck gebracht (Abb. 42).

Vor rund 25 Jahren haben wir, Hans Kiefer und ich, in der Einführung des Buches „Strahlenschutz-Meßtechnik“ den Satz geschrieben: „Erst die Entwicklung der Strahlenschutz-Meßtechnik hat die Voraussetzung für einen sicheren Umgang mit Strahlung und Radioaktivität geschaffen“. Wenn man sich heute ansieht, was in diesen 25 Jahren aus der Meßtechnik geworden ist und welche Rolle ihr im Strahlenschutz und in der Kerntechnik derzeit eingeräumt wird – man braucht, um das zu verdeutlichen, nur auf das „Konzept eines integrierten Meßnetzes“ (40) hinzuweisen – dann gilt dieser Satz nach wie vor. Auch die Meßtechnik ist, als Teil des Strahlenschutzes, eine aktuelle und stetige Aufgabe. Und ohne die Entwicklungen in Anwendung und Leistungsfähigkeit von Proportionalzählrohren wäre diese Aufgabe zwar nicht unlösbar, aber entscheidend schlechter zu erfüllen als wir alle es zu Recht erwarten und verlangen.



**Abb. 42** Hans Kiefer und das Proportionalzählrohr, dargestellt in Form einer „Anamorphose“ von R. Mürle.

## Literatur

1. Rutherford, E., H. Geiger: An Electrical Method of Counting the Number of Alpha-Particles from Radio-active Substances, Proc. Roy. Soc. Vol. LXXXI-A S. 141 – 181, 1908.
2. Emeléus, K.G., Proc. Cambr. Phil. Soc. 22, S. 676, 1925.
3. Geiger, H., O. Klemperer: Beitrag zur Wirkungsweise des Spitzenzählers; ZS. f. Phys. 49, S. 753 – 760, 1928.
4. Geiger, H., W. Müller: Das Elektronenzählrohr, in: Phys. Zeitschr. 29, S. 839 – 841, 1928.
5. Knoll, G. F.: Radiation Detection and Measurement, J. Wiley, New York 1979, ISBN-49545-X, S. 195.
6. Diethorn, W., NYO 6628, 1956, (zitiert aus 5.).
7. Falk, F. W., Untersuchung der Eignung kommerzieller Proportionalzählrohre im Strombetrieb zur Dosisleistungsmessung; Diplomarbeit am Lehrstuhl für Elektrobiologie und Biophysikalische Meßtechnik, Techn. Hochschule Karlsruhe 1963.
8. Glocker, R., A. Trost, R. Berthold, G. Frohmeyer, Ein in Bezug auf die Röntgeneinheit wellenlängenunabhängiges Zählrohr; Die Naturwissenschaften 39, S. 233, 1952.
9. Wernli, C., C. Barth, Application of a Tissue Equivalent Proportional Counter in Different Radiation Fields; in: Radiation Protection Practice. Proceedings of IRPA-7, Sydney, 1988
10. Maushart, R., Kriterien zur Auswahl von Detektoren für Dosisleistungsmesssysteme zur Umgebungsüberwachung kerntechnischer Anlagen; Atomenergie 43, S. 91 – 94, 1983.
11. Cosack, M., H. Lesiecki, Dose Equivalent Survey Meters; Radiation Protection Dosimetry. Zitiert nach einem PTB-Sonderdruck ohne Datum.
12. Kiefer H., R. Maushart, Ein neuer Großflächen-Durchflußzähler als Mittel zur verbesserten Bestimmung der Bruttoreaktivität in Wasser nach dem Eindampfverfahren, Nukleonik 1, Heft 3 (1958) S. 103.
13. Fessler, H., M. Kiefer, R. Maushart, Einfache Antikoinzidenzanordnung mit zwei Proportional-Durchflußzählrohren zur Bestimmung kleiner  $\beta$ -Aktivitäten, Kerntechnik 2, Heft 10, S. 324, 1960.
14. Kiefer H., R. Maushart, Large Area Flow Counters Speed Radiation Measurements, Nucleonics 19, S. 51, 1961.
15. Kiefer, H., Das Großflächenproportionalzählrohr; KFK 411, März 1966.
16. Maushart, R., Performance of Alpha/Beta Low Level Counting Systems for Solid Samples; Nucl. Instr. Methods B 17, S. 501 – 505, 1986.
17. Bunker, A. S., Radioactive Contamination Control Criteria and Monitoring Practices At U.S. Nuclear Power Stations; Radiation Protection Management 2, S. 19 – 31, 1985.
18. Maushart, R., H. Gebauer, R. Großner, Tragbares Meßgerät für radioaktive Kontaminationen; Patentschrift 2119521 v. 22.11.79
19. Maushart, R., Strahlenschutzmessungen in der Kerntechnik: die Ausnutzung der Mikroelektronik steht erst am Anfang; Atomwirtschaft 31, S. 496 – 498, 1986.
20. Maushart, R., Konzept und Technik moderner Kontaminationsmonitoren, in: Medizinische Physik, S. 65 – 72, A. Hüthig Verlag Heidelberg 1978.
21. Maushart, R., Advances in monitoring of radioactive contamination, Kerntechnik 8/9 (1976), S. 358 – 360.
22. Burgess, P. H., W. J. Iles, Instrument Evaluation No. 23, NRPB-IE 23, Chilton 1981.
23. Dörfel, H. R., u.a., Measurement of the effective Dose Equivalent due to Low Energy X-Rays Emitted from Video Display Terminals and Colour Television Sets; Proceedings of the Workshop on Dosimetry of Beta Particles and Low Energy X-Rays, Saclay, 7. 9. Oktober 1985.
24. Maushart, R., Contamination Monitoring, – Problems and Solutions, Proceedings of the 11th Midyear Symposium of the Health Physics Society, San Diego, 1978.
25. Berthold, F.: Meßgeräte für Tritium, in: Seminaire sur la protection contre les dangers du Tritium, Le Vésinet, 1964, S. 67.
26. Kiefer, H., R. Maushart, Kontinuierliche Direktüberwachung kleiner Beta-Aktivitäten im Wasser, Atompraxis 5, S. 431, 1959.

27. Gebauer, H., S. Müller, Kontinuierliche Direktmessung radioaktiver Substanzen in Wasser; *Atomwirtschaft* 7, S. 487, 1962.
28. Maushart, R., Man nehme einen Geigerzähler, Teil 2, S. 113/114; GIT-Verlag 1985.
29. Maushart, R., Radioaktivitätsmessungen nach Tschernobyl – Fehler, Lehren, Folgerungen; *Lab. med.* 11, S.40 – 43, 1987.
30. Maushart, R., Measurement of Radioactivity in Foodstuffs; *Radiation Protection Management* 5, S. 45 – 50, 1988.
31. Berthold, F., High sensitivity alpha-beta-aerosol monitor with a novel pseudocoincidence circuitry for the compensation of natural radioactivity, in: *Assessment of Airborne Radioactivity (Proc. Symp. Vienna, 1967)*, IAEA, Vienna (1967), S. 597.
32. Müller, S., P. Nemecek, Kontinuierliche Luftüberwachungen zur Direktüberwachung von radioaktiven Substanzen, insbesondere von Gasen, *Firmenschrift Frieseke und Hoepfner, Erlangen-Bruck* (1964).
33. Ehret, R., H. Kiefer, R. Maushart, Fortschritte bei der kontinuierlichen Tritiumüberwachung in Luft; *Direct Information* 3/63, Beilage zur *Atompraxis*, Braun Verlag Karlsruhe.
34. Berthold, F., Tritium-in-Air Measurements by Pulse Shape Discrimination Methods; in: *Radiation-Risk-Protection*, FS84-35-5, S. 1091 – 1094, 1984.
35. Filthuth, H., Direct Quantitative Measurement of Radiochromatograms and Electropherograms with Position Sensitive Wire Chambers; in: *Synthesis and Applications of Isotopically Labeled Compounds*, S. 465 – 472, Elsevier Science Publishers Amsterdam, 1986.
36. Filthuth, H., Digital Autodiograph – a New Detector for Radiochromatography, *Firmenmitteilung Labor Prof. Dr. Berthold, Wildbad* 1987.
37. Ehret, R., H. Kiefer, R. Maushart, G. Möhrle, Performance of an Arrangement of several Large-Area Proportional Counters for the Assessment of  $^{239}\text{Pu}$  Lung Burden; in: *Assessment of Radioactivity in Man*, IAEA Wien 1964.
38. Leidner, L., E. Sadri, Stickstoff-Großflächenzähler mit Gasregeneration; *KfK 3780*, Oktober 1984.
39. Ilmstädter, V., Die Verwendung von Kontaminationsmonitoren zur Feststellung der Personenkontamination im Katastrophenschutz, nicht veröffentlicht.
40. Integriertes Meß- und Informationssystem zur Überwachung der Umweltradioaktivität nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, RSII-PGU-515 601/3.
41. Kiefer, H., u.a., Anwendung des Pulse-Shape-Verfahrens bei Meßgeräten mit Großflächen-Proportionalzählrohren, in: *Radiation-Risk-Protection* S. 1151 – 1153, FS-84-35T, 1984.
42. Keller, M., Alpha-Beta-Kontaminationsdetektoren insbesondere für Freigabemessungen von Anlagenteilen aus kerntechnischen Anlagen; in: *Strahlenschutzaspekte bei radioaktiven Kontaminationen*, FS-83-32-T, s. 519, 1983.
43. Jansen, W., R. Peuker, K. Renz, *Strahlenschutz, Neufassung 1985*, Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln.
44. Stolz, W., *Messung ionisierender Strahlung*; VCH Weinheim, 1985, ISBN 3-527-21106-3.
45. Maushart, R., Selection Criteria for Doserate Detectors for Environmental Surveillance; in: *Radiation-Risk-Protection*, 6th IRPA Congress Berlin, 1984.
46. Maushart, R., Argumente für eine Meßwertanzeige in  $\text{Bq}/\text{cm}^2$  bei Kontaminationsmonitoren, in: *Strahlenschutztechnik bei radioaktiven Kontaminationen*, FS-83-32-T, 65-76, 1983.
47. Berthold, F., Verfahren zur Selektierung der Kernstrahlung bestimmter gasförmiger, in einem Trägergas in ein Zählrohr gebrachter Radionuklide, unter Diskriminierung nach der Impulsform sowie Anwendung dieses Verfahrens und Verwendung eines Durchflußzählrohres hierzu, *Patentschrift 2500 510* (1979).

## Tritium in der Nahrungskette

L. A. König

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Hauptabteilung Sicherheit/Radioökologie

### Zusammenfassung

Als Wasserstoffisotop ist Tritium am globalen Wasserstoffkreislauf und zugleich an allen Stoffwechselfvorgängen beteiligt. Die sich hieraus für die Nahrungskette ergebenden Probleme werden mit dem Schwerpunkt „organisch gebundenes Tritium“ umrissen, wobei nur eine kleine Auswahl von Veröffentlichungen berücksichtigt werden kann. Berichtet wird über Veröffentlichungen, in denen Experimente unter definierten Bedingungen beschrieben sind, so daß eine semiempirische Deutung der Ergebnisse möglich ist. Es wird eine Übersicht über Meßwerte an Lebensmitteln aus der Umgebung des Kernforschungszentrums Karlsruhe gegeben. Unter vereinfachenden Annahmen wird eine Dosisabschätzung durchgeführt, wobei sich unter den hiesigen Verhältnissen auch bei Berücksichtigung des organisch gebundenen Tritiums eine Strahlenexposition unter 1 % jener durch K-40 ergibt. Um Fehldeutungen zu vermeiden, muß die spezifische Aktivität (Bq H-3/g H) für wassergebundenes und organisch gebundenes Tritium getrennt betrachtet werden.

### Tritium in the Food Chain

#### Summary

Tritium is a hydrogen isotope taking part in the global hydrogen cycle as well as in all metabolic processes. The resultant problems with respect to the food chain are summarized briefly with emphasis on "Organically bound tritium." However, only a small number of the numerous publications on this topic can be taken into consideration. Publications describing experiments under defined conditions are reported, thus allowing a semiempirical interpretation to be made. Tritium activity measurements of food grown in the vicinity of the Karlsruhe Nuclear Research Center have been carried out. A list of the results is given. A dose assessment is performed under simplifying assumptions. Even when the organically bound tritium is taken into account, a radiation exposure of less than 1 % of that of K-40 is obtained under these conditions. To avoid misinterpretation, the specific activity (Bq H-3/g H) of water-bound and organically bound tritium has to be considered separately.

## 1 Einleitung

Eine der über Jahrzehnte im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) stets aktuell gebliebenen Strahlenschutzaufgaben ist die Überwachung verschiedener Medien auf Tritium. Diese Aufgabe erwuchs aus dem Umgang mit Tritiumaktivitäten in der Größenordnung  $10^{15}$  -  $10^{16}$  Bq beim Betrieb zweier inzwischen stillgelegter schwerwassermoderierter Reaktoren und dem noch laufenden Betrieb einer Wiederaufarbeitungsanlage. Bei Realisierung des Tritiumlabors im Rahmen der Fusionsforschung wird die Tritiumüberwachung weiterhin aktuell bleiben.

Wegen der unvermeidbaren Freisetzung von Tritium beim Umgang sowie angesichts der Eigenschaften und der biologischen Bedeutung des Wasserstoffs bedarf es wohl keiner weiteren Begründung, daß hier auch Fragestellungen aufgegriffen wurden, die mehr in die Tiefe gingen, als man bei oberflächlicher Betrachtungsweise für unabdingbar notwendig halten würde.

Der folgende Beitrag befaßt sich aus der Sicht des Strahlenschutzes mit Tritium in der Nahrungskette, einem Thema, das hochzuspielen in der öffentlichen Diskussion immer wieder versucht wurde. Ausgehend von der Bedeutung des Wasserstoffs für den Menschen und vom Wasserstoffmetabolismus wird auf die Tritiumaufnahme in Nahrungsmittel eingegangen. In Anlehnung an Meßwerte aus der Umgebung des KfK wird eine Dosisabschätzung durchgeführt.

## 2 Daten zum Wasserstoffmetabolismus

Die Aufnahme des Menschen von Tritium aus der Nahrungskette ist weitgehend durch den Wasserstoffgehalt des menschlichen Körpers und dessen Wasserstoffmetabolismus bestimmt. Daher werden zunächst einige Daten hierzu zusammengestellt.

### 2.1 Der Standardmensch und sein Wasserstoffmetabolismus nach ICRP

Die Elemente Sauerstoff, Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff erbringen im menschlichen Körper zusammen knapp 97 % der gesamten Masse. Während Wasserstoff einen Massenanteil von 10 % ausmacht, sind mehr als 60 % aller Atome

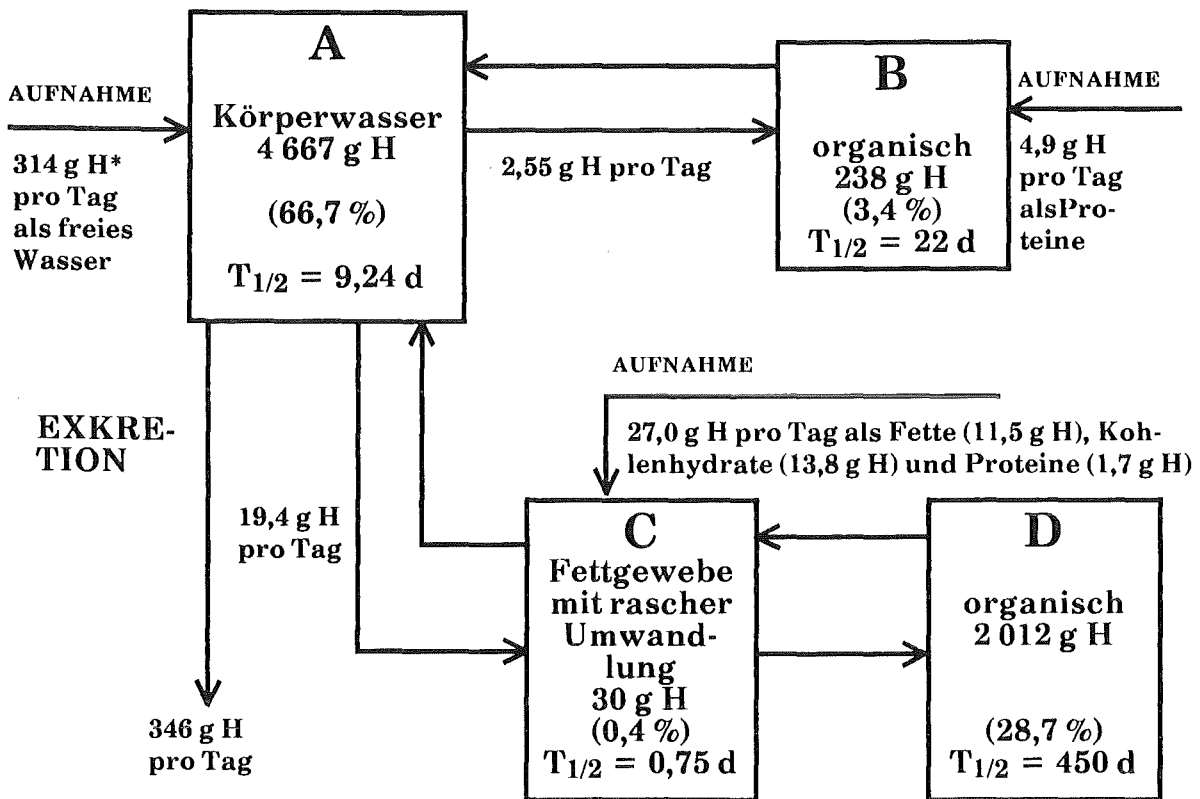
im menschlichen Körper Wasserstoffatome, wie Tab. 1 zeigt. Die Möglichkeit, inaktive Wasserstoffatome durch Tritiumatome zu ersetzen, ist auch deshalb von erheblichem radiologischem Interesse, weil täglich  $2,1 \cdot 10^{26}$  Wasserstoffatome (entsprechend 350 g Wasserstoff) bzw. 5 % der im Körper des Menschen vorhandenen Wasserstoffatome am Stoffwechsel teilnehmen.

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung des Körpers eines männlichen Erwachsenen. Elemente mit dem größten Anteil [ICRP 75] und tägliche Zufuhr über die Nahrung

Element	Ungefähre Menge in einem 70-kg-Menschen in g	Massenprozent	Zahl der Atome	Zufuhr in g/d
Sauerstoff	43 000	61,4	$1,6 \cdot 10^{27}$	2 600
Kohlenstoff	16 000	22,9	$8,0 \cdot 10^{26}$	300
Wasserstoff	7 000	10,0	$4,2 \cdot 10^{27}$	350
Stickstoff	1 800	2,6	$9,0 \cdot 10^{25}$	16
Summe	67 800	96,9	$6,7 \cdot 10^{27}$	

Der Wasserstoff und somit auch sein Isotop Tritium wird im Körper sowohl als Wasser in das freie Gewebewasser als auch in organisch gebundener Form in das Körper-OBH (OBH = organisch gebundener Wasserstoff) aufgenommen. Ein Modell von Etnier et al. [Etn 84], das dies im Gegensatz zu vorausgegangenen, nur die Zufuhr über das Körperwasser berücksichtigenden Modellen beschreibt, ist in Abb. 1 wiedergegeben. Das Modell geht von vier Kompartimenten aus, bezeichnet mit A, B, C und D, worin das Körperwasser durch Kompartiment A dargestellt wird und das OBH in drei Kompartimente B, C, D aufgeteilt ist. Die Zufuhr erfolgt in die Kompartimente A, B, C. Insgesamt sind in dem Modell ca. 99,2 % des im Körper vorhandenen Wasserstoffs erfaßt. Vernachlässigt ist der im Mineralanteil der Knochen enthaltene Wasserstoff (Halbwertszeit 4 500 d). Nach Abbildung 1 werden täglich ca. 32 g H als OBH aufgenommen.

Abb. 1: Vierkompartimentmodell für den Wasserstoffmetabolismus [Etn 84]



\*82 g H freies Wasser in Nahrung, 13,3 g H Oxidationswasser aus Nahrung, 135 g H in Trinkwasser, 59 g H in Milch, 14,4 g H über Atmung, 10 g H durch Haut

In Tabelle 2 sind die Annahmen über die Wasserbilanz in den verschiedenen Modellen verglichen [Etn 84]. Der Vergleich macht die Abweichungen in den Annahmen deutlich, deren Entstehung infolge der biologischen und ortsabhängigen Schwankungsbreite nicht überrascht.

Tab. 2: Vergleich der Annahmen über die Wasserbilanz

	Standard- mensch nach ICRP 23	NCRP 62	Vierkompar- timentmodell [Etn 84]
<b>Tägliche H<sub>2</sub>O-Aufnahme</b>			
in Nahrung	700	740	740
Leitungswasser	150	1 220	1 220
Milch	300	530	530
andere Flüssigkeiten	1 500	-	-
Oxidation in der Nahrung	350	270	107
Inhalation	-	130	130
Haut	-	90	90
Sonstige	153	-	-
Organisch gebunden	-	-	300
Summe	3 153	2 980	3 117
<b>H<sub>2</sub>O-Verlust</b>			
Urin	1 441		
Faeces	117		
Schweiß	648		
Sonstige (einschließlich Atmung)	947		
Summe	3 153	2 980	3 117

Im Gleichgewicht gilt für die Zufuhr Z

$$Z = \frac{\ln 2}{T} \cdot I, \quad (1)$$

worin T die biologische Halbwertszeit\* und I das Inventar bedeuten, bzw.

$$T = \frac{I}{Z} \cdot \ln 2. \quad (2)$$

Gleichung (2) zeigt, daß die biologische Halbwertszeit durch Erhöhung der Wasserstoffzufuhr verringert bzw. durch Verringerung vergrößert werden kann. Dies ist experimentell vielfach bestätigt (s. z. B. [IAEA 81, ICRP 79, NCRP 79a,b]). Die in Abbildung 1 für die verschiedenen Komponenten angegebenen Halbwertszeiten können an Hand von Gleichung (2) nachgeprüft werden.

\*Für Tritium sind effektive und biologische Halbwertszeit praktisch gleich.



In [ICRP 79] werden stark streuende biologische Halbwertszeiten berichtet, wobei für den rasch ausgeschiedenen Pool Werte zwischen 4 und 26 d angegeben wurden und für den OBT-Anteil\* Werte zwischen 280 und 550 d, wobei offensichtlich die chemische Verbindung, in der das Tritium vorlag und auch der Weg der Aufnahme (Hautkontakt, Inhalation usw.) eine Rolle spielten. Diese Halbwertszeiten sind im Einklang mit den in Abbildung 1 angegebenen.

Unter Anwendung von Daten aus Nachschlagewerken läßt sich für den Eiweißstoffwechsel die biologische Halbwertszeit abschätzen. In [Sch 65] findet man unter „Grundstoffe des menschlichen Körpers“ die Angabe für Eiweißstoffe 16 %. Für den 70-kg-Erwachsenen bedeutet dies  $I = 1,12 \cdot 10^4$  g. (Dividiert man diesen Wert durch die 1800 g Stickstoff aus Tabelle 1, so erhält man 6,22. In [Gei 77] findet man für Fleisch als Quotient 6,25, was zeigt, daß obige Angabe vernünftig ist. Aus dem Proteinbedarf  $Z = 0,47$  g/d für 1 kg Körpermasse bzw. 32,9 g/d für 70 kg folgt  $T = 236$  d.) Im Hungerzustand werden zuerst die Kohlenhydratdepots, dann die Fett- und zuletzt die Eiweißdepots vermindert, was offenbar von den biologischen Halbwertszeiten widergespiegelt wird.

Denkbare Isotopieeffekte wurden bei vorstehenden Betrachtungen außer acht gelassen. Es widerspräche jedoch der Erfahrung, wenn eine signifikante Anreicherung im Gesamtorganismus durch Isotopieeffekte stattfinden würde.

Die Einführung des Standardmenschen stellt eine starke Vereinfachung dar, die den individuellen Schwankungen u. a. auch durch Altersabhängigkeiten, Wasseraufnahme und Umweltbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte!) nicht ganz gerecht wird.

In Tabelle 3 sind die in [Etn 84] übernommenen Annahmen über die tägliche Nahrungsaufnahme zusammengestellt. Sie entsprechen einem Energiebedarf von  $1,27 \cdot 10^7$  J ( $3,04 \cdot 10^6$  cal) pro Tag. Das auf den tatsächlichen Tagesbedarf von ca. 33 g bezogene überschüssige Protein, das zu Fett oder Kohlenhydraten metabolisiert wird, liefert nur ca. 4 kJ/d.

---

\*OBT: organisch gebundenes Tritium (organically bound tritium)

Tab. 3: Annahmen über die Nahrungsaufnahme in [Etn 84]

Stoffklasse	Tägliche Aufnahme in g/d	Oxidiert unmittelbar nach Aufnahme	
		g/d	%
Kohlenhydrate	350	150	43
Fette	180	36	20
Proteine	95	25 % als Fett gespeichert 75 % für Zellkomponenten	

## 2.2 Wasserstoff in der organischen Substanz von Lebensmitteln

In Tabelle 4 ist der Wasserstoffgehalt in den Hauptkomponenten der organischen Substanz der menschlichen Nahrung zusammengestellt. Zusätzlich wird eine Abschätzung des Anteils des austauschbar (d. h. an N, O oder S) gebundenen Anteils angegeben. Wesentlich schwerer austauschbar ist der an C-Atome (z. B. bei der Photosynthese) gebundene Wasserstoff.

Tab. 4: Wasserstoffgehalt in den Hauptkomponenten der organischen Substanz (ermittelt durch stöchiometrische Berechnungen\*; eßbare Anteile).

Stoffklasse	Wasserstoffgehalt in Gewichtsprozent der Trockensubstanz	
	total	austauschbar gebunden <sup>1</sup>
Proteine	ca. 6,8	ca. 25
Kohlenhydrate <sup>2</sup>	5,3 - 6,8	20 - 42
Lipide	10 - 13	0 - 5

\*S. Diabaté, unveröffentlicht,

<sup>1</sup>Gebunden an N, O oder S

<sup>2</sup>Abhängig von Polymerisierungsgrad

Für das Verhalten von Tritium in der Nahrungskette ist von großer Bedeutung, in welcher Weise dieses chemisch gebunden ist. Man darf in erster Näherung davon ausgehen, daß sich Tritium in der Nahrungskette wie H-1 verhält. Zwar ist H-3 fester an Kohlenstoff gebunden als H-1, doch reicht die bei der Messung von realen Umweltproben erzielbare Meßgenauigkeit nicht aus, um denkbare Isoto-

pieeffekte nachzuweisen. Um Laborversuche mit Tieren hinsichtlich Isotopieeffekten zu interpretieren, dürfte der Kenntnisstand über die bei der Verdauung ablaufenden verwickelten Vorgänge nicht ausreichen. Die Existenz unverdaubarer Anteile in Nahrungsmitteln, wofür Tabelle 5 einige Beispiele enthält, kommt bei der Betrachtung des Stoffwechsels erschwerend hinzu.

Tab. 5: Beispiele von für den Menschen unverdaubaren Substanzen in Nahrungsmitteln [Gei 77]

Nahrungsmittel	Unverdaubare Substanzen pro 100 g Trockenmasse in g
Endivien	21,7
Karotten	9,9
Kartoffeln	9,9
Weißkohl	21,5
Wirsingkohl	30,2
Zwiebeln	10,5
Bohnensamen, weiße	15,0
Erbsen	13,2

Es bleibt anzumerken, daß die Unterscheidung zwischen „austauschbarem“ und „nichtaustauschbarem“ OBH eine Vereinfachung darstellt, die das breite Spektrum der Bindungsmöglichkeiten und damit die Unschärfe der Abgrenzung nicht wiedergibt (s. z. B. [Cla 80]). Chemische oder biochemische Katalysatoren können nämlich sehr wohl einen nicht erwarteten Isotopenaustausch ermöglichen.

### 3 Beschreibung der Tritiumdynamik in biologischem Material

Der Beschreibung der Tritiumdynamik in biologischem Material und damit in Nahrungsmitteln können die Bilanzierung für Kompartimente oder aber Konzentrationsbetrachtungen zugrunde gelegt werden. Neben allgemeinen Überlegungen zur Tritiumdynamik werden im folgenden einige Sonderfälle behandelt und einige Meßergebnisse mitgeteilt.

Da sämtliche Nahrungsmittel Wasserstoff enthalten, ist ein vielfältiger Austausch von stabilen Wasserstoffatomen mit Tritiumatomen möglich. Der Austausch findet stets in Richtung des Konzentrationsgefälles statt. Überall wo Tritium in Pflanzen oder Tieren auftritt, sind mindestens die Kompartimente Wasser, austauschbares und nichtaustauschbares organisch gebundenes Tritium zu berücksichtigen.

### 3.1 Aktivitätsbilanz für Kompartiment

Bezeichnet  $A_i$  die Tritiumaktivität im Kompartiment  $i$ , so gilt die Bilanzgleichung

$$\frac{dA_i}{dt} = \sum_j Z_{ij} - A_i \sum_j k_{ij}. \quad (3)$$

$Z_{ij}$  ist die Tritiumzufuhr aus dem Kompartiment  $j$  in das Kompartiment  $i$ ,  $k_{ij} A_i$  die Tritiumabgabe des Kompartiments  $i$  an das Kompartiment  $j$ . Die Größen  $k_{ij}$  hängen in der Natur von vielen Parametern ab, sind also nur bei Konstanzhaltung dieser Parameter im Laborversuch wirklich konstant. Dies ist eine wesentliche Schwierigkeit bei der Deutung von Freilandexperimenten.

Nimmt man die in Gleichung (3) stehenden Größen  $k_{ij}$  als konstant an, so erhält man als Lösung eine Summe der Form

$$A_i = \sum_n C_{in} e^{-k_n t}. \quad (4)$$

### 3.2 Konzentrationsbegriff

Bei radioökologischen Untersuchungen werden im allgemeinen Konzentrationen bestimmt. Es ist daher angebracht, auf den Konzentrationsbegriff näher einzugehen, zumal Tritium in verschiedener Weise gebunden sein kann und Konzentrationsangaben ohne nähere Erläuterungen unter Umständen zu Mißverständnissen führen können.

Sehr häufig wird die Konzentration in Becquerel pro Volumeneinheit Wasser angegeben. Wasser wird direkt der Probe entzogen oder entsteht bei der Verbrennung der Trockensubstanz. Aus der Tritiumkonzentration des Wassers läßt sich das für die strahlenschutzmäßige Beurteilung wichtige T/H-Verhältnis und damit auch die auf die Masseneinheit Wasserstoff bezogene Tritiumaktivität berechnen. Soweit Klarheit über das organisch gebundene Tritium besteht, aber nur mit dieser Einschränkung, ist auch eine Angabe in der Form Aktivität pro Kilogramm Masse tolerierbar.

Vorsicht ist geboten, wenn ein Gemisch oder eine Lösung vorliegt. Ein Beispiel hierfür ist die Ableitung von organischen Verbindungen zusammen mit Wasser aus einem Labor. Hier wäre es wenig hilfreich, die Tritiumkonzentration auf das Wasser zu beziehen, vielmehr müssen die verschiedenen Komponenten auseinander gehalten werden, da sonst fälschlicherweise auf Anreicherungs-effekte geschlossen werden könnte. Wird z. B. eine organische Substanz im Wasser in dort lebende Organismen eingebaut, so kann das T/H-Verhältnis im Organismus jenes im Gesamtwasser überschreiten. Nicht überschritten wird dabei aber das größte T/H-Verhältnis der im Wasser befindlichen organischen Substanzen.

### 3.3 Berechnung auf der Basis von Konzentrationen

Beim Rechnen mit Konzentrationswerten ist jener Fall einer einfachen Behandlung zugänglich, bei dem ein sehr großes Reservoir mit der zeitlich unveränderlichen Konzentration  $C_0$  im Kontakt mit einem Organismus mit der zeitlich veränderlichen Konzentration  $C$  steht. Es gilt dann, wenn der Organismus als *ein* Kompartiment betrachtet wird, die Beziehung

$$\frac{dC}{dt} = K (C_0 - C). \quad (5)$$

Unter definierten Laborbedingungen ist  $K$  konstant, wobei nach Gleichung (3)  $K$  positiv ist. ( $C$  wächst, wenn  $C_0 > C$  gilt.) Die Lösung von Gleichung (5) lautet

$$C(t) = C_0 + (C(0) - C_0) e^{-Kt}. \quad (6)$$

#### 4 Einige ausgewählte Untersuchungen an biologischem Material

Die Voraussetzung eines sehr großen, d. h. durch den Organismus unbeeinflussten Reservoirs ist entsprechend Abschnitt 3.3 u. a. in folgenden Fällen experimentell realisiert worden:

- Tritiumarme Pflanze in tritiumhaltiger Luftfeuchte [Bel 79, Bel 82, Gar 82, Cou 83]
- Anfangs tritiiertes Fisch in praktisch tritiumfreien Wasser ( $C_0 = 0, C(0) > 0$ )
- Tritiumarmer Fisch in tritiiertem Wasser, gefüttert mit tritiumarmen Futter ( $C_0 > 0, C(0) = 0$ )
- Tritiumarmer Fisch in tritiumarmen Wasser, gefüttert mit tritiiertem Futter ( $C_{0OBT} > 0, COBT(0) = 0$ )
- Tritiumarmer Fisch in tritiiertem Wasser, gefüttert mit tritiiertem Futter
- Tritiumeinbau im Körper von Säugetieren (Zitate s. 4.3)
- Milch einer Kuh, die zeitweise tritiumhaltiges Trinkwasser erhielt [Hoe 78, IAEA 81]
- Milch einer Kuh, die zeitweise mit tritiumhaltigem Heu gefüttert wurde [Hoe 78, Hoe 82, IAEA 81]

##### 4.1 Tritiumaufnahme von Pflanzen aus der Luftfeuchte

Zur Beschreibung der Tritiumaufnahme aus der Luftfeuchte mit der Tritiumkonzentration  $C_0$ , bezogen auf Gramm Wasser, und der Luftfeuchte  $\theta$  ( $\text{g/cm}^3$ ) wird angenommen, daß der HTO-Dampf im Gasraum des Blattes mit der Sättigungsfeuchte  $\theta_s$  im Gleichgewicht mit dem Gewebewasser des Blattes steht. Bezeichnet man mit  $\alpha$  ( $\approx 1,1$ ) das Verhältnis der (T/H)-Verhältnisse im Wasser und im Wasserdampf, mit  $A_1$  die gesamte Tritiumaktivität im Blatt, mit  $\mu$  den Wassergehalt des Blattes pro Flächeneinheit ( $\text{g/cm}^2$ ), mit  $r$  den Diffusionswiderstand des Blattes ( $\text{s/cm}$ ) und mit  $X_0$  bzw.  $X_1$  ( $\text{Bq/cm}^3$ ) die Tritiumkonzentration in der Luft bzw. im Blatt-Gasraum, so gilt analog zu Gleichung (5)

$$\frac{d(A_1/F)}{dt} = \frac{X_0 - X_1}{r} \quad (7)$$

(Index 0 für Luft, Index 1 für Blatt) bzw. wegen

$$A_1/F = C_1 \cdot \mu,$$

und

$$X_o = \theta C_o$$

$$X_1 = \frac{\theta_s}{\alpha} C_1$$

bzw.

$$\mu \frac{dC_1}{dt} = \frac{1}{r} \left( \theta C_o - \frac{\theta_s}{\alpha} C_1 \right)$$

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{\theta_s}{\alpha \mu r} \left( \alpha \frac{\theta}{\theta_s} C_o - C_1 \right). \quad (8)$$

Die Lösung mit  $C_1 = 0$  für  $t = 0$  lautet

$$C_1 = f C_o (1 - e^{-k_1 t}) \quad (9)$$

mit

$$f = \alpha \frac{\theta}{\theta_s}$$

und

$$k_1 = \frac{\theta_s}{\alpha \mu r}$$

Gleichung (9) wurde mehrfach experimentell verifiziert. Nach Gleichung (8) gilt im Gleichgewichtsfall ganz allgemein

$$C_1^{Gl} = \alpha \frac{\theta}{\theta_s} C_o, \quad (10)$$

unabhängig von der Anfangsbedingung. Der Gleichgewichtswert der auf Wasser bezogenen Konzentration hängt also vom Verhältnis  $\theta/\theta_s$  ab.

Es ist zu beachten, daß bei dauernder HTO-Kontamination der Atmosphäre Pflanzen Luftfeuchte auch über den Boden aufnehmen. Für die Umgebung der Savannah River Plant wurde im mehrjährigen Mittel ein Wert ca. 0,8 für das Konzentrationsverhältnis Vegetation/Luft gefunden [Mur 84].

## 4.2 Tritiumaustausch von Fischen mit dem umgebenden Wasser

Sowohl die Tritiumaufnahme als auch die Tritiumabgabe von Fischen wurde untersucht. Es seien zunächst einige Ergebnisse aus dem Kernforschungszentrum Karlsruhe wiedergegeben [Kön 87].

Aus dem Vorfluter stammende Fische mit unbekannter Vorgeschichte wurden in tritiumarmes Wasser eingesetzt und der Anstieg der Tritiumkonzentration in diesem Wasser gemessen. Der Anstieg der Tritiumkonzentration  $C$  läßt sich durch die Gleichung

$$C = C_{max} \left\{ 1 - \frac{C_1}{C_{max}} \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot t) - \frac{C_2}{C_{max}} \cdot \exp(-\lambda_2 \cdot t) - \frac{C_3}{C_{max}} \cdot \exp(-\lambda_3 \cdot t) \right\} \quad (11)$$

beschreiben.  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  und  $\lambda_3$  sind Konstante,  $C_{max}$  ist die maximale Tritiumkonzentration.

Für  $t = 0$  gilt  $C = 0$ . Daher gilt

$$C_3 = C_{max} - C_1 - C_2. \quad (12)$$

Aus den Meßwerten lassen sich die Konstanten  $C_i$  und die Halbwertszeiten

$$T_i = \frac{\ln 2}{\lambda_i} \quad (13)$$

( $i = 1,2,3$ ) bestimmen.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zusammengefaßt. Auf den ersten Blick scheint  $T_1$  als durch die äußere Kontamination - wasser-gefüllte Hohlräume, z. B. Magen-Darm-Trakt, eingeschlossen - erklärbar zu sein.  $T_2$  könnte auf den Austausch des Gewebewassers und  $T_3$  auf jenen des OBT zurückgeführt werden. Eine endgültige Klärung ist nur durch weitere Experimente erreichbar.



Tab. 6: Bei der Tritiumabgabe von Fischen gefundene Konstanten (siehe Gleichungen (11) und (13))

	$\frac{C_1}{C_{\max}}$	$\frac{C_2}{C_{\max}}$	$\frac{C_3}{C_{\max}}$	Minuten		
				T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
Maximum	0,19	0,54	0,52	0,24	46	139
Minimum	0,06	0,39	0,38	4,6	10,5	77
Medianwerte	0,08	0,45	0,45	0,81	27	126

In Abbildung 2 ist ein Beispiel für die Tritiumaufnahme in Fische, die bei einem Versuch innerhalb des Vorfluters eingesperrt waren, dargestellt. Die Probenahmen wurden während Tritiumableitungen aus den Endbecken der Kläranlage des KfK durchgeführt. Während die Zunahme der Konzentration im Gewebewasser den Erwartungen entspricht, gilt dies nicht für die Zunahme im OB. HTO wurde durch Gefriertrocknung gewonnen, das Verbrennungswasser der organischen Substanz durch Verbrennung des trockenen Rückstands. Diese Ergebnisse bedürfen noch einer Überprüfung.

Über die Tritiumdynamik in Fischen liegen etliche Veröffentlichungen vor. Hier sei eine Untersuchung an jungen Regenbogenforellen [Rod 86] hervorgehoben, da sie besonders übersichtliche Ergebnisse ergab. In Tabelle 7 sind Gleichgewichtsaktivitäten und Zeitkonstanten aus dieser Arbeit wiedergegeben. Es wurden folgende Fälle untersucht:

- a) alleinige Exposition durch tritiiertes Wasser
- b) alleinige Exposition durch tritiiertes Futter und
- c) gleichzeitige Exposition durch tritiiertes Wasser und Nahrung

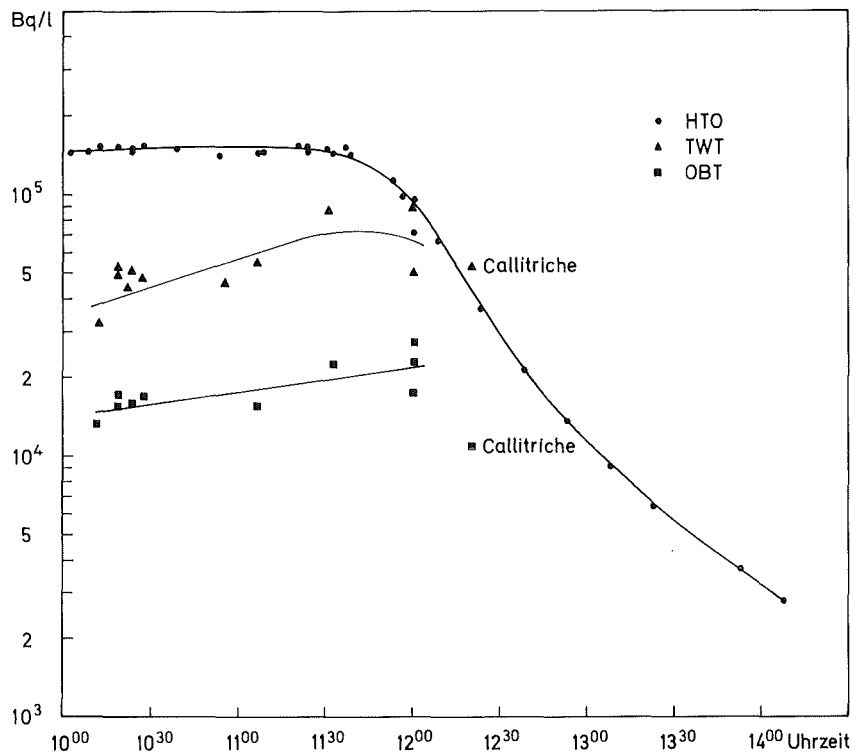


Abb. 2: Tritiumkonzentration im Wasser des Vorfluters, in Fisch und Wasserstern (TWT: Gewebewasser; OBT: organisch gebundenes Tritium)

Die Tabelle zeigt, daß durch tritiiertes Futter besonders hohe OBT-Werte erreicht werden, die jedoch unter der OBT-Konzentration des Futters liegen, und daß dieses OBT fester gebunden ist als bei alleiniger Aufnahme über tritiiertes Wasser. Bei alleiniger Aufnahme von OBT lag die Tritiumkonzentration im Gewebewasser deutlich über jener im umgebenden Wasser. In Tabelle 8 werden die in Tabelle 7 enthaltenen Informationen in eine übersichtlichere Form gebracht und ergänzt. Angegeben sind erreichte Prozentsätze der Quellkonzentration, Austauschbarkeit in der organischen Bindung sowie Halbwertszeiten für die Tritiumaufnahme, soweit nicht ausdrücklich anderes gesagt wird.

Tab. 7: Tritiumdynamik in jungen Regenbogenforellen. Zeitkonstanten [Rod 86]

Tritiumquelle	Gleichgewichtsaktivität kBq/g H	Zeitkonstanten in d <sup>-1</sup>	
		Während Exposition	Nach Exposition
Tritium im Gewebewasser			
Wassera)	13,66 ± 0,10	60,2 ± 3,4	n. b.
Futtera,,b)	0,023 ± 0,008	9,3 ± 2,5	0,045 ± 0,014
Beidesa,,c)	13,77 ± 0,11	45,9 ± 2,7	n. b.
Organisch gebundenes Tritium			
Wasserb)	2,54 ± 0,10	0,73 ± 0,16	0,106 ± 0,024
Futtera, b)	23,7 ± 1,7	0,0218 ± 0,0027	0,0308 ± 0,0031
Beidesa, c)	21,6 ± 1,1	0,0393 ± 0,0049	0,0400 ± 0,0057

n. b.: Nicht bestimmt. Austausch der Fische mit umgebendem Wasser viel rascher als die Änderung der Tritiumkonzentration in den Tanks beim Spülen. Expositionsdauer: 56 d.

a): Im Wasser: 13,80 ± 0,07 kBq/g H; b): Im Wasser: < 10 Bq/g H; c): Im Futter: 27,7 ± 2,0 kBq/g<sup>-1</sup> H; pulverisiertes Fischfutter gemischt mit wäßriger Lösung tritiiertes Aminosäuren und gefriergetrocknet.

Tab. 8: Tritiumdynamik in jungen Regenbogenforellen. Bruchteile der spezifischen Aktivität der Tritiumquelle [Rod 86]

Tritiumquelle	Bruchteile der spezifischen Aktivität der Tritiumquelle	
	TWT-Gleichgewichtsaktivität pro g H	OBT-Gleichgewichtswert in Aktivität pro g H
Wasser	~ 100% HWZ ~ 20 min (16,6 - 21,7) Aufnahme	~ 20 % überwiegend austauschbares Tritium HWZ ~ 1 d; Aufnahme
Nahrung	Gering. (2mal spezifische Aktivität des umgebenden Wassers) HWZ für H-3-Abgabe ~ 15,5 d Aufnahme	~ 80 % überwiegend nicht-austauschbares Tritium HWZ: 17,6 d - 31,8 d; Aufnahme

\*HWZ: Halbwertszeit. OBT: organically bound tritium. TWT: tissue water tritium

### 4.3 Tritium im Fleisch von Säugetieren

Der Einbau von Tritium in das OB<sup>T</sup> von Körperorganen hängt von der chemischen Form ab, in der Tritium aufgenommen wurde. Bei Kälbern wurde - bezogen auf gleiche Aktivität - bei Zufuhr als OB<sup>T</sup> 15mal mehr Tritium als bei Zufuhr als HTO aufgenommen; die acht untersuchten Organe enthielten insgesamt 4,1 % des aufgenommenen OB<sup>T</sup>. Bei der Fütterung von Schweinen mit tritiiertem Milchpulver wurden 4,2 % des aufgenommenen OB<sup>T</sup> in den Körper eingebaut, während die Fütterung mit tritiierten Kartoffeln zu einer Gesamtaufnahme von 11 % führte [Kir 77, IAEA 81].

Bei Versuchen mit trächtigen Schweinen, die mit OB<sup>T</sup> gefüttert wurden, und deren Ferkel wurde der Aufbau des OB<sup>T</sup> in den Ferkeln in utero und während des Säugens untersucht. Dabei entsprach bei Geburt die OB<sup>T</sup>-Aktivität der Ferkel der des Futters, während die HTO-Aktivität nur ein Viertel betrug. Dies änderte sich während der Zeit der Ernährung durch Säugen nicht. Für neugeborene Ferkel betrug die biologische Halbwertszeit 5 d, für nach ca. 40 d entwöhnte Ferkel 10 d. Je nach OB<sup>T</sup>-Kompartiment ergeben sich biologische Halbwertszeiten für OB<sup>T</sup> 10 - 100 d und mehr. Die OB<sup>T</sup>-Verteilung auf verschiedene Organe war ungleichmäßig [Hoe 86].

Eine ungleichmäßige OB<sup>T</sup>-Verteilung auf verschiedene Organe wurde auch bei Versuchen mit Ratten gefunden, bei denen über drei aufeinanderfolgende Generationen je einer Gruppe HTO bzw. OB<sup>T</sup> zugeführt wurde. Bei diesen Versuchen zeigte sich auch, daß bei Zufuhr als OB<sup>T</sup> 3,5mal mehr nicht-austauschbares OB<sup>T</sup> (NET: non-exchangeable tritium) zu finden war als bei Zufuhr als HTO [Pie 82]. Auch innerhalb eines Organs ist die Tritiumverteilung auf die verschiedenen OB<sup>T</sup>-Bestandteile wie z. B. Aminosäuren ungleichmäßig (vgl. z. B. [Roc 77]).

In [Rod 88] wird über Versuche an Mäusen berichtet, denen Tritium als HTO, OB<sup>T</sup> oder beides zugeführt wurde. Hierbei waren die Gleichgewichtsaktivitäten im Gewebewasser und im OB<sup>T</sup> im wesentlichen äquivalent zu der Summe der Gleichgewichtsaktivitäten in Mäusen, denen nur HTO oder nur OB<sup>T</sup> zugeführt worden war. Die Zeitkonstanten für Gewebewasser und austauschbares OB<sup>T</sup> waren etwa gleich (HWZ 1 - 2,6 d), während jene für nichtaustauschbares OB<sup>T</sup> bei 20 - 30 d lagen.

#### 4.4 Tritium in Milch

Da Milch von Milchkühen ein Untersuchungsobjekt darstellt, das in größeren Mengen während der Laktationsperiode laufend neu gebildet wird und ständig verfügbar ist, liegen umfangreiche Untersuchungen zur Tritiumdynamik der Milchbildung vor [Hoe 78, 82, 86; Kir 71, Kis 71].

Für Milch als Untersuchungsobjekt spricht ferner, daß sie ein Kohlenhydrat (Lactose; 4,7 %), Protein (Casein; 3,6 %) und Fett (Milchfett; 3,5 %) enthält, die leicht voneinander getrennt werden können. Untersucht wurden sowohl die Tritiumzufuhr im Trinkwasser als auch in der Form von OBT als tritiiertes Heu bzw. Maiskolben. Bei letzteren Versuchen ist die Menge der verfügbaren Futtermenge eine limitierende Größe.

Entscheidend für den Tritiumeinbau in das OBT der Milch ist das nichtaustauschbar gebundene Tritium im OBT des Futters. Bei den in [Hoe 82] beschriebenen Experimenten stammten 2,4 % des OBT der Milchfette aus dem HTO und 97,6 % aus dem OBT des Futters. Für Casein sind die entsprechenden Zahlen 3,2 und 96,8 % und für Lactose 39,4 und 60,6 %.

In Tabelle 9 sind mittlere Transferfaktoren für Milch, ausgedrückt als Prozentsätze der täglichen Tritiumaufnahme und bezogen auf 1 l Milch angegeben.

Tab. 9: Mittlere Transferfaktoren für Milch und Milchbestandteile. Prozentsatz der täglichen Tritiumaufnahme in 1 l Milch nach kontinuierlicher Ingestion von HTO [IAEA 81]

	Transferfaktor (%)
Wasser	1,50
Trockensubstanz	0,067
Milchfett	0,026
Lactose	0,029
Casein	0,011
Albumin	0,002
Total	1,57

Bei Zufuhr von OBT mit dem Futter werden erheblich höhere OBT-Werte in der Milch erreicht als bei der gleichen Tritiumzufuhr allein im Wasser.

#### 4.5 Tritium in Lebensmitteln aus der Umgebung des Kernforschungszentrums Karlsruhe

Da aus dem Kernforschungszentrum Karlsruhe Tritium in die Umgebung freigesetzt wird, werden die dort produzierten pflanzlichen Lebensmittel auf dieses Nuklid überwacht [Jah 82 - 86]. In Tabelle 10 sind Meßergebnisse aus den Jahren 1984 - 1986 zusammengefaßt. Die Werte für Luft- und Wasserpfad liegen in der gleichen Größenordnung (s. z. B. [Jah 86, Kön 87]).

Tab. 10: Tritium in pflanzlichen Nahrungsmitteln aus der Umgebung des KfK. Probenahmeorte: Hauptausbreitungssektoren, Tiefgestade. Zeit: 1984 - 1986.

	Wassergehalt in %	Aktivitätskonzentration in Bq/kg		
		TWT**	OBT (Verbrennungswasser)	Gesamt
Getreide (Körner)	10 - 52*	≤ 35	14 - 28	≤ 14
Salat	83 - 95	≤ 22	11 - 39	≤ 22
Kohl	82 - 93	≤ 25	≤ 82	≤ 24
einjähriges Wurzel- und Knollengemüse	77 - 95	≤ 50	9 - 53	≤ 36
Spargel	90 - 91	7 - 14	12 - 28	8 - 14
Obst	79 - 91	6 - 12	6 - 24	6 - 12

\*Mais. \*\* TWT: tissue water tritium.

2σ-Fehler: Für die meisten Meßwerte > 20 %; für Höchstwert 13 %

## 5 Abschätzung der durch Tritium verursachten Dosis

Ist Tritium als OBT in der Nahrung enthalten, so wird es vermehrt als nichtaustauschbar eingebaut. Da jedoch in Abschnitt 5.1 mit Gleichgewicht gerechnet wurde, hat dieser vermehrte Einbau für die Abschätzung keine Bedeutung, solange eine Anreicherung ausgeschlossen werden kann. Führt man dagegen eine Abschätzung über die Aktivitätsaufnahme und den Dosisfaktor durch, so muß der Dosisfaktor entsprechend modifiziert werden. Im folgenden werden zwei verschiedenartige Dosisabschätzungen auf der Grundlage vereinfachender Annahmen durchgeführt.

### 5.1 Abschätzung für den Gleichgewichtsfall

Für den Gleichgewichtsfall wird im einzelnen vorausgesetzt:

1. Die Tritiumaktivität der Nahrung betrage 100 Bq/kg, ihr Wassergehalt sei 70 %. Pro Kilogramm Nahrung hat man also 700 g Wasser entsprechend 77,8 g H. In den verbleibenden 300 g sei der Wasserstoffgehalt 6 %, d. h., es seien 18 g H organisch gebunden. Damit hat man also insgesamt 95,8 g H/kg bzw. eine Tritiumaktivität von ca. 1 Bq T/g H.
2. Es soll Gleichgewicht zwischen Nahrung und dem menschlichen Körper bestehen. (Diese Voraussetzung ist unter Umweltbedingungen nicht zu realisieren.)\*
3. Das inkorporierte Tritium sei gleichmäßig verteilt.
4. Die Wirkung eines Tritiumzerfalls sei nicht davon abhängig, wo das Tritiumatom gebunden war.

Nach Tabelle 2 enthält der Körper des Standardmenschen 100 g Wasserstoff pro Kilogramm. Bei einer spezifischen Aktivität von 1 Bq T/g H hat man also 100 Bq T/kg. Pro Zerfall wird eine mittlere Energie von  $5,7 \text{ keV} = 9,13 \cdot 10^{-16} \text{ J}$  freigesetzt und wegen der geringen Reichweite der  $\beta^-$ -Strahlung von Tritium praktisch am Ort des Zerfalls absorbiert. Mit einem Qualitätsfaktor 1 erhält man somit eine Dosisleistung von  $9,13 \cdot 10^{-14} \text{ Sv/s} = 2,88 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/a}$ .

---

\*1 Bq T/g H bedeutet für den Menschen ca.  $2 \cdot 10^{11}$  Zerfälle pro Jahr im Körper bzw. im Mittel ca.  $3 \cdot 10^{-3}$  Zerfälle pro Jahr und Körperzelle, wobei allerdings die Lebensdauer der Zellen bzw. ihre Erneuerung nicht berücksichtigt ist.

## 5.2 Abschätzung über die Aktivitätszufuhr

Die unter 5.1 vorgestellte Rechnung läßt sich mit Hilfe des Dosisfaktors kontrollieren. Ebenfalls aus Tabelle 2 folgt eine Wasserstoffaufnahme von 350 g/d bzw.  $1,28 \cdot 10^5$  g/a. Mit der spezifischen Aktivität von 1 Bq T/g H und dem Dosisfaktor von  $1,6 \cdot 10^{-11}$  Sv/Bq T [Noß 85] folgt eine Dosis von  $2,04 \cdot 10^{-6}$  Sv/a, was mit dem auf völlig anders gewonnenem Weg befriedigend übereinstimmt.

Der angegebene Dosisfaktor von  $1,6 \cdot 10^{-11}$  Sv/Bq T wurde für eine biologische Halbwertszeit von 10 d ( $\lambda_{\text{eff}} = 8,023 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ), eine Körpermasse von 70 kg und die oben bereits benutzte mittlere Energie von  $9,13 \cdot 10^{-16}$  J pro Zerfall berechnet. Diese biologische Halbwertszeit gilt für wassergebundenes Tritium. Bei einer Modifikation des Dosisfaktors bezüglich OBT hängt die prozentuale Änderung des Dosisfaktors von dem Produkt der biologischen Halbwertszeit und dem OBT-Anteil, dem diese biologische Halbwertszeit zugeordnet ist, ab. Für OBT gilt eine wesentlich größere biologische Halbwertszeit, für die jedoch keine allgemein akzeptierte Empfehlung vorliegt, zumal - streng genommen - für jede einzelne organische Verbindung und jedes Organ ein spezieller Wert angegeben werden müßte, wobei noch die Zusammensetzung der Nahrung zu berücksichtigen wäre. Rechnet man mit einer täglichen Aufnahme von 5 % OBT mit einer pauschal um den Faktor 10 größeren effektiven Halbwertszeit\*, so wäre der Ingestionsdosisfaktor um 45 % zu erhöhen (vgl. [Hoe 86]). Damit wächst die auf der Basis der Tritiumzufuhr eines Dosisfaktors abgeschätzte Dosis von  $2,04 \cdot 10^{-6}$  Sv/a um 45 %. Man erhält dann eine Dosis von  $2,95 \cdot 10^{-6}$  Sv/a, was der auf anderem Weg hergeleiteten  $2,88 \cdot 10^{-6}$  Sv/a sehr nahe kommt. In [Etn 84] wird ein Faktor 1,7 - 4,5 angegeben, mit dem die Dosis für das Körperwasser zu multiplizieren ist, um die tatsächliche Strahlenexposition zu erhalten. Der Korrekturfaktor hängt von der Tritiumverteilung in der Nahrung ab.

Bei allen Dosisabschätzungen auf dem Weg über die Nahrungsaufnahme ist zu bedenken, daß Nahrungsmittel, die vor dem Verzehr intensiv mit Wasser in Berührung kommen, z. B. durch Waschen (z. B. Salat) und Kochen (z. B. Gemüse) oder die gebacken bzw. gebraten werden (z. B. Fisch), Wasser austauschen bzw. Wasser verlieren. Dies kann zu einer deutlichen Verringerung der Tritiumaufnahme mit der Nahrung führen.

-----  
\*Bei dem jetzigen Kenntnisstand ist eine vollständige Aufschlüsselung des OBT in verschiedene Komponenten nicht möglich. Während für Proteine größere Halbwertszeiten abgeschätzt wurden (s. 2.1), ist für andere Komponenten die biologische Halbwertszeit sicher deutlich kleiner als 100 d.



## 6    Schlußfolgerungen

Vorstehende Ausführungen machen deutlich, daß bei Berechnungen der Strahlenexposition das organisch gebundene Tritium berücksichtigt werden muß. Das Problem ist nicht durch Anwendung eines pauschalen Dosisfaktors zu lösen. Eine solide Aussage erfordert eine vorherige Untersuchung der Nahrung. Andererseits hat unter den gegenwärtigen Bedingungen Tritium nur einen derart kleinen Anteil an der gesamten Strahlenexposition des Menschen, daß bei einer wesentlichen Erhöhung des derzeit angewandten Dosisfaktors  $1,6 \cdot 10^{-11}$  Sv/Bq\* kein Strahlenschutzproblem entstünde. Daß dieser Dosisfaktor zu niedrig ist, steht außer Zweifel. Nach Meinung des Verfassers sollte die Erhöhung fallweise nach Prüfung, nicht aber pauschal durchgeführt werden.

Mit dem Vierkompartimentmodell von Etnier läßt sich der Wasserstoffmetabolismus des Menschen hinreichend gut beschreiben. Durch Aufteilung des OBT auf drei Kompartiment mit den Halbwertszeiten 0,75 d (0,4 %), 22 d (3,4 %) und 450 d (28,7 %) - in Klammern sind die Anteile des Wasserstoffs in den Kompartimenten am gesamten Wasserstoff im Körper hinzugefügt - sowie durch die Halbwertszeit von 9,2 d für das Körperwasserkompartiment (66,7 %) werden die Ergebnisse von Ausscheidungsmessungen wiedergegeben.

Nach der Dosisabschätzung in Kapitel 5 ergab sich unter der Annahme einer spezifischen Aktivität von 1 Bq T/g H eine Strahlenexposition von ca.  $3 \cdot 10^{-6}$  Sv/a. In der Umgebung des KfK liegt die spezifische Tritiumaktivität im Mittel deutlich unter einem Drittel des angenommenen Wertes, so daß sich eine tatsächliche Strahlenexposition unter  $1 \cdot 10^{-6}$  Sv/a ergibt. (Früher angegebene höhere Werte gingen von zu konservativen Annahmen aus, stellen daher keinen Widerspruch dar.) Eine Strahlenexposition unter 1 % jener durch das natürliche K-40 ist aus der Sicht des Strahlenschutzes ohne jede Bedeutung.

Ogleich in der Literatur zahlreiche Veröffentlichungen zu dem behandelten Thema zu finden sind, bleiben sehr viele Fragen offen, deren wissenschaftliche Klärung von großem Interesse wäre. Andererseits zeigen vorstehende Ausführungen, daß bezüglich des Strahlenschutzes die vorhandenen Kenntnisse für eine Aussage über die Strahlenexposition durch Tritium ausreichen. Die Größe der

---

\*In der „Allgemeinen Berechnungsgrundlage“ (Gemeinsames Ministerialblatt, Ausgabe A, 30, 371 (1979)) ist der Dosisfaktor  $3,5 \cdot 10^{-11}$  Sv/Bq für den Erwachsenen angegeben, der daher nicht vermindert werden sollte.

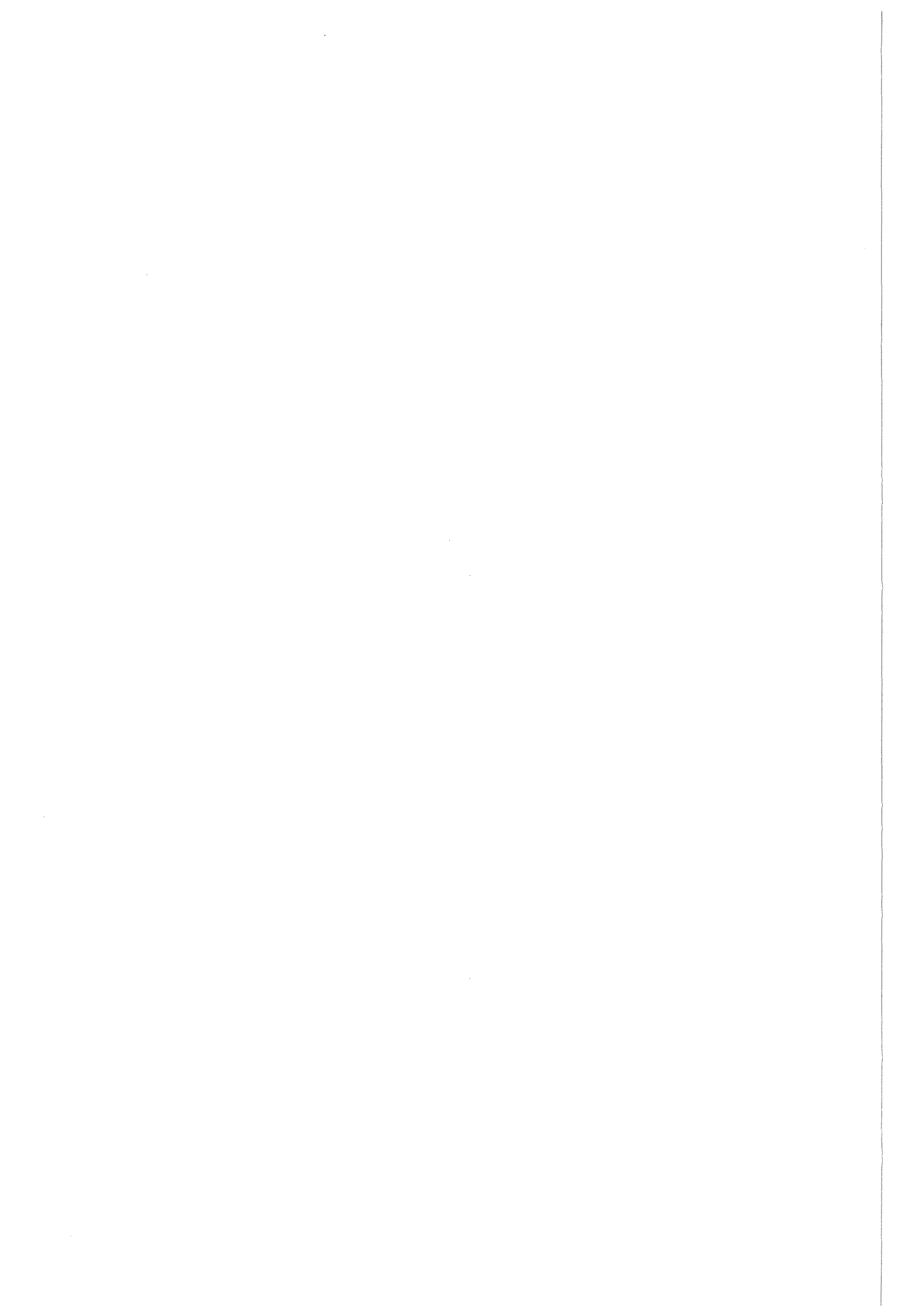
durch organisch gebundenes Tritium entstehenden Ungenauigkeiten läßt sich zuverlässig abschätzen und übertrifft sicherlich nicht die durch die individuellen Unterschiede im Wasserhaushalt und in den Ernährungsgewohnheiten der einzelnen Menschen entstehende Streuung.

## 7 Literatur

- [Bel 79] Y. Belot, D. Gauthier, H. Camus, C. Caput; *Health Physics* 37, 575 (1979)
- [Bel 82] Y. Belot; Transfer of Tritiated Water into the Plants: A Review, Beitrag zu [CEC 84] S. 173
- [Cla 80] E. Clausen; Bestimmung von Tritium in organischem Material, *STH-Berichte* 12/80, 71 (1980)
- [Cou 83] P. Couchat, M. Puard, G. Lasceve; *Health Physics* 45, 757 (1983)
- [CEC 84] Commission of the European Communities, European Seminar on the Risks from Tritium Exposure, Mol, Belgium, 22. - 24. November 1982, Report EUR 9065 EN
- [CEC 87] Commission of the European Communities und Centro de Investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnologicas: Seminar on the Cycling of Long-Lived Radionuclides in the Biosphere, Observations and Models, 15. - 19. September 1986, Madrid, Proceedings 1987
- [Elw 71] J. W. Elwood; *Nuclear Safety*, 12, 326 (1971)
- [Etn 84] E. L. Etnier, C. C. Travis and D. M. Hetrick; Metabolism of organically bound tritium in man, *Radiation Research* 100, 487-502 (1984)
- [Fei 79] L. E. Feinendegen; Biologische Effekte von Tritium, Mikrodosimetrie, Transmutation, Mikroverteilung, Strahlenwirkung, *Wiss. Symposium des Instituts für Strahlenhygiene des Bundesgesundheitsamtes: Strahlenschutzprobleme im Zusammenhang mit der Verwendung von Tritium und Kohlenstoff-14 und ihren Verbindungen*, Berlin (1979)
- [Gar 82] J. A. Garland, L. C. Cox; *Water, Air, and Soil Pollution* 17, 207 (1982)
- [Gei 77] Ciba-Geigy AG (Hrsg.), Basel, *Wissenschaftliche Tabellen Geigy*, achte, revidierte und erweiterte Auflage, Teilband Körperflüssigkeiten, S. 237 (1977)
- [Hee 86] M. van Hees, G. B. Gerber, R. Kirchmann, J. H. Vanderkom, R. van Bruwaene; *Radiation Protection Dosimetry* 16, 123 (1986)
- [Hoe 78] J. van den Hoek, R. Kirchmann, N. B. Juan; Transfer and Incorporation in Mammals, Beitrag zu [IAEA 79] S. 433

- [Hoe 82] J. van den Hoek, G. Gerber; Conversion to Organic Tritium in Ruminants and the Implication for Radiation Protection, Beitrag zu [CEC 84] S. 225
- [Hoe 86] J. van den Hoek, G. B. Gerber, R. Kirchmann; Cycling of H-3 and C-14 in the Biosphere: Similarities and Differences, Beitrag zu [CEC 87]
- [IAEA 79] International Atomic Energy Agency; Behaviour of Tritium in the Environment, Proc. Symp., San Francisco, 16. - 20. Oktober 1978, Wien 1979
- [IAEA 81] International Atomic Energy Agency; Tritium in Some Typical Ecosystems, Technical Report Series Nr. 207 (1981)
- [ICRP 75] International Commission on Radiological Protection; Report of the Task Group on Reference Man, ICRP-Publication Nr. 23, Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Braunschweig (1975)
- [ICRP 79] International Commission on Radiological Protection; Report of Committee 2 of the ICRP, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 30, Teil 1, Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Braunschweig (1976)
- [Jah 82] Jahresbericht 1981 der Hauptabteilung Sicherheit, Hrsg.: H. Kiefer, W. Koelzer, L. A. König, KfK-3272, März 1982
- [Jah 83] Jahresbericht 1982 der Hauptabteilung Sicherheit, Hrsg.: H. Kiefer, W. Koelzer, L. A. König, KfK-3535, April 1983
- [Jah 84] Jahresbericht 1983 der Hauptabteilung Sicherheit, Hrsg.: H. Kiefer, W. Koelzer, L. A. König, KfK-3663, April 1984
- [Jah 85] Jahresbericht 1984 der Hauptabteilung Sicherheit, Hrsg.: H. Kiefer, W. Koelzer, L. A. König, KfK-3883, April 1985
- [Jah 86] Jahresbericht 1985 der Hauptabteilung Sicherheit, Hrsg.: H. Kiefer, W. Koelzer, L. A. König, KfK-4067, April 1986
- [Jah 87] Jahresbericht 1986 der Hauptabteilung Sicherheit, Hrsg.: H. Kiefer, L.A. König, KfK-4207, März 1987
- [Kir 71] R. Kirchmann, G. Koch, V. Adam; J. van den Hoek, Studies on the Food Chain Contamination by Tritium, Beitrag zu [Mog 73], S. 341
- [Kir 77] R. Kirchmann, P. Charles, R. van Brunwaene, J. Remy, G. Koch, J. van den Hoek; Distribution of Tritium in Different Organs of Calves and Pigs after Ingestion of Various Tritiated Feeds, Curr. Top. Rad. Research 12, 291 (1977)
- [Kis 71] G. N. Kistner; Tritium Excretion via Cow's Milk after Continuous Intake of Tritiated Water, Beitrag zu [Mog 73], S. 349
- [Kön 87] L. A. König, S. Fark, S. Hempelmann, K.-G. Langguth, G. Pagliosa, D. Papadopoulos, S. Strack; Untersuchungen zum Transport von Tritium in der Umwelt, KfK 4131 (1987)

- [Mog 73] A. A. Moghissi, M. W. Carter; Tritium, Messenger Graphics, Publishers, Phoenix, Arizona and Las Vegas, Nevada, 1973 (Beiträge zu Tritium-Symposium, 28. August - 3. September 1971, Las Vegas)
- [Mur 84] C. E. Murphy; Health Physics 47, 635 (1984)
- [NCRP 79a] National Council on Radiation Protection and Measurements; Tritium in the Environment, NCRP-Report 62 (1979)
- [NCRP 79b] National Council on Radiation Protection and Measurements; Tritium and Other Radionuclide Labeled Organic Compounds Incorporated in Genetic Material, NCRP-Report 63 (1979)
- [Noß 85] D. Noßke, B. Gerich, S. Langner; Dosisfaktoren für Inhalation oder Ingestion von Radionuklidverbindungen (Erwachsene), Bundesgesundheitsamt, Institut für Strahlenhygiene, ISH-Heft 63 (1985)
- [Pie 82] Z. Pietrzak-Flis, I. Radwan, Z. Major, M. Kowalska; J. Radiation Res. 22, 434 (1982)
- [Roc 77] M. Rochalska; Nukleonika, 27, 57 (1977)
- [Rod 86] D. W. Rodgers; Health Physics 50, 89 (1986)
- [Rod 88] D. W. Rodgers; Tritium Dynamics in Mice Exposed to Tritiated Water, Tritiated Diet or Both, Ontario Hydro Research Division, Report No. 88-30-K, April 1988
- [Sch 65] Schlag nach! 8. Auflage, Bibliographisches Institut Mannheim, 1965



## Phosphatglasdosimeter - das Routinedosimeter der Zukunft?

E. Piesch

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH

Hauptabteilung Sicherheit/Dosimetrie

### Zusammenfassung

Trotz der herausragenden dosimetrischen Eigenschaften des Phosphatglasdosimeters verhinderte rückblickend das Fehlen einer automatischen Auswertung eine größere Anwendung der Glasdosimetrie. Neue Gesichtspunkte für eine Personenüberwachung ergeben sich mit einem kommerziell erhältlichen, vollautomatischen Dosimetriesystem unter Verwendung einer gepulsten UV-Laseranregung und eines Flachglasdosimeters zur Messung der Photonen-Äquivalentdosis im Dosisbereich von 10  $\mu\text{Sv}$  oberhalb einer Photonenenergie von 10 keV.

Phosphate Glass Dosemeter - the Routine Dosemeter for the Future?

### Summary

In spite of the extraordinary dosimetric properties of phosphate glass dosimeters, the lack in an automatic read-out prevented retrospectively a large scale application of glass dosimetry. New aspects of personell monitoring were found by a commercially available full automatic dosimetry system using pulsed UV laser excitation and a flat glass dosimeter for the measurement of the photon dose equivalent in the dose range of 10  $\mu\text{Sv}$  above a photon energy of 10 keV.

## 1 Einleitung

Kann das Phosphatglasdosimeter das Routinedosimeter der Zukunft werden? Diese Frage hat uns im Kernforschungszentrum Karlsruhe seit nahezu 30 Jahren beschäftigt. Zweifellos nimmt das Phosphatglasdosimeter eine Sonderstellung innerhalb der Routinedosimetrie ein.

Glasdosimeter bieten einerseits eine Vielzahl wünschenswerter, herausragender dosimetrischer Eigenschaften, die andere passive Dosimetrie-Systeme mit einem Detektor nicht vorzuweisen haben:

- Einfachheit der Auswertung: UV-Lichtanregung, Messung der Fluoreszenzintensität im Photomultiplier,
- Wiederholbarkeit der Messung,
- Jederzeitige Kontrolle, d. h. Abfrage der Dosisinformation innerhalb der Überwachungsdauer,
- Beste Chargenhomogenität des Ansprechvermögens  $\leq \pm 0,5 \%$ ,
- Beste Langzeitstabilität der Meßwertspeicherung: Fading  $\leq 10 \%$  in 10 Jahren,
- Langzeitmessung der Jahresdosis bzw. Lebensalterdosis mit Zwischenauswertungen (1 mSv mit  $\pm 15 \%$ ),
- Kombination von Eigenauswertung durch den Betreiber und Kontrollmessung durch unabhängige Meßstelle.

Mit der Bereitstellung eines Dosimetersystems im Jahr 1961 eröffneten sich damit grundsätzlich neue Möglichkeiten in der Routineüberwachung. Das 1963 zum Nachweis von Photonen entwickelte Phosphatglas-Kugeldosimeter, seit 1967 amtliches Personendosimeter in der Bundesrepublik Deutschland, wurde insbesondere auch zur Jahresdosismessung des natürlichen Strahlenpegels und zum Nachweis geringer beruflicher Strahlenexpositionen eingesetzt.

Der im Vergleich zum Filmdosimeter relativ kleine Anwendungsumfang von etwa 5 % zeigt andererseits, daß dem Glasdosimeter innerhalb der amtlichen Personendosimetrie in der Bundesrepublik Deutschland aus verschiedenen Gründen nur eine Sonderrolle zugestanden wurde. Was waren die Gründe hierfür?

Als nachteilig für einen größeren Routineeinsatz erwiesen sich in der Vergangenheit

- der begrenzte Photonenenergiebereich oberhalb 40 keV, der eine Anwendung im medizinischen Bereich und an Röntgenanlagen ausschließt,
- die erforderliche Messung und Subtraktion einer individuellen Vordosis von  $> 0,5$  mSv,
- die Notwendigkeit einer Glasreinigung,
- das umständliche Auspacken der Gläser, insbesondere aber
- das Fehlen eines automatischen Auswertegerätes.

Der eigentliche Grund für das Desinteresse der Hersteller war sicherlich die Fehlentscheidung in den USA in den 50er Jahren, wegen der damals unzureichenden Glasqualität in der Unfalldosimetrie [1, 2] nur noch die Entwicklung der Thermolumineszenzdosimetrie zu fördern. Dies führte dazu, daß Toshiba Glass bereits 1972 die Fertigung von Glasdosimeter-Auswertegeräten einstellte, zu einer Zeit, als bereits Thermolumineszenzsysteme mit automatischer Auswertung entwickelt wurden. Die Herstellung von Gläsern mit geringerem Silberanteil erweiterte zwar den Anwendungsbereich bis zu Photonenenergien von 15 keV. Auch der Einsatz von gepulsten UV-Lasern zur Fluoreszenzanregung verbesserte die untere Dosisnachweisgrenze. Diese Anwendungsvorteile des Glasdosimeters kamen jedoch nicht zum Tragen, zumal zwei Versuche zur Automatisierung des Meßverfahrens in den 70er Jahren scheiterten.

Kann das Glasdosimeter unter diesen Umständen trotzdem das Routinedosimeter der Zukunft werden? Mehrere Gründe rechtfertigen heute eine solche Fragestellung. Thermolumineszenzdosimeter haben nicht im vorausgesagten Umfang Eingang in der Personendosimetrie gefunden. Es waren aber vor allem die langjährigen zufriedenstellenden Erfahrungen innerhalb der Routinedosimetrie im KfK sowie die ermutigenden Ergebnisse einer Vielzahl u. a. älterer Entwicklungsarbeiten, die es rechtfertigen, das Phosphatglasdosimeter als wünschenswerte Alternative zum Thermolumineszenzdosimeter anzusehen. Es ergab sich daraus erneut ein kommerzielles Interesse, ein automatisches Auswertegerät für Glasdosimeter zu entwickeln.



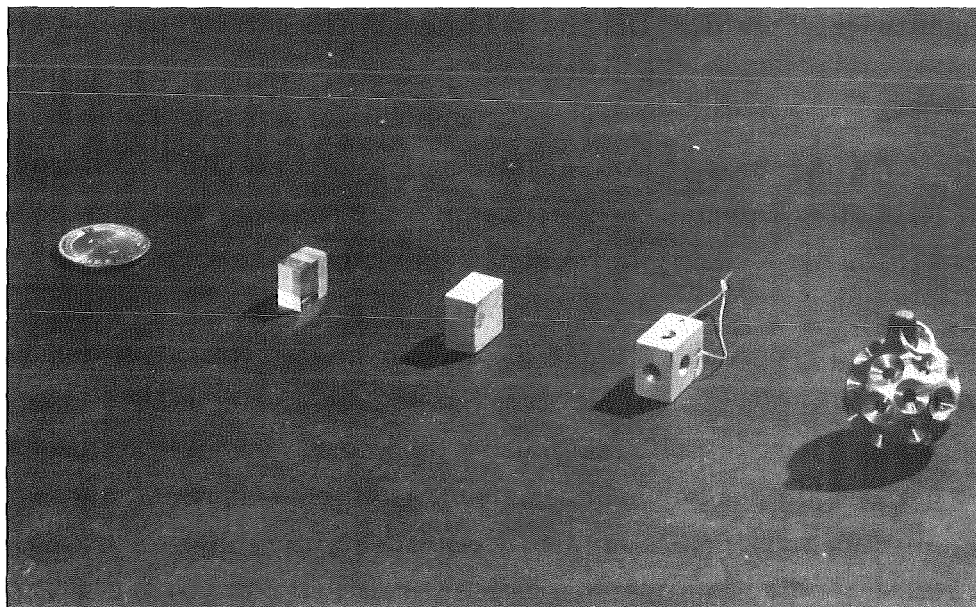
## 2 Erfahrungen mit der Phosphatglasdosimetrie

### 2.1 Entwicklung des Meßverfahrens

Mit der Entwicklung silberaktivierter Phosphatgläser geringer Vordosis und guter Chargenreproduzierbarkeit [3] sowie der Bereitstellung eines kommerziellen Auswertegerätes durch Toshiba Glass waren bereits 1961 die Voraussetzungen für einen Routineeinsatz erfüllt.

Das neue Dosimetriesystem wurde daraufhin bei den damaligen Filmdosimetermeßstellen in der KfA Jülich und im KfK Karlsruhe, später vor allem im Hinblick auf eine Einführung als amtliches Personendosimeter auch bei der LfU Karlsruhe auf seine dosimetrischen Eigenschaften untersucht [4-6].

Abb. 1: Energiekompensationsfilter für das Phosphatglas  $8 \times 8 \times 4,7 \text{ mm}^3$ : 1mm Cd, 1mm Cd mit konischen Bohrungen an den Seitenflächen, 2 mm Zinnkugel mit konischen Bohrungen



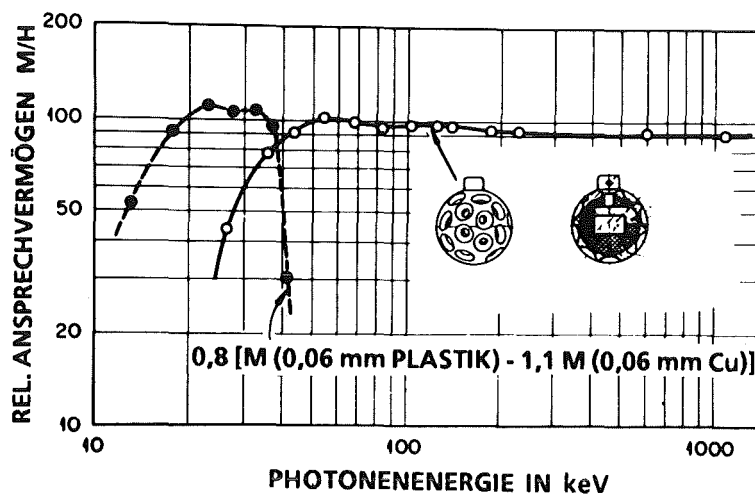
Glasdosimeter wurden im KfK bereits 1962 in der Routinedosimetrie eingesetzt. Bedingt durch den Silberanteil im Glas und dem Fehlen einer Gewebeäquivalenz waren jedoch geeignete Energiekompensationsfilter erforderlich. Zur Verbesserung der Richtungsabhängigkeit (Abb. 1) wurden die ersten Dosimeterkapselungen aus etwa 1 mm Zinn an den Seitenflächen mit konischen Löchern versehen [7, 8], bis dann das Phosphatglas-Kugeldosimeter [9] die optimale Lösung brachte. Damit waren die Voraussetzungen für den Einsatz als amtliches Personendosimeter in der Isotopen- und Kerntechnik geschaffen. Von besonderer Bedeu-

tung für die Routinedosimetrie war die Einführung eines standardisierten Waschvorganges für Glasdosimeter zur Herabsetzung der unteren Nachweisgrenze.

Mit dem Phosphatglasdosimeter wurde der Anwendungsbereich Röntgenstrahlung und Betastrahlung jedoch nicht abgedeckt (Abb. 2). Ein dafür entwickeltes Weichstrahldosimeter [10] mit zwei zusätzlichen, unterschiedlich abgedeckten Detektoren war für einen Routineeinsatz zu unhandlich und wurde keine Alternative zum Filmdosimeter.

Die Entwicklungen der nachfolgenden Jahre (siehe auch Tab. 1) waren u. a. die Benutzung des Routine-Glasdosimeters als Neutronen-Aktivierungsdetektor in der Unfalldosimetrie zum getrennten Nachweis von thermischen und schnellen Neutronen [11], die Verwendung des Glases als Kernspurätzdetektor zum Nachweis von schnellen Neutronen [12, 13], in Abbildung 3 gezeigt am Beispiel von Uranspaltfragmentspuren [13], die direkte Messung von Organ-Äquivalentdosen u. a. auch bei Bestrahlungen der Körperrückseite [14-16] (Abb. 4) sowie die Bestimmung einer von der Strahleneinfallrichtung abhängigen bzw. unabhängigen Tiefendosisverteilung im Glas bei Abtastung des Glases in Strahleneinfallrichtung bzw. in x-, y- und z-Richtung [17-19, 24 / Abb. 5].

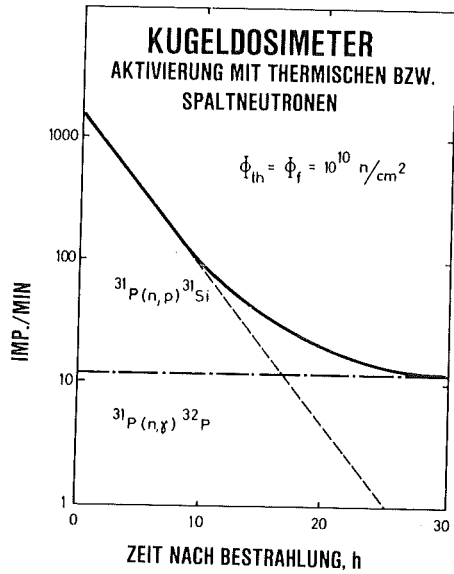
Abb. 2: Energieabhängigkeit des Photonen-Ansprechvermögens für das Phosphatglaskugeldosimeter und ein Weichstrahldosimeter mit zwei zusätzlichen Gläsern, die mit 0,06 mm Plastik bzw. 0,06 mm Cu abgedeckt sind [10]



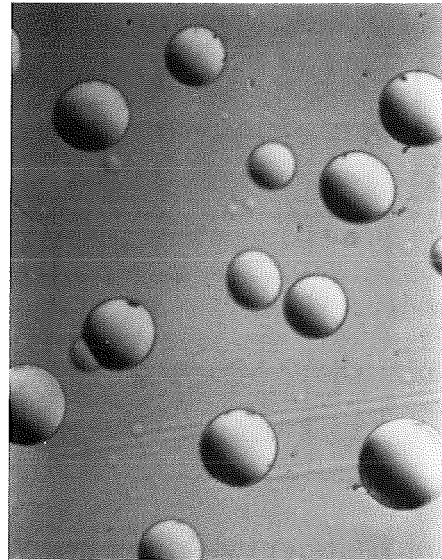
Tab. 1: Phosphatglasdosimetrie - Entwicklungen

1951 - 1960	Phosphatglas - Unfalldosimeter (Schulman et.al. 1951, 1960) [1,2]
1961	Phosphatglas - Routinedosimeter (Yokota et.al. 1961) [3]
1962	Untersuchung dosimetrischer Eigenschaften (Becker 1963; Kiefer, Maushart, Piesch 1964; Narrog 1967) [4-6]
1963	Phosphatglas-Kugeldosimeter (Piesch 1964) [9]
1965	Phosphatglas-Weichstrahldosimeter (Maushart, Piesch 1965) [10]
1965 - 1971	Gläser geringer Energieabhängigkeit (Becker 1965-1968; Jahn 1969; Francois 1969; Scharmer, Eckert 1969; Yokota et.al. 1965, 1971)
1966	Glas als Kernspurätzdetektor (Becker 1966, Piesch 1967) [12,13]
1967	Neutronen-Unfalldosimetrie, Glasaktivierung (Piesch 1967) [11]
1967	Direktanzeige von Organ-Äquivalentdosen (Piesch 1966-1973) [14-16]
1967	Tiefendosisverteilung im Glas (Kiefer, Piesch 1967-1970) [17-19]
1967 - 1981	UV-Laseranregung (Kastner et.al. 1967; Barthe, Blanc 1970; Yokota et.al. 1971, Hillenkamp, Regulla 1972; Dörger, Pitt, Scharmann 1977; Schneckenburger, Regulla, Unsoeld 1981)
1968	Langzeitfading-Experiment (Cheka 1968) [20]
1969	Thermolumineszenz im Glas (Regulla 1969) [21]
1972	In-core-Gammadodosimetrie (Doerfel 1972) [22]
1972	Automatische Auswertung (Dade, Hoegl, Maushart 1972) [23]
1980	Optische Abtastung des Glases in X-Y-Z-Richtung (König 1980) [21]
1983	Flachglasdosimeter für verschiedene Meßgrößen und UV-Laseranregung (Burgkhardt, Piesch 1983-88) [38-40]
1984	Auswertegerät mit UV-Laser (Omori et.al. 1984)

Abb. 3: Phosphatglas als Neutronendetektor: (a) Zeitliche Änderung der Beta-Zählrate im Glas nach kurzzeitiger Neutronenaktivierung. Trennung der Aktivierungsanteile von thermischen und schnellen Neutronen durch zwei Messungen, (b) Runde Ätzgruben von neutroneninduzierten Spaltfragmenten nach chemischer Ätzung der Glasoberfläche [13]



(a)



(b)

Abb. 4: Direktanzeige der Organdosis in den Hoden bei Bestrahlung eines Phosphatglasdosimeters mit halbkugelförmigem Energiekompensationsfilter an der Vorderseite eines Alderson-Phantoms für verschiedene Photonenenergien und Strahleneinflussrichtungen aus dem vorderen und rückseitigen Halbraum [16]

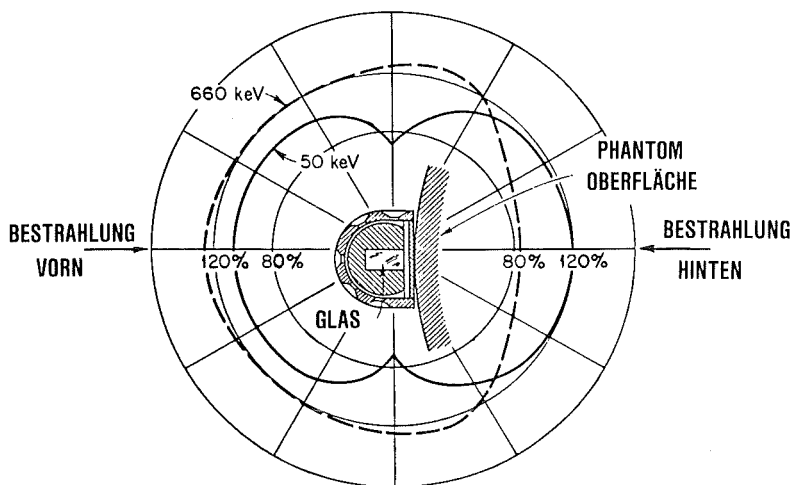
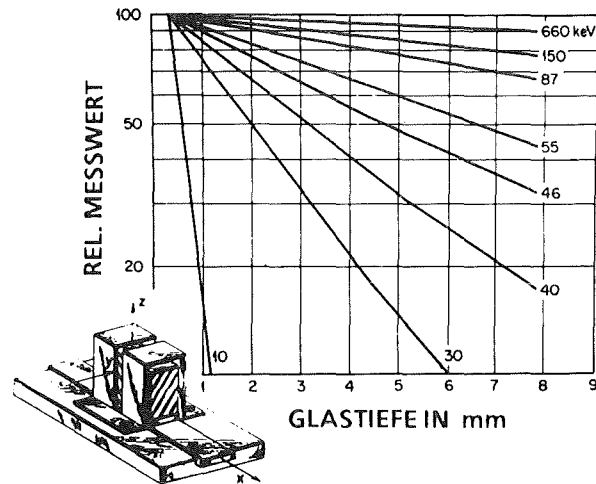


Abb. 5: Relative Fluoreszenzintensität in Abhängigkeit von der Glastiefe bei differentieller Abtastung des Phosphatglases in Richtung des Strahleneinfalls für verschiedene Photonenenergien bezogen auf den Maximalwert in 0,3 mm Tiefe [17]



Für die Weiterentwicklung des Meßverfahrens von grundsätzlicher Bedeutung waren jedoch die Herstellung von Gläsern mit geringerem Silbergehalt [25-31] zur Verbesserung des Nachweises energiearmer Röntgenstrahlung, vor allem aber der Einsatz einer gepulsten UV-Laseranregung zur Diskriminierung einer nichtstrahleninduzierten Fluoreszenz mit dem Ziel, die Vordosis zu verringern und kleine Dosen von 0,01 mSv nachzuweisen [31-36].

## 2.2 Einsatz und Erprobung des Routinedosimeters

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe und bei den Kernkraftwerken in Baden-Württemberg ersetzte das Glasdosimeter das zuvor eingesetzte Neutronenfilm-dosimeter innerhalb der amtlichen Personendosimetrie.

Nach Einführung in der Personendosimetrie [42, 43] wurden Glasdosimeter auch innerhalb der Umgebungsüberwachung zur Messung der örtlichen Verteilung der Strahlungsdosis eingesetzt. Der Aufbau eines dichten Meßstellennetzes mit mehreren hundert Dosimetern um das Kernforschungszentrum Karlsruhe im Jahre 1965 [44] wurde hinsichtlich Meßtechnik und Umfang in den nachfolgenden Jahren richtungsweisend für ein Umgebungsüberwachungsprogramm mit Festkörperdosimetern.

Die Messung der örtlichen Dosisverteilung in der Umgebung, gezeigt am Beispiel des Jahresdosisprofils entlang der Zaungrenze des KfK (Abb. 6), insbesondere aber die jährliche Personendosismessung bei KfK-Mitarbeitern (Abb. 7) zeigten die Vorzüge des Meßverfahrens gegenüber dem natürlichen Strahlenpegel schon geringe zusätzliche Strahlenexpositionen von etwa 0,2 mSv pro Jahr nachzuweisen und für interessierende Personengruppen arbeitsplatzspezifische Aussagen über den Langzeittrend der beruflichen Strahlenexposition zu erhalten [48]. Dies verdeutlicht in Abbildung 7a die Verteilung der mittleren Jahresdosen der Jahre 1968 bis 1981 für verschiedene Arbeitsbereiche im KfK sowie in Abbildung 7b die kumulative Häufigkeitsverteilung für die Jahresdosisergebnisse bei KfK-Mitarbeitern

Vor Einführung als amtliches Dosimeter war u. a. auch eine Erprobung des neuen Dosimetriesystems in der Routineüberwachung erforderlich. Umfangreiche Meßreihen und Vergleiche mit dem Stabdosimeter und dem Filmdosimeter ergaben, daß letzten Endes nur die Meßwertabweichung gleichzeitig getragener Dosimeterpaare desselben Dosimetriesystems zur Bewertung der Meßunsicherheit bzw. Reproduzierbarkeit der Dosismessung innerhalb der Personenüberwachung herangezogen werden kann, da hier der Bezug zu einer bekannten Referenzdosis nicht gegeben war (Abb. 8). So ergaben langjährige Vergleichsmessungen in einem Isotopenlabor in den 60er Jahren [50], daß die Meßwertabweichungen bei Filmdosimeterpaaren in 44 % der Bestrahlungsfälle (Meßwerte  $\geq 0,4$  mSv) größer als ein Faktor 1,5 waren. Glasdosimeterpaare zeigten hingegen in 87 % aller Fälle Übereinstimmung innerhalb von  $\pm 15$  % und Glas- und Stabdosimeter in 90 % aller Fälle eine Übereinstimmung der gemessenen Jahresdosis innerhalb von  $\pm 20$  %.

Vergleichsmessungen mit verschiedenen Dosimetern wurden in neuester Zeit u. a. auch in Streustrahlungsfeldern an Kernreaktoren durchgeführt [51]. Das Fehlen einer Referenzdosis und die dadurch notwendige Bevorzugung eines Meßverfahrens relativiert jedoch die Aussagen über die Meßunsicherheit eines Dosimetriesystems.

Abb. 6: Mittleres Jahresdosisprofil an der KfK-Geländegrenze mit Abfallager (A) in den Jahren 1968 bis 1974 [45]

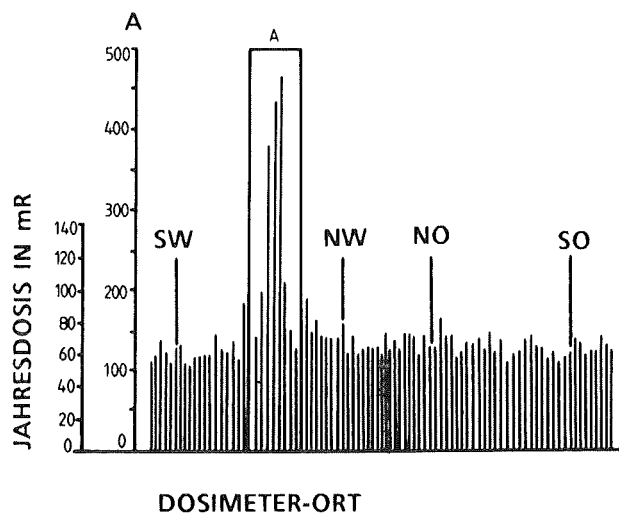


Abb. 7: Jahresdosis für KfK-Mitarbeiter, (a) in verschiedenen Arbeitsbereichen [48], (b) kumulative Häufigkeitsverteilung der Jahresdosis [49]

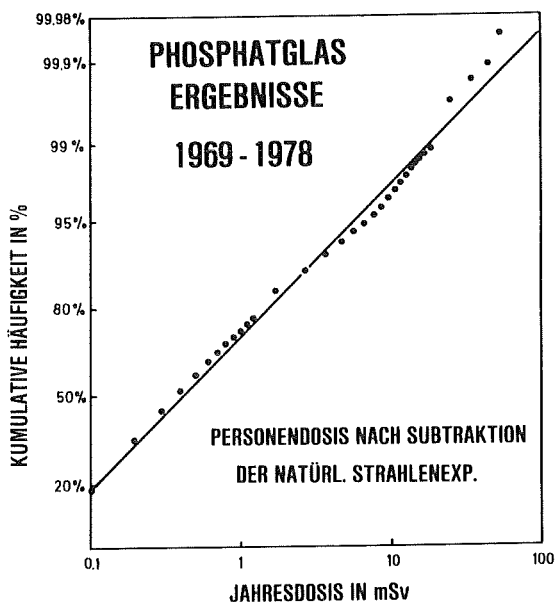
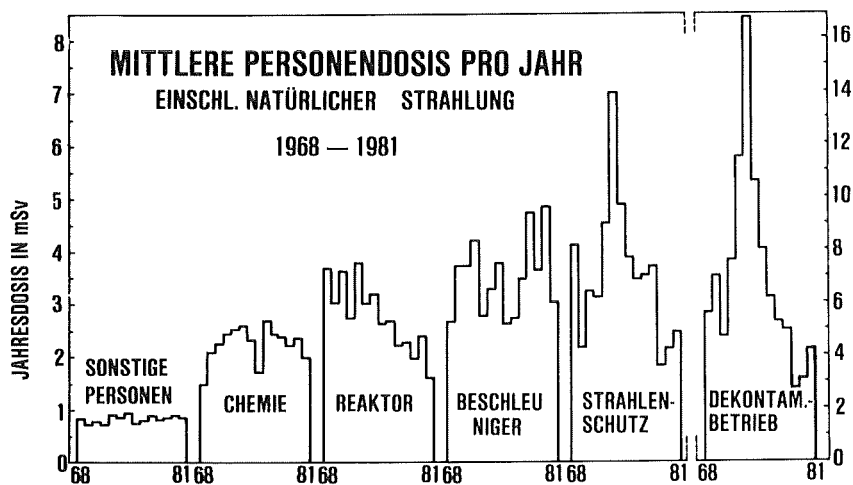


Abb. 8: Relative Anzahl der Glas- und Filmdosimeterpaare, deren Meßwertdifferenz innerhalb des angegebenen Meßfehlers lag. Die Dosimeterpaare wurden gleichzeitig von einer Person innerhalb der Routineüberwachung in einem Isotopenlabor getragen [50]

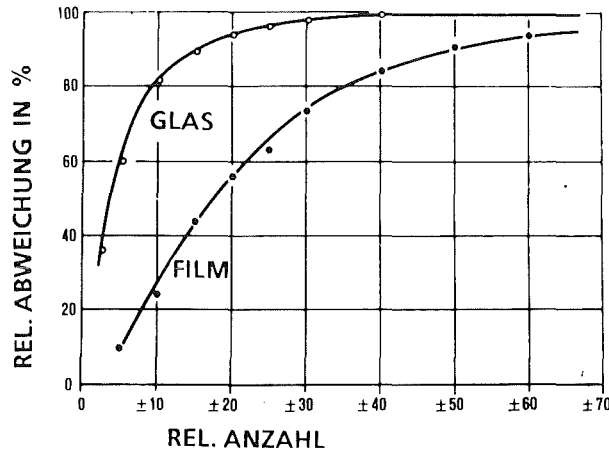
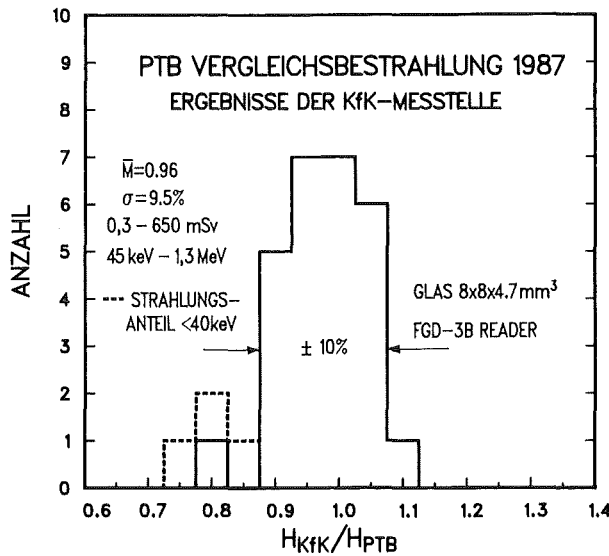


Abb. 9: PTB-Kontrollbestrahlung 1987: Auswertergebnisse für das Phosphatglas-Kugeldosimeter der KfK-Meßstelle für Festkörperdosimeter

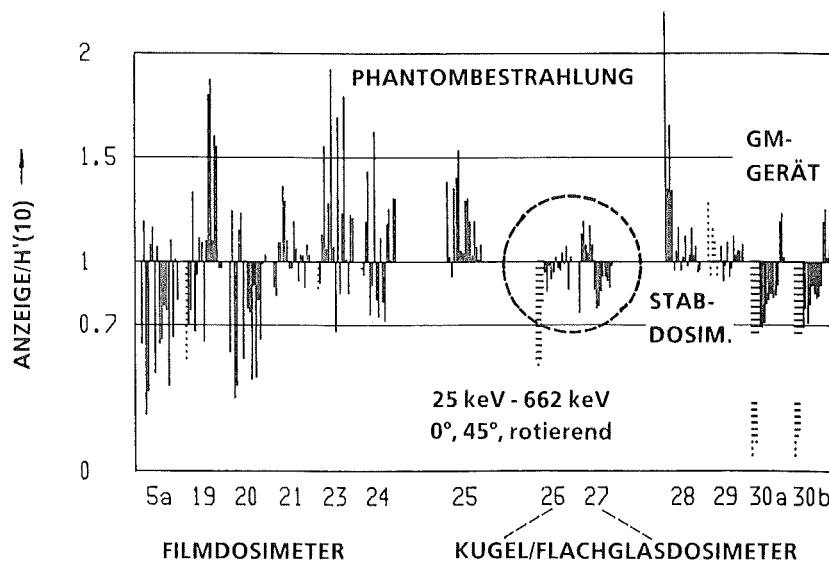


Jährliche Kontrollbestrahlungen bei der PTB, an der sich alle amtlichen Meßstellen beteiligen, überprüfen heute die Einhaltung der zulässigen Gesamtmeßunsicherheit. Im Vergleich zum Filmdosimeter zeigte das Glasdosimeter auch hier eine geringere maximale Streuung der Meßwerte gegenüber dem Sollwert [52]. Neuere Ergebnisse unserer nach Landesrecht zuständigen Meßstelle für Festkörperdosimeter ergaben eine Gesamtmeßunsicherheit von  $\pm 10\%$  (Vertrauensbereich 92% im Nenngebrauchsbereich der Photonenenergie oberhalb 45 keV) (Abb. 9).



Die Einführung neuer Meßgrößen, insbesondere der Richtungs-Äquivalentdosis  $H'(10)$  zur Überwachung des Grenzwertes der effektiven Äquivalentdosis  $H_E$ , erforderte in den letzten Jahren eine Neukalibrierung der Personendosimeter an der Oberfläche eines Phantoms und bei neueren Flachglasdosimetern [34-40] eine andere Optimierung des Energiekompensationsfilters bzw. des Auswerteverfahrens. Die in Abbildung 10 wiedergegebenen Ergebnisse einer erstmaligen AKD-PTB-Vergleichsbestrahlung am Phantom zeigten auch hier beim Phosphatglas-Kugeldosimeter und dem neuen Flachglasdosimeter eine gute Übereinstimmung zu den Sollwerten für verschiedene Photonenenergien und Strahleneinfallrichtungen [53]. Es zeigte sich, daß das Phosphatglaskugeldosimeter die neue Meßgröße  $H'(10)$  in der Personendosimetrie oberhalb einer Photonenenergie von 30 keV innerhalb  $\pm 20\%$  energie- und richtungsunabhängig anzeigt [58].

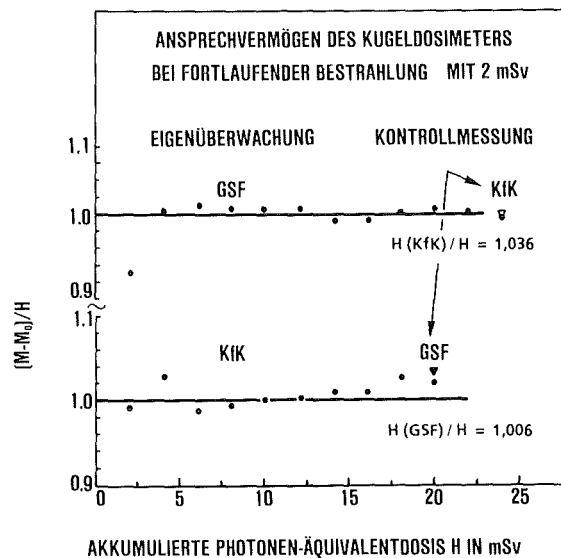
Abb. 10: AKD-PTB-Vergleichsbestrahlung 1985: Anzeige der Richtungs-Äquivalentdosis  $H'(10)$  für Personendosimeter am Phantom [53]



Abschließend soll auf die besonderen Einsatzmöglichkeiten des Phosphatglasdosimeters in der Personendosimetrie hingewiesen werden. Die heute empfohlene Kombination von amtlicher Personenüberwachung und Eigenüberwachung beruht auf den Meßmöglichkeiten der bisher eingesetzten Filmdosimeter bzw. Stabdosimeter. Ein Phosphatglasdosimeter mit automatischer Auswertung bietet grundsätzlich die Möglichkeit einer langzeitigen Personenüberwachung mit beispielsweise täglichen bzw. monatlichen Zwischenauswertungen beim Anwender und einer abschließenden Kontrollmessung bei der amtlichen Meßstelle. Zu welchen Meßunsicherheiten eine solche Kombinationsüberwachung mit demselben Dosimeter führt, zeigt Abbildung 11 am Ergebnis eines entsprechenden Laborversuches zwischen den Meßstellen der GSF, Neuherberg, und des KfK,

Karlsruhe [54]. Die nach wiederholten Bestrahlungen und Eigenauswertungen am Ende der Überwachungsperiode durchgeführte Kontrollmessung durch die jeweils unabhängige Meßstelle ergab eine bemerkenswert gute Meßwertübereinstimmung für den Mittelwert von zehn Messungen.

Abb. 11 GSF-KfK-Vergleichsmessung 1983: Änderung des Ansprechvermögens des Phosphatglas-Kugeldosimeters bei fortlaufender Dosisakkumulierung und Kontrollbestrahlung bei der unabhängigen Meßstelle für den Mittelwert von 10 Messungen [54]



### 2.3 Vergleich mit anderen Meßverfahren hinsichtlich Automatisierung

Vollautomatische TLD-Systeme, seit 1972 auf dem Markt und heute schon in dritter Generation erhältlich, bieten - abgesehen von systembedingten Fehlerquellen - in Verbindung mit einer elektronischen Datenverarbeitung eine nahezu optimale Lösung für die Routinedosimetrie. Auch in der Filmdosimetrie wurden in den letzten Jahren der Filmentwicklungsprozess, die densitometrische Messung der Filmschwärzung sowie das Öffnen der Filme schrittweise automatisiert.

Das Fehlen moderner Auswerteautomaten für Phosphatglasdosimeter führte dazu, daß das Photolumineszenzverfahren trotz seiner überzeugenden dosimetrischen Eigenschaften nicht in vergleichbarer Weise einsetzbar war.

So wurden beispielsweise bei der KfK-Meßstelle im Jahre 1963 etwa 2 000 Glasdosimeter und im Jahre 1987 54 000 amtliche Glasdosimeter ausgemessen.

Amtliche Meßstellen werten demgegenüber bis zu 90 000 Filmdosimeter pro Monat aus.

Tab. 2: Bereitstellung von Auswertegeräten für die Phosphatglasdosimetrie in der Routineüberwachung

1961	Toshiba-Auswertegerät FGD-3B und FD-1-Gläser
1962	Routinedosimetrie im KfK
1966	Umgebungsüberwachung im KfK
1967	Amtliche Personendosimetrie in der BRD
1967	Toshiba-Auswertegerät FGD-6
1972	Toshiba stellt Reader-Produktion ein
1972	Automatische Auswertung: <u>1. Versuch</u> (FH)
1978	Automatische Auswertung: <u>2. Versuch</u> (TT-Projekt KfK - Heist)
1984	Toshiba-Auswertegerät FGD-8 mit UV-Laser
1987	Automatische Auswertung: <u>3. Versuch</u> (TT-Zusammenarbeit KfK - Toshiba Glass)
1988	Toshiba FGD-10-Prototyp betriebsbereit

### 3 Automatische Auswertung

Es war bereits früh erkannt worden, daß erst die automatische Auswertung von Glasdosimetern die Vorteile des Meßverfahrens voll zur Geltung bringen wird. Zwei Versuche zur Automatisierung der Glasdosimetrie zu Beginn bzw. Ende der 70er Jahre [23, 55] scheiterten jedoch, bevor funktionsfähige Auswertegeräte fertiggestellt werden konnten (siehe auch Tabelle 2).

Grundsätzlich neue Gesichtspunkte ergaben sich in den 80er Jahren, als leistungsstarke Stickstofflaser auf den Markt kamen [41] und die Entwicklung eines automatischen Auswertesystems mit einem neuen Flachglasdosimeter [38] besonders aussichtsreich erschien. Innerhalb einer Technologie-Transfer-Zusammenarbeit zwischen KfK und Toshiba Glass wurde 1987/88 ein vollautomatisches Auswertesystem mit gepulster UV-Laseranregung entwickelt, welches die Nachteile des bisherigen Meßverfahrens, nämlich zu kleiner Photonenenergiebereich,

zu hohe Vordosis, Notwendigkeit einer Glasreinigung, Öffnen der Dosimeterkapselung von Hand, nicht mehr zeigt.

Abb. 12: Gepulste UV-Laseranregung und automatische Ausmessung des Flachglasdosimeters im Auswertegerät Toshiba FGD-10 [40]

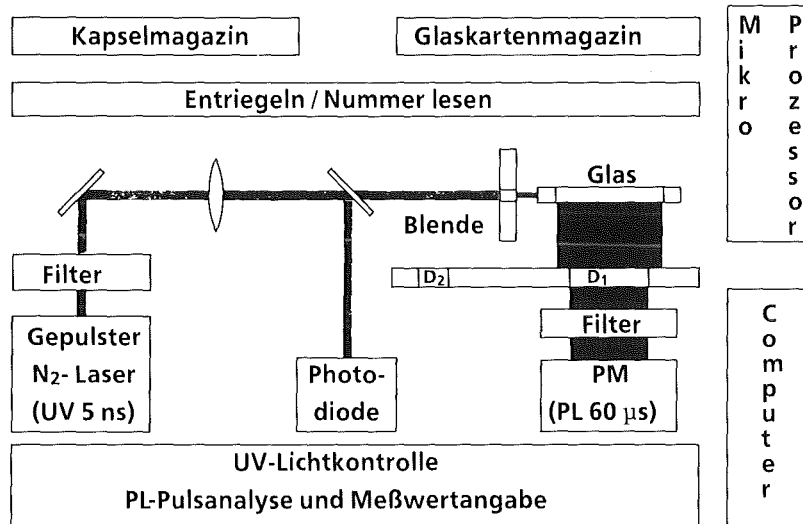
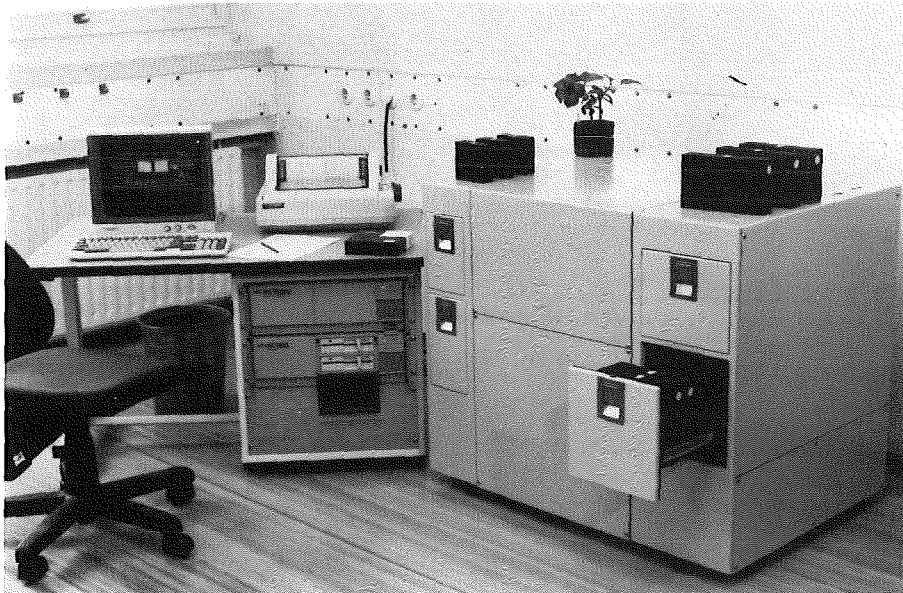


Abb. 13: Das vollautomatische Glasdosimeter-Auswertegerät Toshiba FGD-10

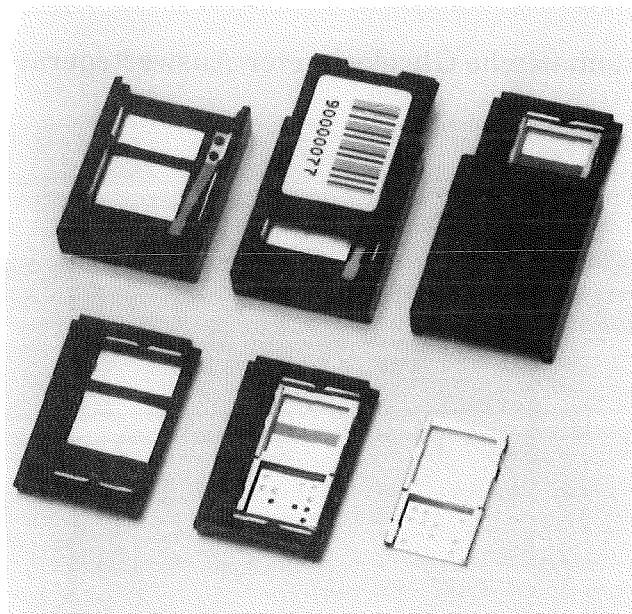


Das neue Toshiba Auswertegerät FGD-10 (Abbn. 12 und 13), als Prototyp zur Zeit im Testeinsatz, ermöglicht mit einem getrennten Kapsel- und Kartenglas magazin in Verbindung mit einer mikroprozessorgesteuerten Auswertung u. a.

- die Automatisierung von Kapselöffnung, Dosismessung, Austausch von hochdosisbestrahlten gegen gelöschte Glaskarten sowie der laufenden Kalibrierung,
- die kontinuierliche Magazinauswertung von 500 Dosimetern,
- die Speicherung der Personendaten für 10 000 Dosimeter bzw. Personen in einem On-line-Tischcomputer.

Das Flachglasdosimeter (Abb. 14), ausgestattet mit einem Barkode an der Außenseite der Kapselung und einem Lochkode an der Glaskarte, wird vor Öffnung der Kapsel automatisch entriegelt. Die beidseitig angeordneten Flachfilter aus 0,75 mm dickem Zinn und einem Plastikzwischenstück von 3 mm Breite werden zur Herabsetzung der Richtungsabhängigkeit durch seitliche Filter ergänzt.

Abb. 14: Flachglasdosimeter mit getrennter Kodierung von Kapsel und Glaskarte. Allseitige Abdeckung mit perforierten Zinnfiltern [40]



Das neue Flachglasdosimeter mit gepulster UV-Laseranregung bietet folgende dosimetrische Eigenschaften:

- Messung kleiner Dosen im Dosisbereich 0,01 - 0,1 mSv (Vordosis bei etwa 0,01 mSv),

- Energie- und Richtungsunabhängigkeit der Dosisanzeige für die Richtungs-Äquivalentdosis  $H'(10)$  oberhalb einer Photonenenergien von 10 keV innerhalb  $\pm 10\%$  für einen frontalen Strahlungseinfall bzw.  $\pm 30\%$  für einen Strahlungseinfall innerhalb eines Konus von  $60^\circ$  bzw. für die Photonen-Äquivalentdosis oberhalb 25 keV innerhalb von  $\pm 15\%$  (siehe Abb. 15),
- durch automatische Änderung der Blende vor dem Photomultiplier und zwei Messungen erhält man gleichzeitig
  - (a) die Anzeige der Strahlenqualität aus dem Meßwertverhältnis  $M_1/M_2$  (siehe auch Abb. 16),
  - (b) die Anzeige verschiedener Dosismessgrößen, insbesondere der Richtungs-Äquivalentdosis  $H'(10)$  an der Person oder der Photonenäquivalentdosis  $H_X$  frei in Luft,
  - (c) die Anzeige der effektiven Äquivalentdosis  $H_E$  sowie der interessierenden Organ-Äquivalentdosen bei Ganzkörperbestrahlung für Strahleneinfallrichtungen aus dem vorderen Halbraum (siehe auch Abbildung 16 und Tabelle 5),
- bei Überschreiten von Dosisgrenzwerten: Analyse der Dosisverteilung im Glasvolumen (Querprofil) hinsichtlich Strahlenqualität und Strahleneinfallrichtung (Körperdosisabschätzung),
- bei Messungen im Glasbereich unterhalb der Glasoberfläche könnte eine Strahlung geringer Eindringtiefe erkannt und bei neutronenempfindlichen Gläsern eine bessere Gammadiskriminierung erwartet werden.

Welche Vorteile zeigen Glasdosimeter gegenüber TLD-Systemen? Ein TLD-Detektor kann nur einmal ausgemessen werden, so daß zur Kontrolle des Meßwertes eine Registrierung und Datenspeicherung der Ausheizkurve erforderlich wird. Der Meßwert des Glasdosimeters kann durch eine Kontrollmessung überprüft werden. Außerdem kann die Meßwertlöschung bei  $400^\circ\text{C}$  zur Überprüfung des strahleninduzierten Meßwertbeitrages herangezogen werden.

Abb. 15: Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens des Flachglasdosimeters für die Anzeige der Richtungs-Äquivalentdosis  $H'(10)$  am Phantom und der Photonen-Äquivalentdosis  $H_x$  frei in Luft [40]

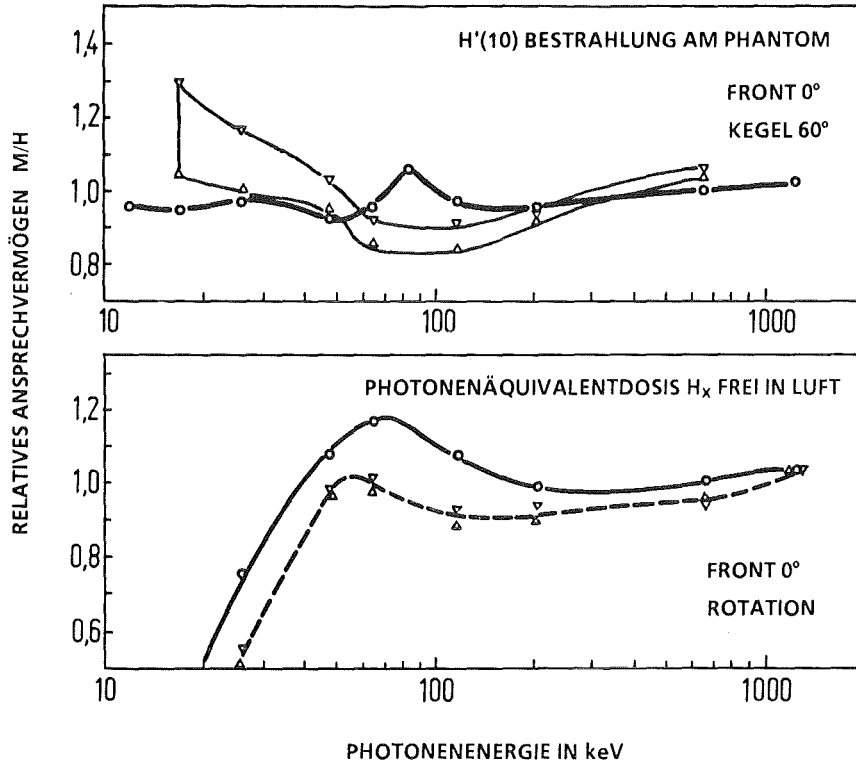
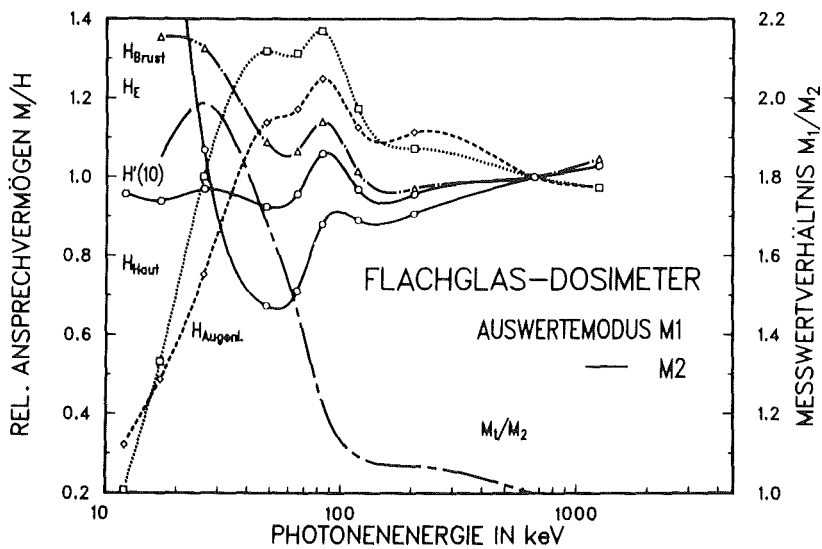


Abb. 16: Relatives Ansprechvermögen des Flachglasdosimeters für verschiedene Meßgrößen bei automatischer Auswertung im Toshiba FGD-10-Auswertegerät unter Verwendung des Auswertemodus M1 und M2 sowie für das Meßwertverhältnis  $M_1/M_2$  zur Anzeige einer Strahlenqualität in Abhängigkeit von der Photonenergie [59]



Tab. 3 vergleicht die dosimetrischen Eigenschaften des Flachglasdosimeters mit denen des bei KfK eingesetzten LiF-Dosimetriesystems Alnor hinsichtlich Dosisbereich, Chargenhomogenität des Ansprechvermögens und der Voranzeige, Energieabhängigkeit, Fading sowie Meßunsicherheit bei der Messung einer Monatsdosis von 110 µSv.

Tab. 3: Vergleich einer automatischen Auswertung von PL- und TL-Dosimetern im Toshiba FGD-10 und im Alnor-Dosacus-Meßsystem

Dosimetrische Eigenschaften	PLD-System (FGD-10)	TLD-System (LiF:Mg,Ti)
Dosisbereich (mSv-Sv)	0,03 - 10	0,03 - 1
Chargenhomogenität		
Ansprechvermögen	± 2 %	± 10 %
Vordosis (mSv)	(0,03 ± 0,02)	(0,06 ± 0,03)
Statistische Meßunsicherheit		
bei 110 µSv pro Monat (H <sub>nat</sub> + 50 µSv = 110 µSv)	± 5 %	± 10 %
Energieabhängigkeit		
H <sub>x</sub> frei in Luft	25 keV - 1,2 MeV ± 20 %	15 keV - 1,2 MeV ± 20 %
H'(10) am Phantom	10 keV - 1,2 MeV ± 10 %	20 keV - 1,2 MeV Faktor 2 <sup>1)</sup>
Fading bei 20° C	-10 %/10 Jahre	-20 %/1 Jahr

1) Ohne Energiekompensationsfilter

Wegen der besseren Langzeitstabilität von Glasdosimetern wird bei erhöhten Umgebungstemperaturen ein relativ geringeres Fading erwartet. Glasdosimeter sind die stabilsten Festkörperdosimeter, die nach 10 Jahren Lagerung bei 20 °C nur 10 % Fading zeigen [20]. Sie eignen sich daher wie kein anderes Dosimetriesystem zur Messung einer Jahresdosis, u. U. auch einer Lebensalterdosis, für die zur Zeit wieder Grenzwerte eingeführt wurden [56].



#### 4 Zukünftige Tendenzen der Personendosimetrie

Die Vorzüge der automatischen Auswertung sowie die verbesserten dosimetrischen Eigenschaften des Flachglasdosimeters werden dem Glasdosimeter neue Einsatzmöglichkeiten in der Personendosimetrie erschließen. Das Phosphatglasdosimetriesystem des Jahres 1988 könnte durchaus das Dosimetriesystem der Zukunft werden.

Eine solche Entwicklung wird heute durch erhöhte Anforderungen an die Strahlenschutzüberwachung begünstigt (siehe auch Tab. 4). Von Bedeutung sind hier die Messung kleiner Dosen innerhalb der Personenüberwachung sowie die Möglichkeit zusätzlicher Aussagen über die Strahlenexposition bei Verdacht auf Überschreiten der Grenzwerte.

So erfordert die Einführung einer Lebensalterdosis von 400 mSv die Überwachung eines Jahresgrenzwertes von 10 mSv bei Personen, die ihre Lebensalterdosis bereits erreicht haben. Ein Jahresgrenzwert von 10 mSv entspricht etwa dem doppelten Erwartungswert der natürlichen und zivilisatorischen Strahlenexposition, die sich im wesentlichen aus den Beiträgen der terrestrischen Strahlung (1 mSv), einer internen Strahlenexposition der Lunge durch Radon und deren Zerfallsprodukte (2 mSv) und der medizinischen Diagnostik (2 mSv) ergeben. Hinzu kommt die angekündigte Erhöhung der Qualitätsfaktoren durch die ICRP, die schon in England zu einem Grenzwert für die mittlere effektive Äquivalentdosis von 15 mSv pro Jahr führte [60].

Tab. 4: Überwachung des Grenzwertes von  $H_E$  in der Personendosimetrie

<i>Lebensalterdosis</i> $H_{E,max}$	400 mSv
<i>Jahresdosisgrenzwert</i> für $H_E$	
nach StrlSchV/RöV	50 mSv/a
bei Erreichen von $H_{E,max}$	10 mSv/a
<i>Betrag der natürlichen und zivilisatorischen Strahlenexposition</i>	5 mSv/a
<i>Personendosimetrie</i>	
Betrag der Gesamtmeßunsicherheit	
- derzeitige Anforderungen an Film- und Glasdosimeter 1)	0,4 mSv/Monat
- Flachglasdosimeter	0,1 mSv/Monat

1) zulässige Gesamtmeßunsicherheit für Kalibrierbestrahlungen und der kleinsten angezeigten Dosis von 0,2 mSv

Bei den zur Zeit eingesetzten, monatlich auszuwertenden Film- und Glasdosimetern beträgt die zulässige Gesamtmeßunsicherheit an der unteren Nachweisgrenze etwa 0,4 mSv pro Monat bzw. 2,5 mSv pro Jahr. Das neuentwickelte Phosphatglasdosimetriesystem würde diese Meßunsicherheit auf etwa 1/4 herabsetzen und damit berufliche Strahlenexpositionen von weniger als 0,5 mSv/a nachweisen.

Zur Abschätzung der Körperdosis sind andererseits zusätzliche Aussagen über die Strahlenexposition bei höheren Dosen wünschenswert. Bei Verdacht auf Überschreiten von Grenzwerten könnten nachmeßbare Angaben über Strahlenqualität, Einfallrichtung, Dosisverteilung im Glas, insbesondere aber die Direktanzeige der interessierenden Organ-Äquivalentdosen zur Ermittlung von Körperdosen herangezogen werden. Dies zeigen Abbildung 16 und Tabelle 5 am Beispiel des neuen Flachglasdosimeters für die Äquivalentdosen in den interessierenden Gewebeteilen und Organen [59].

Tab. 5: Direktanzeige der Äquivalentdosis in interessierenden Geweben bzw. Organen  $H_T$  mit dem Flachglasdosimeter im Toshiba FGD-10-Auswertegerät für frontale Strahleneinfallrichtung unter Verwendung eines konstanten gewebeabhängigen Konversionsfaktors

Gewebe/Organ T (Auswertemodus)	Konversionsfaktor $k_0 = [H_T/H'(10)_{Cs-137}]$	$E_{min}^{1)}$ (keV)
Augenlinse (M1)	1,12	23
Hoden (M2)	1,34	15
Brust (M1)	0,85	< 15
$H_E$ (M2)	0,71	23
Lunge (M2)	0,81	30
Haut (M1)	0,77	20
Ovarien (M2)	0,73	38
Rotes Knochenmark (M2)	0,42	45
$H'(10)$ (M1) bzw. (M2)	1,000	< 12

1) Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens oberhalb einer Photonenenergie  $E_{min}$  innerhalb  $\pm 30\%$  für  $H_T = k_0 \cdot H'(10)$

Die erhöhten Anforderungen an die Strahlenschutzüberwachung eröffnen dem Phosphatglasdosimetriesystem günstige Perspektiven auch im Hinblick auf TLD-Systeme mit vergleichbaren dosimetrischen Eigenschaften. Die erst in Verbindung mit einer automatischen Auswertung zur Geltung kommenden besonderen Eigenschaften des Photolumineszenzverfahrens werden dem neuen Dosimetriesystem zum längst erwarteten Durchbruch verhelfen.

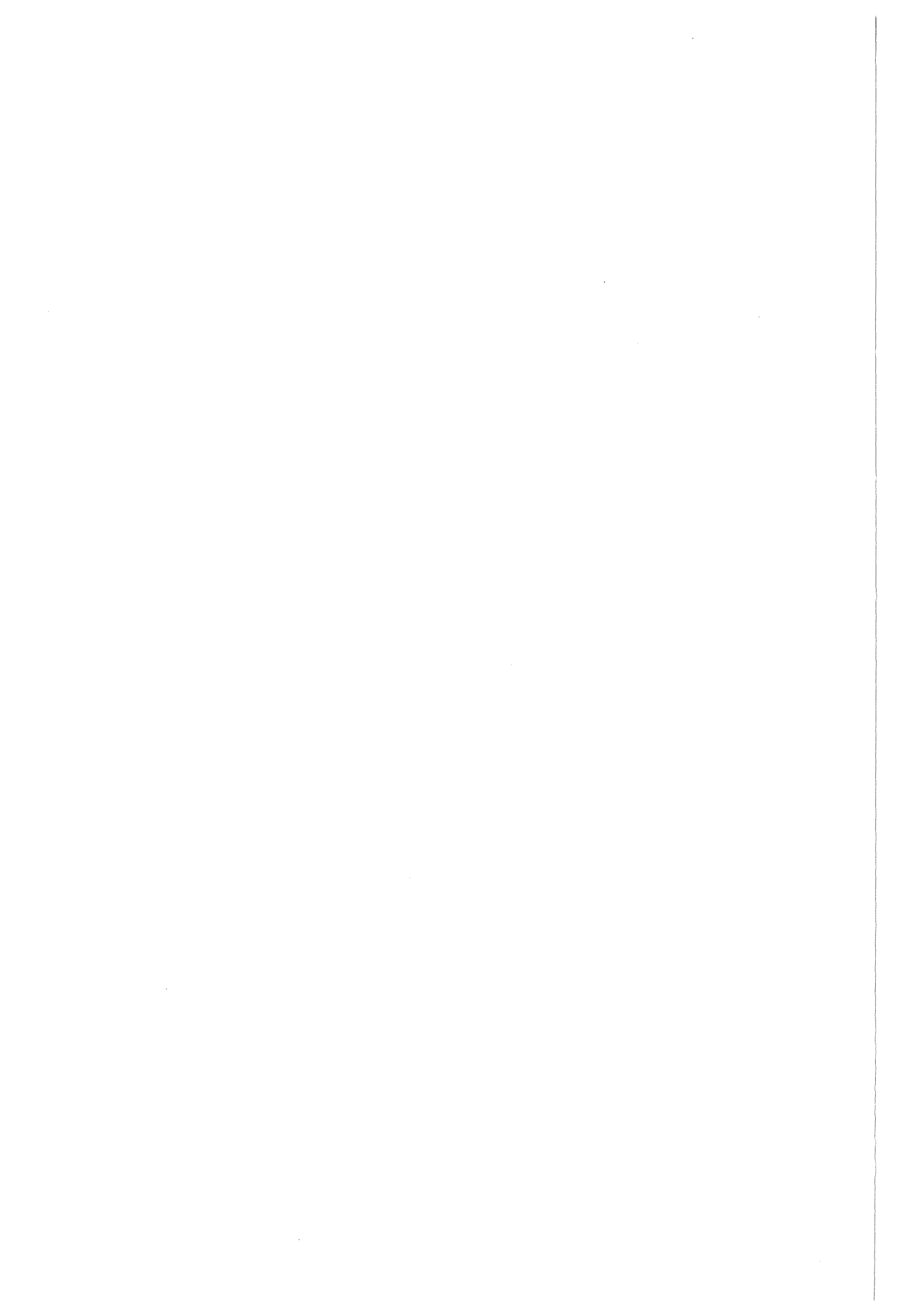
## 5 Literatur

- (1) Schulman, J. H., Shurcliff, W., Ginther, R. J., and Attix, F. H.; Radiophotoluminescence dosimetry system of the U.S. Navy, *Nucleonics* 11, No. 10, 52 (1953)
- (2) Ginther, R. J., and Schulman, J. H.; New glass dosimetry is less energy dependent, *Nucleonics* 18, No. 4, 92 (1960)
- (3) Yokota, R., Nakajima, S., and Sakai, E.; High sensitivity silver-activated phosphate glass for the simultaneous measurement of thermal neutrons,  $\gamma$ - and/or  $\beta$ -rays, *Health Phys.* 5, 219 (1961)
- (4) Becker, K.; Phosphatglasdosimeter für die Routineüberwachung in kerntechnischen Anlagen, *Nukleonik* 5, 154 (1963)
- (5) Piesch, E.; Die Verwendung von silberaktivierten Metaphosphatgläsern zur Bestimmung einer Personen- und Ortsdosis von Gamma- und Neutronenstrahlung, *Atompraxis* 10, 268 (1964)
- (6) Narrog, J., Pietsch, I., und Moser, E.; Die Ergebnisse von Kontrollbestrahlungen an Glas- und Filmdosimetern, *Atompraxis* 7, Direct Informat. 5/67 (1967)
- (7) Hardt, H. J., Heuser, J., und Rudloff, A.; Phosphatglasdosimetrie, *Atompraxis* 9, 45 (1963)
- (8) Becker, K.; A new dosimeter glass with improved properties, *Nucl. Instrum. Methods* 36, 323 (1965)
- (9) Piesch, E.; Eine neue Glasdosimeterkapselung zur energie- und richtungsunabhängigen Dosisbestimmung von Quantenstrahlung, *Direct Inform.* 17/64 (1964)
- (10) Maushart, R., and Piesch, E.; Phosphate glass dosimetry in nuclear installations, *Int. Symp. Lumin. Dosim.*, 1st, Stanford, Calif. CONF-650637 (1965)
- (11) Piesch, E.; Neutron dose measurements by means of Cerenkov effect in gamma and activation detectors, *IAEA Proc. Symp. Neutron Monit.*, Vienna, 471 (1967)
- (12) Becker, K.; Nuclear track registration in dosimeter glasses for neutron dosimetry in mixed radiation fields, *Health Phys.* 12, 769 (1966)
- (13) Piesch, E.; Improvements of track visualisation by using an interference contrast method, *Proc. Int. Conf. Track Registration*, Clermont-Ferrand, 143 (1969)
- (14) Piesch, E.; A concept of health physics dosimetry for quantum radiation, *Health Physics*, Vol. 13, 759 (1967)
- (15) Piesch, E.; The indication of absorbed dose in critical organs by energy independent personnel dosimeters, *Health Physics*, Vol. 15, 145 (1968)
- (16) Piesch, E.; Phosphate glass doseimeters for the measurement of organ doses with reduced body influence, *Proc. Int. Conf. Lum. Dosim.*, Gatlinburg, 783 (1968)

- (17) Kiefer, H., und Piesch, E.; Neue Methode zur Ermittlung der Strahlenqualität und der Strahleneinfallsrichtung mit Phosphatglasdosimetern, Atompraxis 11, Direct Inform. 10/67 (1967)
- (18) Kiefer, H., und Piesch, E.; Die Ermittlung der Strahlenqualität und der Dosis von Röntgenstrahlung über eine Tiefendosismessung in silberaktivierten Phosphatgläsern, Atompraxis 15, 19 (1969)
- (19) Kiefer, H., und Piesch, E.; Anwendung eines differentiellen Abtastverfahrens für Phosphatgläser in der Personendosimetrie? IRPA Congr., 2nd, Brighton. Health Phys. 19, 87, und KfK-1323 (1970)
- (20) Cheka, J. S.; Long-term stability of radiophotoluminescence in metaphosphate glass, Health Phys. 15, 363 (1968)
- (21) Regulla, D. F., Thermolumineszenzmessungen an Ag-dotierten Phosphatgläsern, Proc. 4. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Berlin, 482, (1969)
- (22) Doerfel, H.; Bestimmung der  $\gamma$ -Heizung in Schnellen Kritischen Anordnungen mit Phosphatgläsern, Diplomarbeit, Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik, Univ. Karlsruhe (1972)
- (23) Dade, M., Hoegl, A., and Maushart, R.; A RPL dosimetry system with fully automatic data evaluation, Proc. 3rd Int. Conf. Lumin. Dosim., Risö, 693 (1972)
- (24) König, W.; Entwicklung eines automatischen rechnergesteuerten Auswertegerätes für Radiophotolumineszenz-Dosimeter zur Beurteilung von Einfallsrichtung, Strahlenqualität und Dosis von Photonenstrahlung, Dissertation, KfK-2963 (1980)
- (25) Becker, K.; High gamma-dose response of recent silver-activated phosphate glasses, Health Phys. 11, 523 (1965)
- (26) Becker, K.; Recent progress in radiophotoluminescence dosimetry, Health Phys. 14, 17 (1968)
- (27) Jahn, W.; Dosimetrie mit Gläsern, Glastech. Ber. 42, 176 (1969)
- (28) Scharmer, K., und Eckert, H.-G.; FOEHN - das kritische Experiment für den Deutsch-Französischen Hochflußreaktor, KfK-1064, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe (1969)
- (29) Francois, H.; Radiophotoluminescence detectors, particle track detectors and liquid-filled ionization chambers. Proc. Reg. Semin. Asia Far East Radiat. Protect. Monit., Vienna, 343 (1969)
- (30) Yokota, R., and Nakajima, S.; Improved fluoroglass dosimeter as personnel monitoring dosimeter and microdosimeter, Health Phys. 11, 241 (1965)
- (31) Yokota, R., Muto, Y., Naoi, J. und Ymaji, I.; Silver-activated phosphate dosimeter glasses with low energy dependence and higher sensitivity, Health Phys. 20, 662 (1971)

- (32) Kastner, J., Eggenberger, D., Longnecker, A., King, D., and Schott, D.; UV laser excitation for ultra-sensitive photoluminescent dosimetry, *Solid State Chem. Radiat. Dosim. Med. Biol., Proc. Symp., Vienna*, 155 (1967)
- (33) Barthe, J., Blanc, D., Commanay, L., Tessier, J. L., and Francois, H.; On the fluorescence decay of silver-activated glass dosimeters, *Health Phys.* 18, 573 (1970)
- (34) Hillenkamp, F., and Regulla, D. F.; Laser pulse excitation of radiation induced photoluminescence in silver-activated phosphate glasses. *Proc. 3rd Int. Congr. Lumin. Dosim., Risö*, 718 (1972)
- (35) Dörger, G., Pitt, E., Scharmann, A.; An automatic Radiophotoluminescence Device using the UV Pulse Technique, *Proc. 5th Int. Conf. Lumin. Dosim., São Paulo*, 111-121 (1977)
- (36) Schneckenburger, H., Regulla, D., Unsöld, E.; Time-Resolved Investigations of Radiophotoluminescence in Metaphosphate Glass Dosimeters, *Appl. Phys. A26*, 23 (1981)
- (37) Röber, H. G., Burgkhardt, B., Piesch, E.; A new phosphate glass dosemeter system for automatic evaluation, *Nucl. Inst. Methods* 175, 131 (1980)
- (38) Burgkhardt, B., Röber, H.-G., Piesch, E.; Phosphate glass energy compensation filters for the measurement of operational dose quantities, *Rad. Prot. Dosim., Vol. 6, No. 1-4*, 287-289 (1983)
- (39) Piesch, E., Burgkhardt, B., Fischer, M., Röber, H.-G. and Ugi, S.; Properties of radiophotoluminescent glass dosemeter systems using pulsed laser UV excitation, *Rad. Prot. Dosim., Vol. 17*, 293-297 (1986)
- (40) Piesch, E., Burgkhardt, B., Vilgis, M., Omori, T. and Ikegami, M.; Automatic phosphate glass dosimetry system using pulsed UV laser evaluation, *7th IRPA Congress, Sydney* (1988)
- (41) Omori, T., Ikegami, T. und Ai, T.; Fluoro-Glass-Dosimeter Reader by N<sub>2</sub> Gas Laser Excitation, *Rad. Prot. Dosim., Vol. 17*, 297 (1986)
- (42) Kiefer, H., Maushart, R., und Piesch, E.; Erfahrungen mit Phosphatglasdosimetern zur Personendosimetrie, *Atompraxis* 11, 88 (1965)
- (43) Kiefer, H., Piesch, E.; Ergebnisse der mit Orts- und Personendosimetern bestimmten Jahresdosis im Kernforschungszentrum Karlsruhe. *Strahlentherapie* 138, 696 (1969)
- (44) Maushart, R., Piesch, E., and Winter, M.; Measurement of the local distribution of radiation dose in the environs of the Karlsruhe Nuclear Research Center with phosphate glass dosimeter. *Rep. KFK-551, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe* (1967)
- (45) Piesch, E. und Burgkhardt, B.; A Review of Environmental Monitoring Using Solid State Dosimeters, and Guidelines for Technical Procedures, *Rad. Prot. Dosim., Vol. 5, No. 2*, 79-94 (1983)
- (50) Piesch, E.; Intercomparison of results for film, glass and ionization chamber dosimeters worn together in routine personnel monitoring, *Proc. ENEA Symp. Radiat. Dose Meas., Stockholm*, 151 (1967)

- (51) Pitt, E., Schalch, D. and Scharmann, A.; Results of a Comparative Study on Different Personnel Dosimeters, Rad. Prot. Dosim., Vol. 17, 57-61 (1986)
- (52) Böhm, J., Buchholz, G.; Vergleichsmessungen mit amtlichen Personendosimetern (1979-1981), Bericht 16. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, Strahlenschutzmeßtechnik, München, GSF-Bericht A4/83 und FS-83-30-T (1983)
- (53) Böhm, J., Piesch, E., and Regulla, D.; Neue Meßgrößen für Personendosimeter - Ergebnisse des Vergleichsprogramms 1985 - Seminarbericht PTB-Dos-14, (1986)
- (54) Regulla, D., Piesch, E.; One-element personal dosimeter for local and centralized evaluation, 7th Int. Conf. on Solid State Dosimetry, Ottawa (1983)
- (55) Piesch, E., Burgkhardt, B., Röber, H.-G.; A Modern Automatic Read-out System for Phosphate Glass Dosimeters, Proc. 6th IRPA Congress Berlin, Vol. III, 1196 (1984)
- (56) Empfehlung der Strahlenschutzkommission zur Begrenzung der beruflichen Strahlenexposition, Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 8 (1988)
- (57) Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen vom 14.01.1987, BGBl. 1, Nr. 3 (RöV)
- (58) Burgkhardt, B., Vilgis, M., Schwarz, W. and Piesch, E.; Photon Energy and Angular Response of Individual Dosimeters for the Indication of the Directional Dose Equivalent  $H'(10)$ , Int. Seminar Operational Quantities, Braunschweig, Rad. Prot. Dosim. zur Veröffentlichung (1988)
- (59) Piesch, E., Burgkhardt, B. and Vilgis, M.; Can Individual Dosimeters for the Measurement of the Directional Dose Equivalent  $H'(10)$  Indicate Organ Dose Equivalents and the Effective Dose Equivalent? Int. Seminar Operational Quantities, Braunschweig, Rad. Prot. Dosim. zur Veröffentlichung (1988)
- (60) NRPB-GS 9, Interim Guidance on the Implications of Recent Revisions of Risk Estimates and the ICRP 1987 Como Statement (1987)



## **Current Radiological Protection Issues in the UK**

**R. H. Clarke**

**National Radiological Protection Board,**

**Chilton, UK**

### **Summary**

The recent re-evaluations of the risks of radiation from the revised Japanese dosimetry have led to recommendations in the UK for new controls on exposures to workers and members of the public. The reasons behind these recommendations by NRPB is explained.

Much of the concern over exposures of members of the public in the United Kingdom relates to the alleged high incidence of childhood leukaemia around operating nuclear plants. This issue will be described and the work of the Board in investigating the possible link with environmental radiation is outlined.

Finally, the Board has just published its analysis of the possible health effects of veterans of the UK atmospheric nuclear weapons tests in the 1950s and 1960s. The outcome of this study is presented with an analysis of the results.

I have chosen to speak on three live issues in the UK at present.

The first issue is the risk per unit dose figures and the position the Board has taken in its advice. This has implications primarily for doses to workers but also the public. Pursuing the question of the public, I want to review the situation with regard to leukaemia around large nuclear installations in the UK. Then I want to cover the long-term effects on the UK participants in UK atmospheric nuclear weapon tests.

I start off, therefore, with the question as to what are the estimates of the risk of fatal cancer following irradiation. As you well know, the dosimetry of the Japanese survivors has been re-assessed over the last six years, with the result that the risk factors derived are relatively insensitive to the assumed RBE of neutrons - RBEs between 1 and 20 or 30 make little difference to the results.



On the epidemiology side, there is an increased follow-up period now - data to 1985; there are corrections to the leukaemia data because early cases prior to setting up the Cohort Study in 1950 were probably missed (we know from the spondylitics that leukaemia appears within 1 or 2 years of irradiation); and some corrections have been made for mis-diagnosis.

These factors were taken into account in the paper by Preston and Pierce, used by ICRP as the basis of their Como Statement.

Table 1: Estimated lifetime risks (RBE = 10,  $10^4$  Sv<sup>-1</sup>)

	Basic risk	Low dose risks	ICRP
Leukaemia	120	40- 90	20
Non-leukaemia	1,620	540- 1,080	105

The basic risk of leukaemia amongst the Japanese is 6 times the ICRP 26 value. The leukaemia excess in the Japanese seems to be over - an absolute risk model appears to apply, so the leukaemia risk figures are based on deaths that have occurred. For other tumours, Preston and Pierce used a straight relative risk model which leads to very high estimates of risk - more than 10 times ICRP - although the tumours have yet to occur because a large proportion of the Japanese are still alive. This is the basis of much of the argument between different groups interpreting the results. We decided to concentrate first on leukaemia.

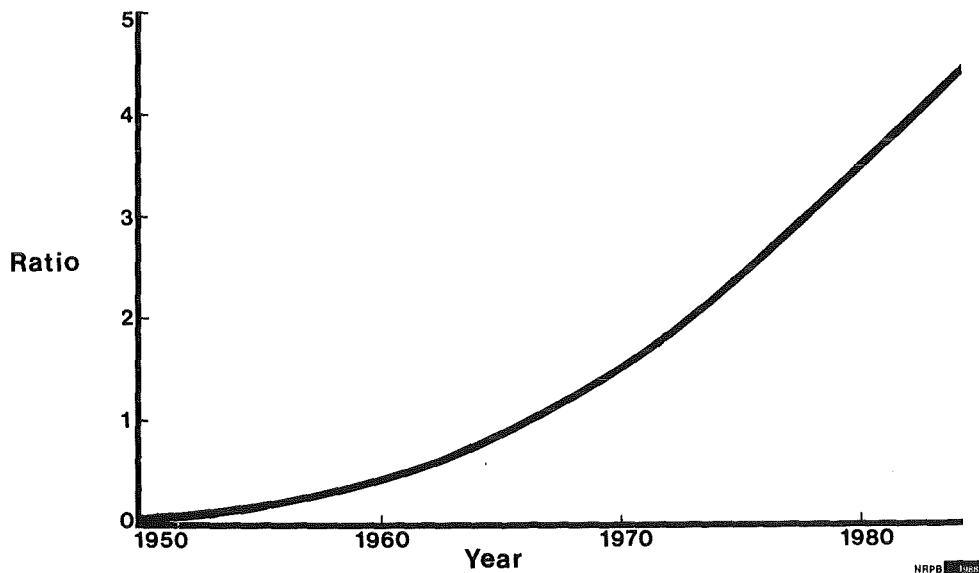
Preston and Pierce used a non-linear dose response argument to obtain low dose risk coefficients below the basic risk estimates. We are also aware that a case can be made, for low LET radiation, that in a range of animal experiments risks at low doses and low dose rates are lower than those at high dose and high dose rates. We concluded that a factor of between 2 and 3 might apply. In the last two weeks, the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) met and figures they derive for a population of all ages seems to support our conclusion.

Table 2: Population risk estimates ( $10^{-4}$  Gy $^{-1}$ )

	Additive	Multiplicative
Leukaemia	70	100
Other cancers	220	940
Total	300	1,040

We concluded that for protection purposes, leukaemia risk figures are likely to be at least 2 or 3 times higher than ICRP 26 figures, i.e.  $40$  to  $60 \times 10^{-4}$  Sv $^{-1}$ . We tried to avoid the argument over whether the relative risk model applies to all solid tumours by looking at the overall ratio of leukaemia to other cancers.

Fig. 1: Ratio of other cancers to leukaemia at Hiroshima and Nagasaki



There are some error bars, but the trend is clear. The ratio of other cancers to leukaemia in the early 1980s is about 4:1. The DS 86 sub-cohort - those from whom individual dose histories are now computed gives 3.4:1. You will recall from the last slide that a ratio greater than 10:1 could be seen if the relative risk model applies for all time. Data from the spondylitics, from the radiologists and others suggest ratios of between 3 and 5.5:1. Only the radiologists were followed to extinction and gave 4.3, but it was not whole body irradiation. We decided that perhaps a factor of 5 or 6 might apply.

Table 3: Fatal cancer risk estimates, mSv<sup>-1</sup>

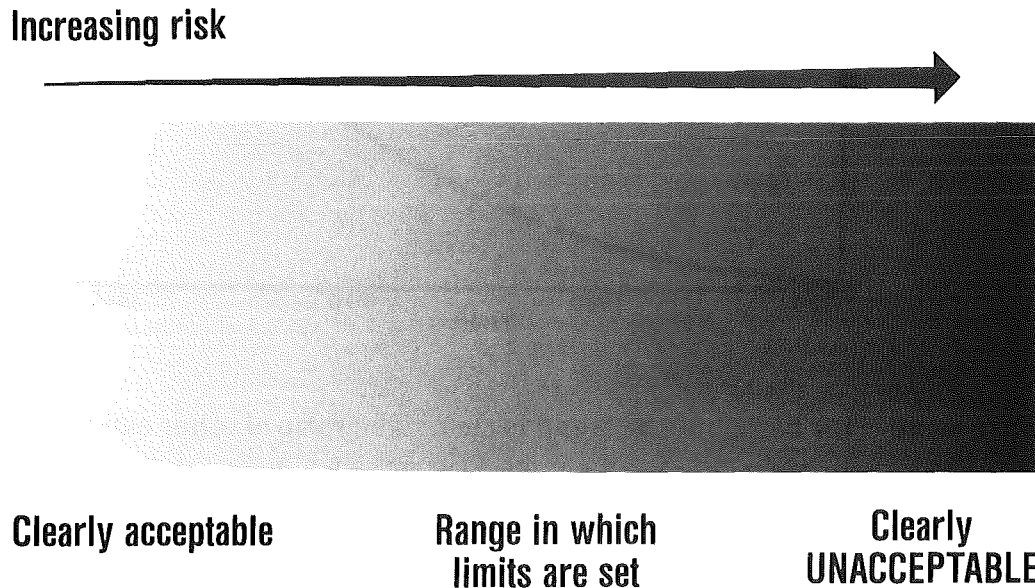
ICRP	(1977)	10 <sup>-5</sup> , 1 in 100,000
NRPB	(1987)	3x10 <sup>-5</sup> , 3 in 100,000

So if leukaemia is 40-60, say 50, other cancers are about 250-300, giving totals of 300-350, cf. the ICRP value of 125; hence our view that fatal cancer risk factors could rise by 2 or 3 and our rounding an average risk factor to 3x10<sup>-2</sup> per Sievert. We should note that hereditary risks which are not based on human data and are therefore unchanged, become less significant.

What are the implications for workers and the public?

Because we assume linearity of dose and risk, we are immediately into the argument of acceptable levels of risk. This is where there will be divergence of different interpretations of the implications.

Fig. 2: Acceptance of risk



For both workers and the public, a wide range of individual risk is accepted under different circumstances. In the UK, industrial fatal accident risks vary between a few 10<sup>-6</sup> per year in shops and offices to over 10<sup>-4</sup> per year in coal mining. These figures conceal the higher risk sub-groups that exist in these broad categories. Quarrying gives 4x10<sup>-4</sup> and deep sea fishermen on UK registered vessels are

$9 \times 10^{-4}$ . There is no simple, single dividing line to distinguish between risks which are clearly acceptable and those that are clearly unacceptable. There is a broad range within which the dose limit is set. The process of the management of risk, including setting dose limits, does not solely depend on the risk per unit dose, but is a complex procedure involving judgements on many factors.

The Board has deliberately not specified new dose limits. We have drawn to the attention of regulatory authorities the changes in risk, and advised them to start discussions with Trades Unions and Employers so that they can act relatively quickly when ICRP eventually makes its recommendations.

Table 4: Annual risk of occupational exposure at 50 mSv<sup>-1</sup>

Old risk estimate	$5 \times 10^{-4}$ , 1 in 2,000
New risk estimate	$1,5 \times 10^{-3}$ , 1 in 700

Meanwhile we point out that the risk associated with continuous exposure at the occupational dose limit of 50 mSv per year was 1 in 2000 per year and is now about 1 in 700 per year. To assess the significance of this, we have relied on the judgement of a Study Group of our Royal Society who, we think, probably have reflected society's current views on risk tolerability - nothing to do with nuclear matters specifically.

Table 5: Annual risk for workers (Royal Society Risk Report)

Unacceptable	$10^{-2}$ , 1 in 100
Acceptable	$10^{-3}$ , 1 in 1,000

The Study Group concluded that, for someone of normal life expectancy, a continuing risk of 1 in 100 per year was unacceptable - you would be almost certain to die from that cause. At 1 in 1000 per year, they thought the risk may not be totally unacceptable if the individual knows of the situation, enjoys some commensurate benefit, and everything reasonable has been done to reduce the risk. You will remember that our occupational risk for continued exposure at the dose limit is now greater than this 1 in 1000 figure.

Table 6: NRPB advice for workers

Annual average dose 15 mSv (Risk 1 in 2000)
--

Therefore as long as the legal dose limits remain at their present levels, we emphasise that it is even more important to keep all exposures as low as reasonably achievable, since continued exposure near the dose limits represents a level of risk which verges on the unacceptable. This, in fact, is similar to the view expressed by ICRP in the Como statement.

As far as occupational exposure is concerned, we consider it would be prudent to adopt some time-averaged restriction on individual doses. We feel that this should ensure that working practices are adjusted in a way that will accommodate any future reduction in dose limits. We recommend that for the most exposed groups of workers, individual exposures be so controlled as not to exceed an average dose of 15 mSv per year - a risk of 1 in 2000 per year for continuous exposure. This is the same maximum risk as previously and also corresponds to an "investigation level" in the UK Ionizing Radiations Regulations 1985.

We specifically did not say how this average should be achieved. This is because if we were too prescriptive - e.g. an age-related formula - it may have to be changed if ICRP recommends, perhaps, a lower dose limit in a few years time. I do note, however, NCRP has recommended  $10 \times \text{Age mSv}$ , and the German Federal Radiation Council has argued that limits be reduced partly because of increased risk factors and partly because German industry is twice as safe as 10 years ago. They conclude that the limit should be  $10 \text{ mSv a}^{-1}$ .

As I said before, our advice should be seen as giving an early warning to industry to give them time to take measures to reduce exposures in anticipation of some tightening from ICRP.

Table 7: Annual risks for the public (Royal Society Risk Report)

Unacceptable	$10^{-4}$ , 1 in 10,000
Probably acceptable	$10^{-5}$ , 1 in 100,000

What about members of the public? Again we turn to our Royal Society Study Group Risk Report whose judgement was that there is a widely held view that few people would commit their own resources to reduce an annual risk of death that was already as low as 1 in 100,000. If, however, there are grounds for suspecting a real risk, at an annual level of 1 in 10,000, they felt that the imposition of that risk is likely to be challenged.

It seems, therefore, that a reflection of the Society's present view is that an unacceptable imposed risk will be at an annual level between 1 in 10,000 and 1 in 100,000 per year.

Table 8: Annual risk of public exposure at 1 mSv y<sup>-1</sup>

Old risk estimate	$10^{-5}$ , 1 in 100,000
New risk estimate	$3 \times 10^{-5}$ , 1 in 33,000

We have previously recommended that, for practical purposes, the dose limit for members of the public should be 1 mSv per year and should be applied in all circumstances. Continued exposure at 1 mSv per year gave a risk of 1 in 100,000 per year on the old risk estimates and 3 in 100,000 per year on the new risk estimates.

This means that continued exposure at 1 mSv per year again probably verges on the unacceptable.

Table 9: NRPB advice for public

Annual dose 0.5 mSv for a single site (Risk 1 in 70,000)
---

The Board therefore advised regulatory departments that doses to the most highly exposed groups from effluent discharges should be so controlled as not to exceed 0.5 mSv per year for a single site. This should ensure that critical group doses are less than 1 mSv per year.

Both for workers and the public, the Board believes that because exposures will be kept as low as reasonably achievable, most doses will be well below the Board's target levels. We are not saying what is ALARA, we are setting upper limits to risk.

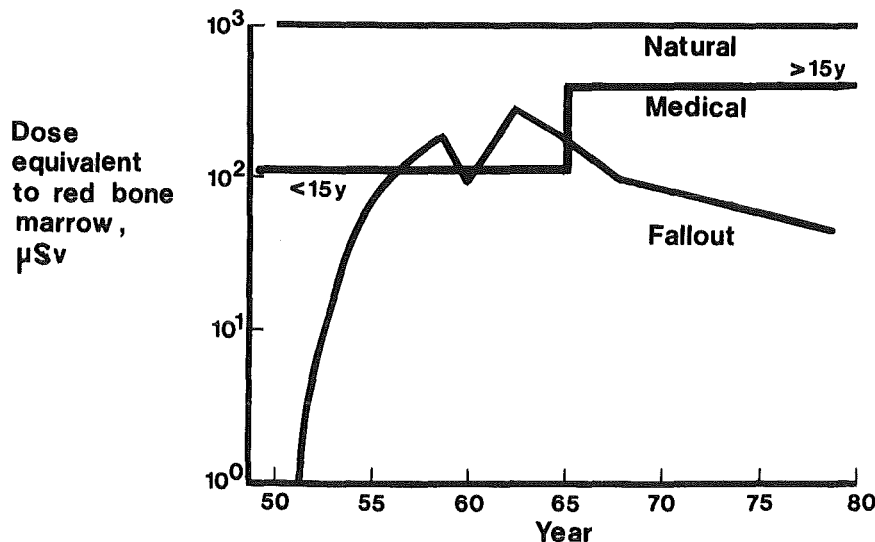
Of course, the main preoccupation with radiation in the environment in the last 4 or 5 years has been leukaemia clusters around nuclear sites.

Our work began in 1984, following television allegations of an excess incidence of childhood leukaemia at Seascale, close to the Sellafield reprocessing plant - some of you heard me talk about that previously. Let me remind you here, on a map of Great Britain, where Sellafield is.

No sooner than we had assessed doses to the children of Seascale, allegations were made of excess leukaemias in Thurso next to Dounreay fast reactor, and then of an excess near the Atomic Weapons Establishment at Aldermaston.

Starting with Seascale, we had to calculate doses and risks from all pathways, including natural radiation, medical and fallout sources

Fig. 3: Annual dose equivalent for children born in 1950



as well as from Sellafield discharges.

Fig. 4: Annual dose equivalent for children born in Seascale in 1950

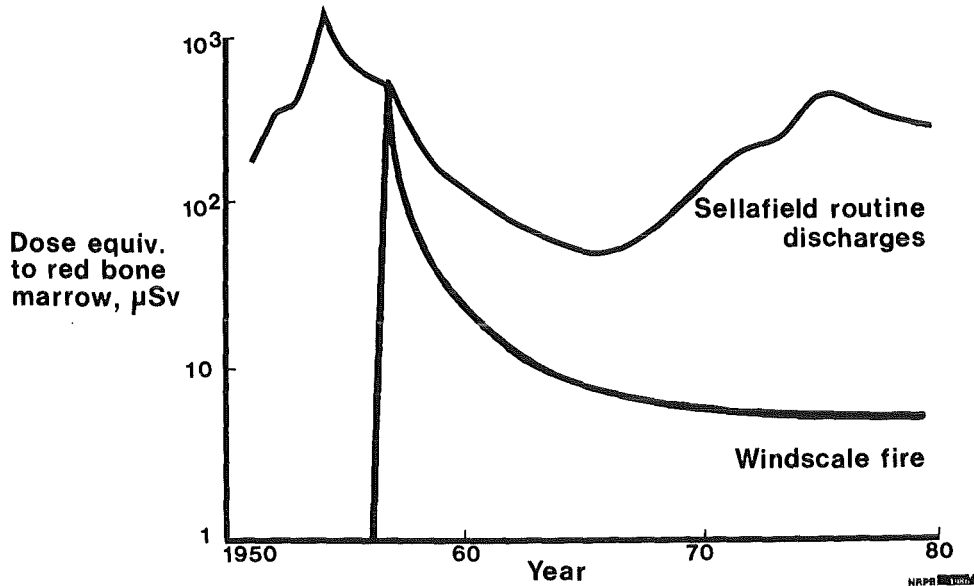


Table 10: Fatal leukaemias in Seascale children and young persons to age 20 (1945-1980)

Observed	4
Expected (UK national statistics)	0.5
Predicted - all radiation sources	0.1
Predicted - Sellafield discharges	0.016

Starting with Seascale, of the 4 fatal leukaemias in under 20-year olds, compared with 0.5 expected on national statistics, we predicted 0.1 from all radiation sources and 0.016 from Sellafield discharges. I do not want you to immediately increase the predicted figures because we have said risk factors are increasing. This is because we had anticipated this to some extent in our studies, and for children and the fetus we use risk factors up to 6 times the old ICRP figures.

The average risk to a child was estimated to be 1 in 75,000 and we do not believe our risk estimates were too far wrong because we currently predict 17% of all childhood leukaemias are due to natural background radiation - if it caused 100%, we still could not account for all the cases.



Table 11: Results of study

Number of radiation-induced leukaemias  
predicted in 1225 children and young persons  
in Seascale from Sellafield discharges  
to age 20 is 0.016

The average risk to an individual is about  
1 in 75,000

People therefore began looking at the dosimetry. There was a feeling that there must be a nuclide and a pathway we had missed. We had to investigate unusual pathways, e.g. measuring dose in houses for its activity content. We measured caesium in people in Seascale - finding levels below those we predicted; we found measurements that had been made on people in the 1950s and 1960s; we looked at environmental samples; and we looked at autopsy data. As these investigations eliminated hypothesis after hypothesis, people began to dismiss low LET radiation and ask more questions about plutonium and whether there had been greater releases than reported and whether the observed risks could be explained in terms of the RBE of  $\alpha$ -particles. We have therefore been looking more at plutonium.

The autopsy data are useful in showing the integrated intakes of plutonium, and the levels measured from people living around Seascale, not known to have been occupationally exposed, are of the order of 10s of mBq which corresponds to annual doses of the order of 20  $\mu$ Sv, depending on whether we look at marrow or liver. The individuals generally died of cardiovascular disease. In comparison with the predicted values, it is clear we overestimate contents in femur and liver and underestimate in lung and tracheobronchial lymph nodes. The reason is that Pu intakes are primarily by ingestion of local sea-foods - molluscs, and the estimated intake rates were probably too high for the individuals whose bones we have. For inhalation, we assume transportable forms of plutonium which, while maximising the marrow dose, underestimate lung and lymph node content.

So we began looking at the high LET component of doses and we see that they account for less than 10% of the risk in Seascale and most of that risk comes from naturally-occurring  $\alpha$ -emitters. The doses are low and confirmed by autopsy data and the next question was the RBE - it is well-known that RBEs of over 100 are found. Well, we must be careful about RBE because it is a ratio to low LET radiation for which the dose-response curve seems generally curvilinear.

For all fatal leukaemias in Seascale to be due to the high LET component would require a quality factor of 50,000 - far in excess of any reported RBE. There is no reason to suspect that the  $\alpha$ s from the natural nuclides have any different effect on cells than artificial, but there is the question of where the nuclides sensitive cells are, especially in the fetus.

A new light on the Seascale leukaemias is that of 1546 children born between 1950 and 1980 and who attended school in Seascale, but were not born there; there were no cases of leukaemia (0.8 expected). Of 1068 born in Seascale, 5 leukaemias were found, including 1 in an individual who had moved away. So the excess only appears in children born in Seascale.

As I said, while this was going on, there was the reported cluster of leukaemias in Thurso.

Table 11: Calculated radiation leukaemias in 4550 children born in Thurso 1950-1984

Source	Number
Dounreay	0.004
Sellafield	0.0009
Fallout	0.04
Medical	0.03
Natural	0.3

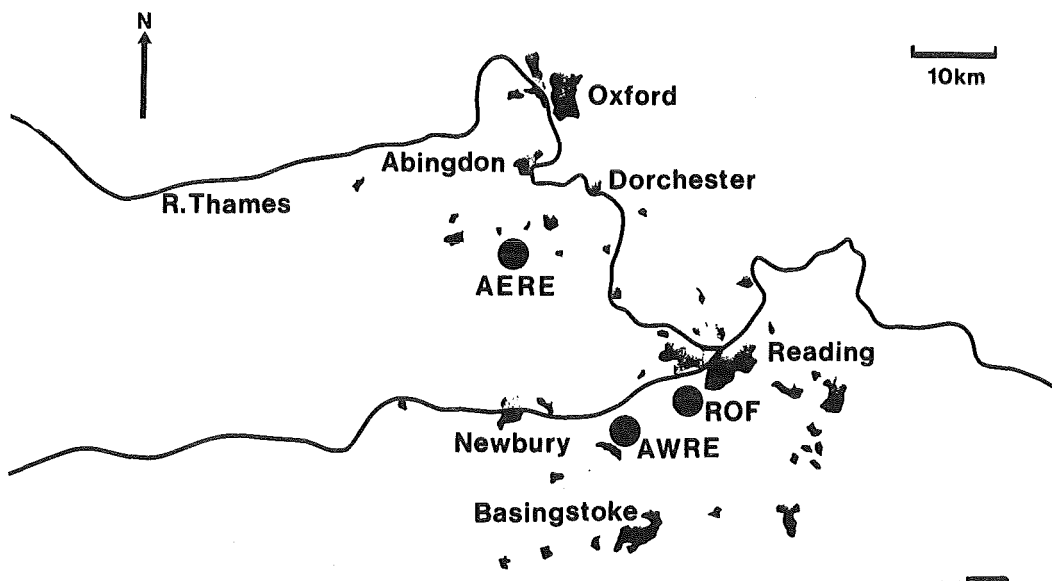
The Board was again asked to assess doses and risks, as had been done for Seascale. Here there was a 3 times larger child population so that natural background was predicted to give rise to 0.3 cases. In fact, 5 leukaemias were reported between 1979 and 1984 within 12.5 km of the plant, although I must say that the same author using different distances and time periods had previously published

showing no excess. The Dounreay contribution to total dose and risk is 1% compared with 16% at Seascale from Sellafield. Discharges from Dounreay were more than 10 times less than Sellafield.

So we have much reduced doses and an excess of leukaemia. Estimated dose equivalents from discharges are less than 10% of those from fallout and the high LET component from Dounreay discharges gives less than 10% of the dose from fallout - the same nuclide being principally responsible ( $^{239}\text{Pu}$  gives over 80% of Dounreay doses of high LET). So here we have the same nuclide in discharges and fallout and there was no wave of childhood leukaemias in the late 1960s, as might be expected from fallout if the theory that it was the high LET component in Sellafield discharges and Dounreay.

Then came Aldermaston and Burghfield.

Fig. 5: Locations of nuclear sites



Let us get the geography clear in our minds. Burghfield is on the outskirts of Reading, and Aldermaston is midway between the towns of Newbury, Reading and Basingstoke. Here the most marked excess of leukaemia for West Berkshire and North Hampshire was in the 0-4 year olds. You will note the goal-posts kept moving Seascale was under 20-year olds in a 30-year period; Dounreay excess

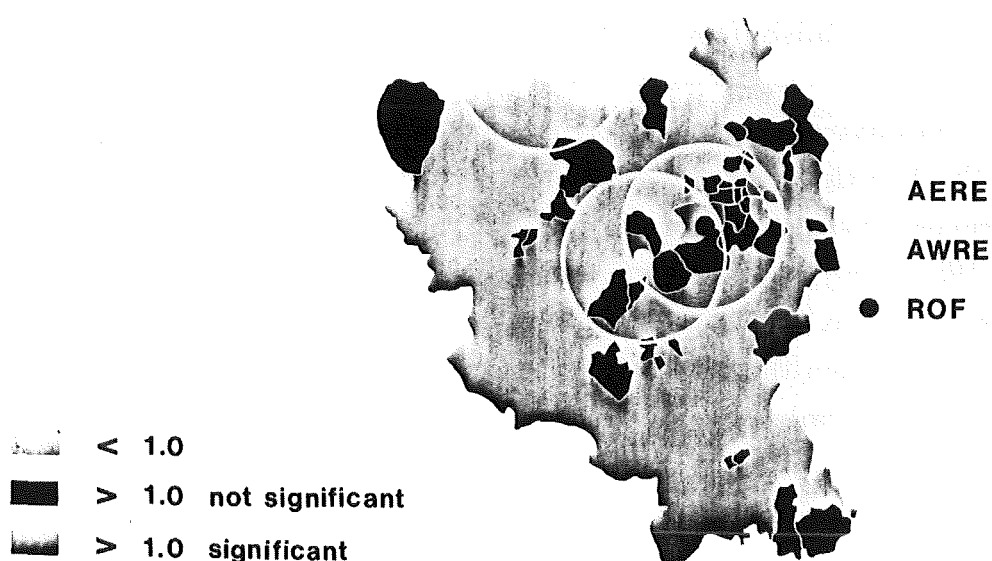
occurred more when restricting to 5 years 1979-1984 and choosing 12.5 km rather than 10 or 25. Now we have 0-4 years. We note the Oxford and Wessex region, which contains the Harwell establishment, did not have an excess.

I mention Harwell because atmospheric discharges from Harwell have been greater than from Aldermaston and Burghfield. In fact, Burghfield appears only to release  $^3\text{H}$ , and if you look in detail at doses from high and low LET radiation from the sites, you will see that doses from Burghfield discharges are minute, and comparing 1965 with 1980 and fallout with discharges, the risk from these sites is very small. At Aldermaston (dose at a few km) the doses from  $^{239}\text{Pu}$  discharges are a tiny fraction of fallout. If we look at the geographical incidence of childhood

Table 12: Comparison of doses to RBM for 1-year-old

Year	LET	AWRE	ROF	AERE	Fallout	Natural
1965	H ( $\mu\text{Gy}$ )	0.000009	-	0.00008	0.22	7.2
	L ( $\mu\text{Gy}$ )	0.005	-	0.6	250	840
	Total ( $\mu\text{Sv}$ )	0.005	-	0.6	260	990
1980	H ( $\mu\text{Gy}$ )	0.000005	0	0.0002	0.004	7.2
	L ( $\mu\text{Gy}$ )	0.01	0.000004	0.014	27	840
	Total ( $\mu\text{Sv}$ )	0.01	0.000004	0.018	27	990

Fig. 6: Leukaemia incidence ratios at ages 0-4



leukaemias by electoral wards. I have marked in yellow the wards where the incidence is greater than 1 but not statistically significant, and pink which is statistically significant. There were cases over the years 1972-1985 and yellow areas generally had 1 case, pink areas 2 cases. This was the basis for linking to Aldermaston. In fact, the pink areas are close to Burghfield -  $^3\text{H}$  discharges only and in the suburbs of Reading.

I think what this illustrates is that, while there are excesses of childhood leukaemias in the vicinity of the sites, it is difficult to see the connection with environmental radiation. The levels of discharge vary by many orders of magnitude, yet the leukaemia excess does not reflect these differences; it only varies by a small factor. When high LET radiation is especially considered, the natural nuclides give greater doses than discharges. If  $^{239}\text{Pu}$  is considered, doses from fallout are generally greater than from discharges other than at Seascale and there was not a surge of childhood leukaemias following the fallout deposition in the late 50s and early 60s.

Yet at Sellafield, the fact that the leukaemias are amongst those born there seems to point to something in childhood, and near Reading it was 0-4 year olds. It is possible we are missing something to do with irradiation of the fetus - location of cells at risk? Is there anything to do with parental exposure; certainly the fathers of all the Seascale cases worked at Sellafield. We have not yet found out if fathers of children in Thurso or Reading worked at Dounreay or Aldermaston, and if the children were born in those areas. We clearly need some more case control studies to establish if there is any link.

Radiation in the environment then brings me to discuss the results of the Board's study into the health of the UK participants in atmospheric nuclear weapons tests. The report has just been published and the story started with a TV programme in 1983 when MOD asked the Board to undertake the study as a result of concerns expressed by self-identified participants that the tests may have had some effect on their health. The study was not easy to carry out as no complete list of participants was available.

As a result of consulting well over 100,000 records of various kinds, and checking and cross-checking to eliminate errors, to explain discrepancies and to ensure no groups had been overlooked, some 22,000 individuals were identified as having participated. Because the servicemen were selected, young and fit, a straight

comparison with national statistics was not adequate so, in parallel, a control group needed to be set up which had a similar history of military service in the tropics, etc., but whose members had not been present at any weapons test.

Identification of Royal Navy participants proved to be simpler than the other Services because of ships ledgers which maintain records of crew. Army archives caused the most problems as no records had been kept to show who might have participated. However, Royal Engineers were mainly involved and systematic searches of their records proved possible, and together with Army personnel identified in ships records and various other "tricks", a list of participants was established.

I will gloss over the many problems the staff had in tracing individuals, but suffice it to say that 99.6% were traced to 1st January 1984.

Table 12: Observed deaths in participants and controls

	Test participants	Controls	Relative risk
Neoplasms	406	434	0.96
Other non-violent	828	854	1.00
Accidents/violence	321	291	1.07
Unknown	36	28	-
All causes	1,591	1,607	1.01

The observed deaths turned out to be similar in participants and controls - some 1600 had died by the cut-off date. The numbers who died of neoplasms, non-violent deaths (heart disease), accidents or unknown causes were all similar. So the first conclusion seems to be that participation in the tests has not had detectable effect on life expectancy or total probability of getting cancer so far.

When the authors looked at Standardised Mortality Ratios - which compare deaths with those in the general population - the SMR for all neoplasms was 80 - a demonstration of the "healthy worker" effect - and the controls were similar. Differences did arise when you looked at particular cancers and I list some interesting ones here.

Table 13: Standardised mortality ratios for neoplasms

	Test participants	Controls	Ratio
All	80	83	0.96
Leukaemia	113	32	3.45
Multiple myeloma	111	0	$\infty$
Prostate	76	188	0.38
Trachea, bronchus, lung	65	81	0.82

SMRs for leukaemia and multiple myeloma were significantly raised in the participants and exceptionally low in the controls, leading to an SMR ratio or relative risk that is 3.45 for leukaemia and infinite for multiple myeloma since there were no cases in the controls. I have included prostate because in the US tests and UKAEA studies, that was mentioned as occurring - it is not a problem here; I also note that apparently participants smoked less than the controls because the SMRs for lung cancer etc. are so much lower. So the second conclusion is that somehow there were small hazards of leukaemia and multiple myeloma, and the third is that participants smoked less.

This evidence relating to leukaemia and multiple myeloma is confusing. Some of the difference is likely to be due to a chance finding of unusually low levels in the controls.

However, the types of leukaemia found elevated are those which are elevated following high levels of radiation, and the chronic lymphatic leukaemias are nowhere near as in excess as the acute and chronic myeloids and acute lymphatic. The authors have undertaken quite a lot of detective work to see if they can see which subgroup, if any, the excesses occur in.

First, there seems no difference between the three Services.

Let us look at those known to have been exposed to radiation identified by MOD, employed by AWRE or directly involved in Maralinga - some 2314. Here the SMRs for all neoplasms and leukaemia are low - multiple myeloma is higher. There was no significant trend of leukaemia with increasing dose. The greatest number of individuals were those at a major test or directly involved in minor trials at Maralinga where Pu was dispersed in tests of weapons accidents (no fission explosion). In these 15,211, leukaemia was still less than average. Another

group of 1503 could be identified as men unlikely to have been exposed to more radiation than the general public. These were people who left before the explosion. Finally, some 5633 men were not in groups B or C, i.e. they were not present at a major test, nor were they involved in minor trials at Maralinga, but they could not be positively identified as unlikely to have received any dose at all. This group has the highest leukaemia incidence.

Table 1: SMRs for different test participants.

	Number	All neoplasms	Leukaemia	Multiple myeloma
A. Exposed	2,314	64	75	102
B. At test	15,211	76	95	78
C. Not exposed	1,503	90	78	0
D. Not in B or C	5,633	88	181	250
All participants	22,347	80	113	111

When we look at the relative risk between participants and controls, the highest levels are in the "other participants" group where the statistical significance is most marked. Multiple myelomas give infinite ratios except for group C which had no cases.

No features could be found in group D to identify why they may have had the highest relative risks. All three Services were represented and equal proportions had visited Christmas Island and Maralinga after the tests.

So where are we. Participants seem to exhibit more leukaemia and multiple myeloma than expected; the types of leukaemia are those associated with exposure to ionising radiation; yet the greatest excess came in those not present at major tests or trials; the distribution of leukaemias is not forward peaked in time, as would be expected after a dose of radiation. Other cancers show no particular features and inclusion of non-fatal cases made no difference to the conclusions. We think we have to continue the follow-up in another 10 years. We would expect another 30 leukaemias by then.



## Concluding Remarks

I have looked at three issues which at present are of great interest to the radiological protection community in the United Kingdom:

Revised estimates of the risk associated with radiation exposure

The clustering of childhood leukaemias near large nuclear installations

Health of the veterans of atmospheric testing of UK nuclear weapons

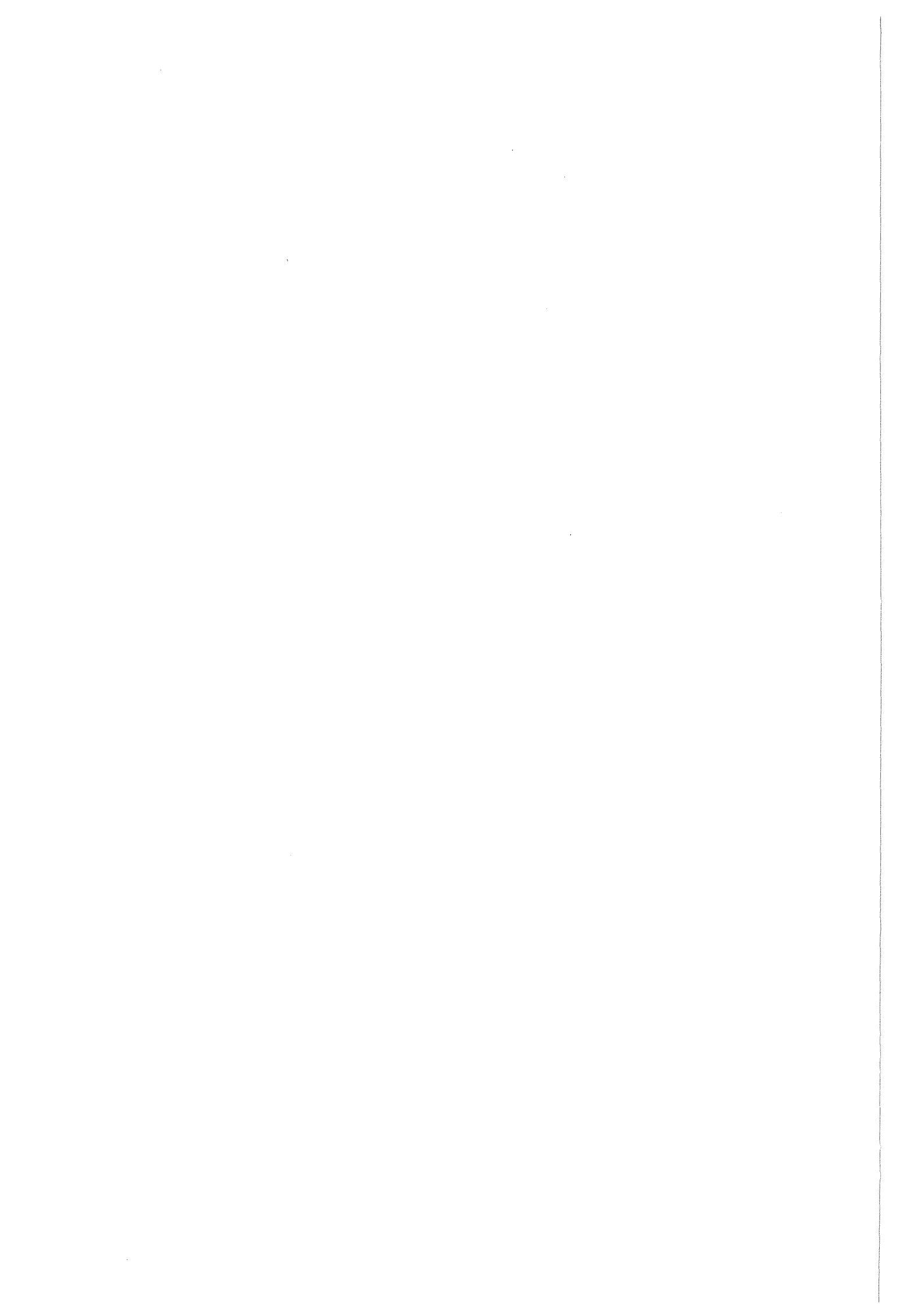
There is no doubt that the estimates of the risks following exposure to ionising radiation at high doses and high dose-rates are significantly higher than was previously thought. It is necessary, however, to make some estimate of risks at low doses and low dose-rates in order to set dose limits. The evidence that I have presented on the risks of leukaemia to the Japanese atomic bomb survivors indicates a necessity for considering some form of reduction in dose limits. We are currently consulting with employers and trade unions and have suggested an interim occupational dose averaging 15 mSv per year.

There have been several reports of clusters of childhood leukaemias around nuclear installations in the UK. I have demonstrated that comprehensive assessments of doses and risks undertaken by Board staff, which include environmental and human measurements, have failed to show how there could be a link between environmental radiation and these childhood leukaemias. There are still unresolved questions about irradiation of fetal tissues and whether parental irradiation has a role in the causation.

For the veterans of the atmospheric weapons tests, although generally the health of the veterans is better than that of the average population, again a small excess number of leukaemias is seen. We conclude that so far there does not seem to be any effect on overall health, but there seems to be something curious with leukaemia, especially since the cases mainly occurred amongst those not known to have been exposed to radiation.

A theme running through all of these issues has been the incidence of leukaemia. It is leukaemia that is reported around nuclear installations and amongst test veterans. More recently, there are claims that exposure to non-ionising electromagnetic fields also is a cause of childhood or even adult leukaemias. Perhaps instead of pursuing more and more dosimetry, we might study the disease of leu-

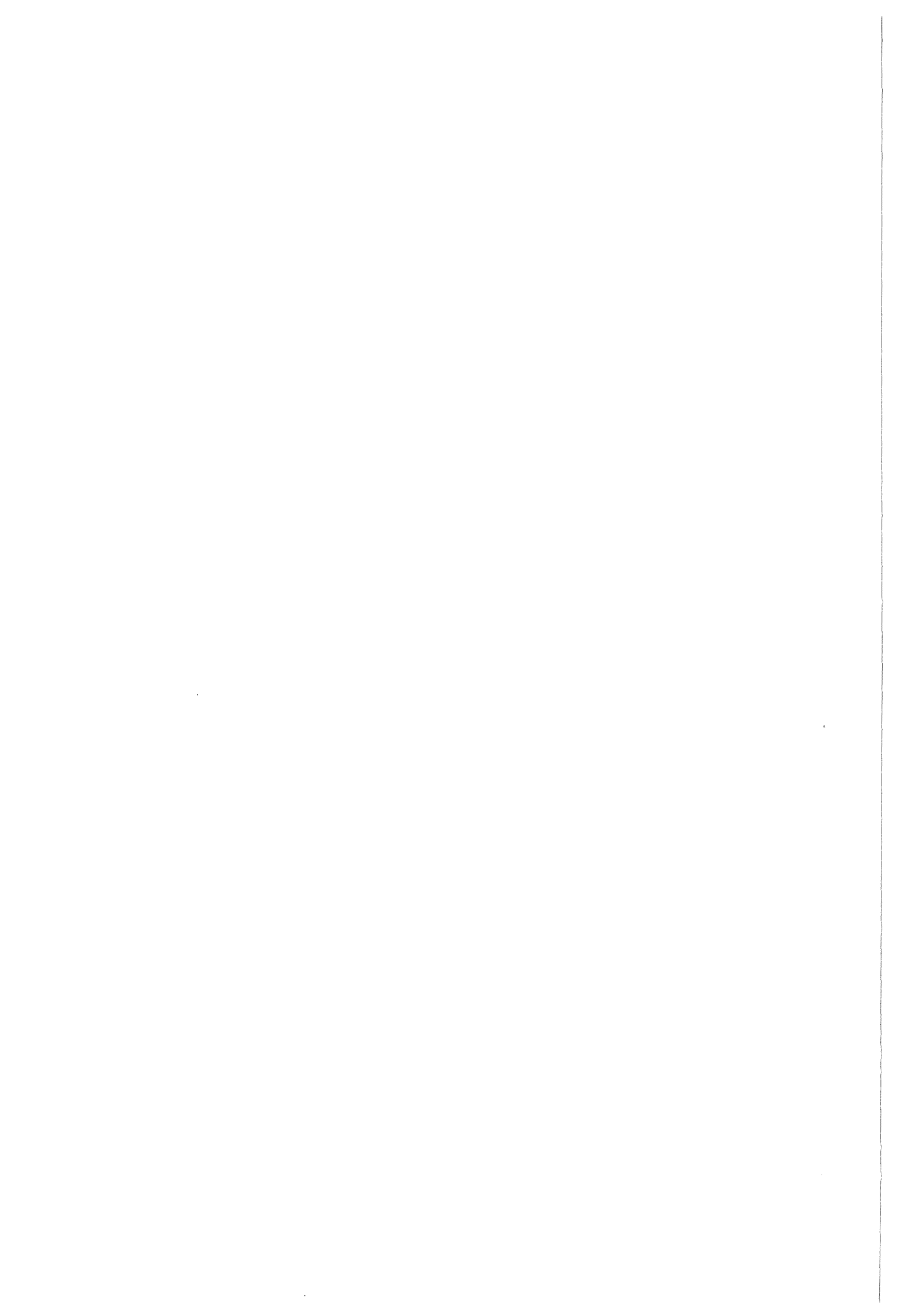
kaemia to see if a better understanding of that gives us a new interpretation of the leukaemias we see elsewhere, and are currently attributing to radiation, both ionising and non-ionising.



**Betrachtungen zum Strahlenkrebsrisiko:  
Epidemiologische Beobachtungen und Extrapolationsmodelle  
W. Jacobi**

**Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH  
Institut für Strahlenschutz**

Der Vortrag liegt nicht schriftlich vor



**Molekulare Basis der biologischen Strahlenwirkung**  
**H. Dertinger**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH**  
**Hauptabteilung Sicherheit/Biophysik**

Zusammenfassung

Im Laufe der Evolution hat die lebende Zelle zahlreiche Mechanismen entwickelt, die ihr einen wirksamen Schutz vor den Folgen einer Bestrahlung oder chemischen Schädigung des Erbgutes bieten. Zu diesen passiven und aktiven Prozessen gehören neben der Organisationsstruktur der genetischen Information (Chromosomen) vor allem spezifische und unspezifische Scavenger für freie Radikale, sowie aktive enzymatische Reparaturprozesse der DNA. Daneben hängt die Strahlenresistenz einer Zelle auch von ihrem Differenzierungszustand ab. Nach neueren Ergebnissen scheint die Strahlung auch das zelluläre Differenzierungsmuster zu beeinflussen.

Molecular Basis of Radiation Action

Summary

During evolution, the living cell has developed highly efficient mechanisms to cope with the consequences of radiation or drug induced genetic damage. Among these passive and active processes are redundancy and biological organization of genetic information (chromosomes or non-coding DNA regions), scavengers of free radicals, enzymatic repair of DNA, and intercellular communication. In addition, radio-resistivity of cells depends on their degree of differentiation. According to recent findings, radiation may also interfere with cellular differentiation via the membrane signal-transduction pathway.

## 1 Einleitung

Die molekulare Basis der Strahlenwirkung ist seit vielen Jahren Gegenstand intensiver Untersuchungen. Der Antrieb hierfür resultiert nicht nur aus dem Problem des biologischen Strahlenrisikos, sondern in hohem Maße auch aus der medizinischen Strahlenanwendung bei der Therapie bösartiger Tumoren. Handelt es sich beim Strahlenrisiko um die Erkenntnis der Wirkung kleiner Strahlendosen im Hinblick auf eine mögliche Erzeugung von Krebs oder genetischer Schädigungen, so steht bei der Strahlentherapie die absichtliche Zerstörung von malignem Gewebe und insbesondere die Ursache für die hohe Strahlenresistenz mancher Tumoren im Vordergrund des Interesses.

In diesem Beitrag werden die wichtigsten zellulären und molekularen Aspekte der Strahlenwirkung vorgestellt. Im Vordergrund des Interesses soll dabei die Frage stehen, über welche Prozesse die Zelle als kleinste biologisch autonome Funktionseinheit ihre Strahlenempfindlichkeit reduzieren kann. Obgleich ohne Zweifel die aus der Schädigung des Erbmoleküls DNA resultierenden, meist negativen Strahlenwirkungen von vorrangiger Bedeutung für den Strahlenschutz sind, wird im letzten Kapitel auch die nicht DNA-abhängige Wirkung von Strahlung angesprochen und damit die Brücke geschlagen zu möglicherweise bio-positiven Strahleneffekten.

## 2 Theoretische und tatsächliche Strahlenempfindlichkeit der Zelle

Bevor ich auf die molekularen Mechanismen eingehe, möchte ich zunächst einmal die Frage beantworten, woher wir überhaupt wissen, daß es solche Mechanismen gibt und in welchem Ausmaß sie die Zelle vor der Strahlung "schützen".

Hierbei gehen wir von der Erkenntnis aus, daß die DNA das für alle negativen Strahleneffekte wichtigste Zielmolekül der Strahlung ist. Biologische Schäden, wie reproduktiver Zelltod, genetische Veränderungen am Erbgut (Mutationen) oder die Umwandlung einer Zelle in eine Krebszelle (Transformation) lassen sich auf Treffer (Ionisationen) an der DNA zurückführen.

Die Beantwortung der gerade aufgeworfenen Frage nach der Existenz zellulärer Strahlenschutz-Mechanismen erfordert zunächst die Abschätzung der "theoretischen" Strahlenempfindlichkeit des DNA-Moleküls. Die für eine Primärioni-

sation auf der DNA nötige Energie beträgt im Mittel etwa 60 eV [Der 69]. Würde jedes 60-eV-Ereignis zum Reproduktivtod einer Zelle mit der DNA-Masse  $M$  (pg) führen, so läßt sich errechnen, daß hierfür im Mittel folgende Abtötungsdosis  $D$  (mSv) aufzuwenden wäre [Der 69]:

$$D \approx 9,6 / M$$

Bei Zugrundelegung einer DNA-Masse für eine menschliche Zelle von ca. 10 pg ergäbe dies eine mittlere Zell-Abtötungsdosis von etwa 1mSv.

Die aus experimentellen Dosis-Wirkungsbeziehungen für genetisch normale menschliche Zellen bestimmten Werte bewegen sich zwischen 1 und 2 Sv und liegen damit um den Faktor tausend über dem errechneten Wert. Demnach verfügt die Zelle über wirksame Faktoren und Mechanismen, die verhindern, daß das Gros der DNA-Defekte zur biologischen Wirkung gelangt. Gäbe es diese Mechanismen nicht, so müßten wir womöglich jede Röntgenaufnahme mit dem Leben bezahlen.

### 3 Zelluläre "Strahlenschutz-Faktoren"

Wir kennen heute eine Reihe passiver und aktiver Faktoren, von denen im folgenden jedoch nur die wichtigsten behandelt werden können.

#### a. Biologische Organisation der Erbinformation

Die obige Gleichung besagt, daß die Strahlenempfindlichkeit einer Zelle grundsätzlich mit steigendem DNA-Gehalt zunehmen sollte. Die stillschweigende Voraussetzung hierbei ist allerdings, daß die DNA genetisch homogen und zusammenhängend, d. h. nicht in kleinere unabhängige "Treffbereiche" fragmentiert ist. Dies trifft für höhere Lebewesen, bei denen die DNA auf einzelne Chromosomen verteilt ist, nicht zu.

Die Erkenntnis, daß die Art der biologischen Organisation einen Einfluß auf die Strahlenempfindlichkeit hat, geht aus Klassifizierungsversuchen hervor, die bereits in den sechziger Jahren unternommen wurden [Der 69]. Hierbei ergaben sich Gesetzmäßigkeiten zwischen der Strahlenempfindlichkeit und Parametern der genetischen Organisation wie Ploidie, sowie Chromosomen-Zahl bzw. -Volu-



men, die einen Anstieg der spezifischen zellulären Strahlenresistenz mit zunehmendem biologischen Organisationsgrad erkennen lassen. Aus heutiger Sicht könnte auch die Erkenntnis, daß ein großer Teil der menschlichen DNA keine erkennbare genetische Information besitzt, für die Strahlenresistenz einer Zelle von Bedeutung sein. Es erscheint einsichtig, daß Treffer in nicht-codierenden Bereichen der DNA biologisch wirkungslos bleiben.

b. Eliminierung (Scavenging) radiolytisch erzeugter Radikale

Eine weitere wesentliche Voraussetzung bei diesen Überlegungen ist, daß die Strahlenschäden durch direkte Ionisationen am DNA-Molekül entstehen. Grundsätzlich kann die Strahlenenergie jedoch auch in der Umgebung der DNA, insbesondere in Wassermolekülen absorbiert werden. Hierdurch kommt es über die Radiolyse des Wassers zur Bildung von sehr reaktionsfähigen freien Radikalen, insbesondere des Hydroxyl-Radikals (OH). In Anwesenheit von Sauerstoff entsteht außerdem das Superoxid-Radikal [Der 87]. Diese Radikale können nicht nur die DNA, sondern auch andere zelluläre Strukturen, insbesondere Membranen schädigen, falls diese ungeschützt in wäßriger Lösung bestrahlt werden.

Trotzdem ist ihr Beitrag zur DNA-abhängigen Strahlenschädigung einer Zelle wahrscheinlich gering [Der 69, Der 87], denn gerade infolge ihrer hohen Reaktivität ist die Wahrscheinlichkeit, von anderen Molekülen in der Zelle abgefangen zu werden, sehr groß. Besonders SH-Gruppen tragende Moleküle (Glutathion) sowie spezifische intrazelluläre Scavenger (z. B. die Superoxid-Dismutase für das Superoxid-Radikal) machen den überwiegenden Teil dieser Radikale unschädlich und unterbinden so in vivo die Schädigung wichtiger zellulärer Strukturen.

Ergänzend sei hierzu angemerkt, daß die in einer Zelle vorhandenen Scavenger sicher nicht spezifisch dazu dienen, die Zelle vor der Strahlung zu schützen. Radikalfänger ebenso wie DNA-Reparaturenzyme benötigt die Zelle auch im "strahlungsfreien Alltag", um sich z. B. gegen chemische Noxen und insbesondere gegen die Gefahren des Sauerstoffs und seiner aktivierten Folgeprodukte zu verteidigen [Der 87].

c. Enzymatische Reparatur von DNA-Schäden

Ein wichtiger Teilaspekt der zellulären Strahlenresistenz ist die enzymatische Reparatur von (Strahlen-)Schäden an der DNA. Bei der Fülle der auf diesem

Gebiet vorliegenden Ergebnisse kann im Rahmen dieses Beitrages allerdings nur global auf diese Problematik eingegangen werden.

Der oben angegebene Wert von 60 eV pro mittlerem Ionisationsereignis an der DNA darf nicht über die faktische Komplexität des physiko-chemischen DNA-Schädigungsmusters hinwegtäuschen. Bedingt durch die stochastische und unselektive Natur der Strahlenwirkung gibt es keinen einheitlichen DNA-Schadens-typ, sondern vielmehr ein komplexes Schadensspektrum. Die ionisierende Strahlung unterscheidet sich hier grundlegend von der UV-Strahlung oder DNA-schädigenden chemischen Agenzien, bei denen in der Regel definierte Substrate für die Reparaturenzyme vorliegen, etwa Addukte oder Vernetzungen.

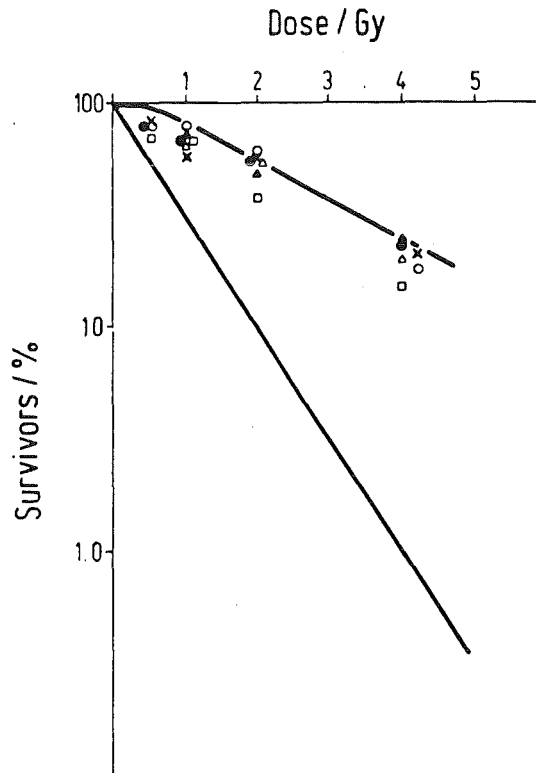
Man kann die DNA-Schäden nach Bestrahlung grob einteilen in Einzel- bzw. Doppelstrangbrüche der DNA-Doppelhelix, Basenschäden und Crosslinks, wobei innerhalb dieser Klassen eine erhebliche molekulare Inhomogenität vorliegt. Besonders eingehend ist die Enzymatik und Kinetik der Reparatur von Strangbrüchen untersucht, die sich in mehreren, zum Teil aufeinanderfolgenden Schritten vollzieht. Der einfache Ligations-Prozeß verläuft sehr rasch (Halbwertszeit wenige Minuten). Für die biologische Funktionsfähigkeit der reparierten DNA entscheidend sind Rekombinationsprozesse, bei denen es unter anderem zum Austausch beschädigter DNA-Abschnitte durch unbeschädigte Stücke kommt.

Es ist noch nicht endgültig geklärt, ob bei der Reparatur von Strahlenschäden Prozesse beteiligt sind, die, ähnlich wie bei der Einwirkung von UV oder chemischen Noxen, durch das Agens Strahlung selbst induziert werden, und, ebenso wie dort, fehlerhaft arbeiten (SOS-Funktionen).

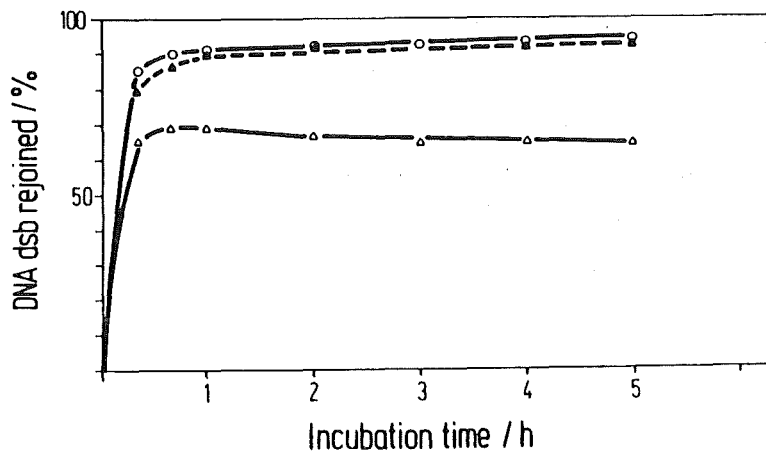
Die große Bedeutung der Reparaturprozesse wurde bei der Untersuchung von gewissen reparaturdefizienten Mutanten (z. B. bestimmte CHO-Mutanten) offen-bar, die eine hohe Strahlensensibilität zeigen. Durch Übertragung von DNA aus intakten Zellen revertieren diese mutierten Zellen wieder zum Normalzustand, d. h. sie gewinnen die Strahlenresistenz und das Reparaturvermögen des Wild-typs zurück (Abb. 1). Manche Mutanten (z. B. Ataxia Telangiectasia) weisen neben einer hohen Strahlensensibilität zugleich eine starke Tendenz zur mali-gnen Entartung auf.

Abb. 1: Überlebenskurven und DNA-Doppelstrangbruch-Reparatur von mutanten Zellen Chinesischer Hamster (CHO) nach  $\gamma$ -Bestrahlung [Wei 85].

a. Überlebenskurven (Kolonietest) für Wildtyp (flache Kurve), Mutante mit Reparatur-Defekt (steile Kurve) und verschiedene Clone (Revertanten), die nach Transfektion der Defekt-Mutante mit menschlicher DNA selektioniert wurden (Symbole).



b. Prozent reparierter Doppelstrangbrüche nach 100 Gy  $\gamma$ -Bestrahlung als Funktion der Reparaturzeit für Wildtyp (offene Kreise), Defekt-Mutante (offene Dreiecke) und Revertante (ausgefüllte Symbole, gestrichelte Linie)

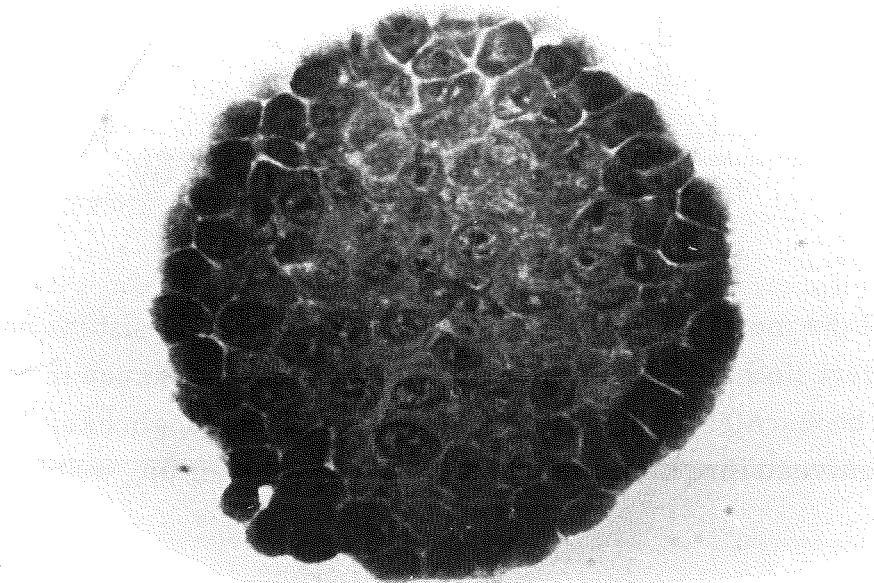


d. Interzelluläre Kommunikation bei gewebemäßiger Zellorganisation

Die überwiegend an kultivierten Zellen gewonnenen Ergebnisse über die zelluläre Strahlenempfindlichkeit erlauben nicht ohne weiteres eine Aussage darüber, wie sich eine Zelle verhält, wenn sie zum Zeitpunkt der Bestrahlung Bestandteil eines differenzierten Gewebes ist. Der Grund liegt in der Tatsache, daß herkömmliche Zellkulturen entweder überhaupt keine gewebsmäßige Zellorganisation erlauben (Einzelzell-Suspensionskulturen), oder die Fähigkeit somatischer Zellen zur Bildung eines Gewebes nur unzureichend unterstützen (zweidimensionale Zellanordnung in einem Monolayer). In den meisten praktischen Bestrahlungssituationen konstituieren die exponierten Zellen ein Gewebe bzw. Organ. Sowohl für den Strahlenschutz wie auch für die Strahlentherapie ist deshalb die Kenntnis der "realen" Strahlenempfindlichkeit einer Zelle im Gewebeverband von unmittelbarer Bedeutung.

Um den Gewebeeinfluß auf die zelluläre Strahlenempfindlichkeit zu studieren, verwenden wir seit einigen Jahren dreidimensional kultivierte Zellen, sogenannte Multizell-Sphäroide. Abbildung 2 zeigt, zur Illustration, das histologische Schnittbild eines Sphäroiden aus Zellen eines menschlichen Cervix-Carcinoms.

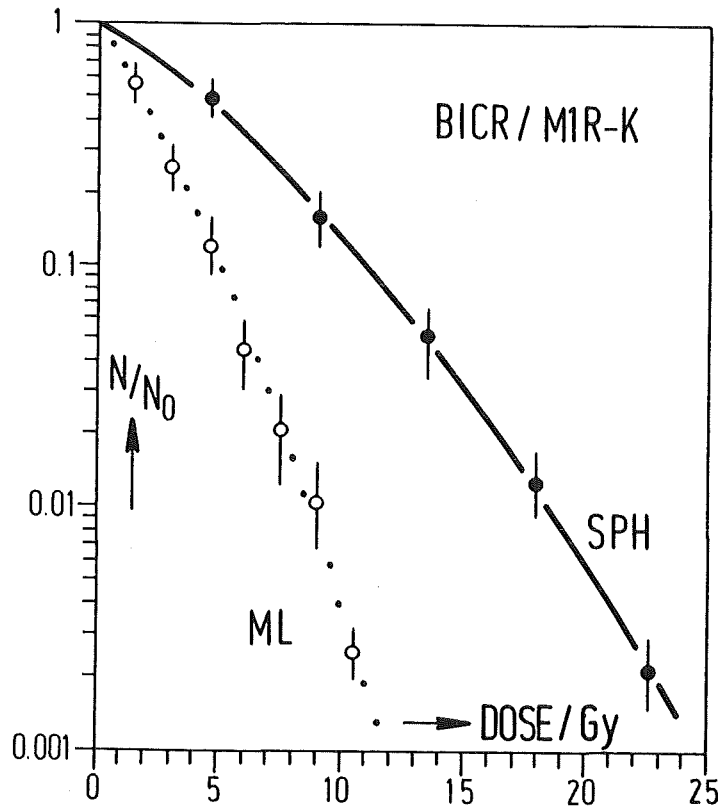
Abb. 2 Mikrotom-Schnittbild eines HELA-Zellsphäroiden von ca. 0,3 mm Durchmesser



Bestrahlt man Zellen sowohl als Monolayer als auch als Sphäroide, so beobachtet man in vielen Fällen eine erhebliche Zunahme der zellulären Strahlen-

resistenz in Sphäroiden gegenüber dem Monolayer (Abb. 3). Diese als "Kontakt-Resistenz" bezeichnete Strahlenresistenz ist - darauf deuten neuere Untersuchungen in unserem Labor hin - wahrscheinlich die Folge eines zellulären Differenzierungsprozesses. Hierfür spricht, daß diese Art von Strahlenresistenz nur dann beobachtet wird, wenn die Zellen die Fähigkeit zur direkten interzellulären Kommunikation über die sogenannten Gap Junctions besitzen [Der 81, Der 84/1]. Dieses interzelluläre Porensystem spielt bekanntermaßen eine fundamentale Rolle bei der Gewebe-Differenzierung [Der 84/1].

Abb. 3 Überlebenskurven (Kolonietest) von Monolayern (ML) und Sphäroiden (SPH)  $\gamma$ -bestrahlter Ratten-Carcinomzellen.



Obwohl die molekularen Mechanismen der Kontakt-Resistenz noch nicht völlig aufgeklärt sind, so dokumentiert dieses Phänomen, das auch in soliden Tumoren *in vivo* beobachtet wird [Der 84/2], eine zusätzliche Möglichkeit für die Zelle, auf Gewebeniveau ihre Empfindlichkeit gegenüber Strahlung weiter zu reduzieren.

#### 4 Nicht-DNA-abhängige Strahlenwirkungen

Auch wenn das "Dogma" der Strahlenbiologie, wonach die DNA das wichtigste kritische Strahlentarget ist, auf gesicherten Erkenntnissen fußt, so kann nicht ausgeschlossen werden, daß es auch Strahlenwirkungen gibt, die nicht durch Treffer in der DNA verursacht werden. Als derartiger Strahleneffekt muß beispielsweise die kürzlich beobachtete vorübergehende Erhöhung (Verdoppelung) der intrazellulären Synthese von cyclischem Adenosin-Monophosphat (cAMP), unmittelbar nach der Bestrahlung von kultivierten Zellen mit einer Dosis von nur 0,15 Sv, gewertet werden [Rae 83]. Hierbei ist besonders bemerkenswert, daß über eine Dosis, bei der sich experimentell keine genetischen Wirkungen (z. B. Mutationen oder Chromosomen-Aberrationen) mehr nachweisen lassen, ein starkes biochemisches Signal induziert wird.

Beim cAMP handelt es sich um einen sog. sekundären zellulären Botenstoff, der über eine Kette von teilweise bekannten Reaktionen Zellfunktionen (z. B. Teilungsaktivität und die Aktivität bestimmter Enzyme) und damit das Differenzierungsmuster einer Zelle ändert. Die besondere Bedeutung dieses Befundes liegt in der Tatsache, daß die Synthese des cAMP an der Innenseite der Zellmembran erfolgt. Die Strahlung bewirkt hier also einen ähnlichen Effekt, wie er bei der Wechselwirkung von beta-adrenergischen Hormonen mit spezifischen Rezeptoren auf der Zellmembran auftritt.

Auch wenn über die Art der Wechselwirkung von Strahlung mit der Zellmembran zur Zeit kaum mehr als spekuliert werden kann, so läßt dieser Befund erahnen, daß die Bestrahlung grundsätzlich einen hormonähnlichen Differenzierungsprozeß in der Zelle auslösen kann. Obwohl das auf diese Weise induzierte spezifische Differenzierungsmuster von einer Reihe zusätzlicher Faktoren und nicht zuletzt vom Typus der bestrahlten Zelle abhängt, so müssen die Konsequenzen für die Zelle keineswegs negativ sein, ebensowenig wie dies bei Hormonwirkungen der Fall ist. Es erscheint deshalb gerechtfertigt, in diesem möglichen "Differenzierungsdruck" kleiner Strahlendosen eine der Ursachen für sogenannte "bio-positive" Strahlenwirkungen (Radiation Hormesis) zu sehen.

## 5 Schlußbemerkungen

In den ersten vier Kapiteln wurde offenkundig, daß genetisch normale Zellen über höchst wirksame Mechanismen zur Eliminierung von DNA-Schäden und zur Erhöhung der Strahlenresistenz verfügen. Die Ergebnisse des letzten Kapitels belegen jedoch, daß dies nur ein Aspekt der biologischen Strahlenwirkung ist. Einen nicht minder wichtigen und interessanten Gesichtspunkt markieren die Konsequenzen der Strahlenwirkung im Bereich der Zellmembran. Vor dem Hintergrund der cAMP-Befunde erscheint grundsätzlich eine verstärkte Erforschung der Strahlenwirkung auf diesen sogenannten zellulären Signal-Transduktionspfad wünschenswert. Da bekannt ist, daß beispielsweise das cAMP-Signal auch den Zellkern (DNA) erreicht, so lassen sich hieraus weitreichende Konsequenzen für die Zellfunktion erwarten. Ähnliches gilt wahrscheinlich auch für die Auswirkungen der interzellulären Kommunikation.

Dieser Sektor der Strahlenwirkung ist hinsichtlich seiner Folgen für die Zelle grundsätzlich verschieden von dem biologischen Wirkungsspektrum, das aus der direkten Schädigung der DNA resultiert und stellt ohne Zweifel eine wichtige Ergänzung unseres Wissens über die biologische Strahlenwirkung dar.

## 6 Literatur

- [Der 69] H. Dertinger, H. Jung; "Molekulare Strahlenbiologie", Springer-Verlag Heidelberg (1969)
- [Der 87] H. Dertinger, W. Bors; KfK-Nachr. 19 (1987), 223
- [Wei 85] K. F. Weibezahn, H. Lohrer, P. Herrlich; Mutat. Res. 145 (1985), 177
- [Der 81] H. Dertinger, D. Hülser; Radiat. Environm. Biophys. 19 (1981), 101
- [Der 84] H. Dertinger, D. Hülser; Recent Results in Cancer Res. 95, (1984), 67
- [Der 84] H. Dertinger, M. Guichard, E. P. Malaise; Eur. J. Cancer, Clin. Oncol. 20 (1984), 561
- [Rae 83] B. A. Raev, Y. Y. Chirkov, J. M. Parkhomenko; Experientia 39 (1983), 1310

## **Zur in vivo-Messung von Transuranen**

**Hans-R. Doerfel**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH**

**Hauptabteilung Sicherheit/Dosimetrie**

### **Zusammenfassung**

Die Entwicklung von Verfahren zur in vivo Messung von Transuranen begann im Kernforschungszentrum Karlsruhe vor nahezu 30 Jahren mit dem Bau von hochempfindlichen Teilkörperzählern. Anfangs wurden Großflächenproportionalzähler mit speziellen Antikoinzidenztechniken verwendet, später Phoswich-Detektoren. Auf der Basis der gewonnenen Erfahrungen wird zur Zeit eine neuer Teilkörperzähler mit Germanium-Teleskopdetektoren entwickelt. Das Ziel dieser Entwicklung ist der direkte Nachweis der Transurane in den dosisrelevanten Körperbereichen bzw. die direkte Bestimmung der resultierenden Körperdosis.

### **In Vivo Measurement of Transuranium Radionuclides**

#### **Summary**

In the Karlsruhe Nuclear Research Centre the development of techniques for in vivo detection of transuranium radionuclides started about 30 years ago with the construction of high sensitive partial body counters. At first large area proportional counters with special anticoincidence techniques were used, later they were replaced by phoswich detectors. Based on experiences collected in the last years a new partial body counter is now under construction using Germanium telescope detectors. Objective of developments is the direct assessment of transuranium body burdens in the dose relevant tissues and the direct estimation of resulting doses, respectively.



## 1 Einleitung

Der berufliche Umgang mit Transuranen stellt außerordentlich hohe Anforderungen an den Strahlenschutz. Einerseits handelt es sich bei den meisten Transuranen um Alpha-Strahler mit sehr hoher Radiotoxizität, andererseits sind gerade diese Isotope im Körper nur sehr schwer nachweisbar. Die hohe Radiotoxizität beruht in erster Linie darauf, daß inkorporierte Transurane zum Teil über Jahrzehnte an der Knochenoberfläche abgelagert werden und dort infolge der Alpha-Strahlung eine hohe lokale Strahlenexposition bewirken. So führt beispielsweise eine Aktivitätsdeposition von nur 1 Bq Pu-239 im Skelett zu einer langfristigen Knochendosis von etwa 1 mSv pro Jahr. Beim Umgang mit Transuranen müssen daher besondere Schutzmaßnahmen getroffen werden, damit Inkorporationen jeglicher Art vermieden werden. Außerdem müssen hochempfindliche Meßverfahren bereitgestellt werden, damit im Fall von zwischenfallsbedingten Inkorporationen auch sehr geringe Aktivitätsdepositionen im Körper nachgewiesen werden können.

Zur Inkorporationsüberwachung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Man kann die Aktivität direkt im Körper messen (in vivo Messung), man kann sie aber auch bereits vor dem Eintritt in den Körper messen (Raumluft- bzw. Atemluftüberwachung) oder nach dem Austritt aus dem Körper (Ausscheidungsmessung). Die in vivo Messung der Transurane basiert auf dem Nachweis der den Alpha-Zerfall begleitenden charakteristischen Röntgenstrahlung, während bei den anderen beiden Meßverfahren die Alpha-Strahlung direkt gemessen werden kann. Aus diesem Grund ist die in vivo Messung der Transurane im allgemeinen nicht so empfindlich wie die Ausscheidungsmessung oder die Raumlufmessung. Die in vivo Messung hat allerdings gegenüber den beiden anderen Verfahren den entscheidenden Vorteil, daß die Aktivität direkt im Körper gemessen wird und daher auch eine unmittelbare Abschätzung der zu erwartenden Körperdosis möglich ist.

## 2 Meßverfahren

Die Meßverfahren orientieren sich hauptsächlich an den beiden Isotopen Pu-239 und Am-241. Plutonium-239 emittiert - wie auch die meisten anderen Plutonium-Isotope und die wichtigsten Curium- und Californium-Isotope - außer der charakteristischen Röntgenstrahlung keine hinreichend intensive Photonenstrahlung.

Plutonium-239 nimmt allerdings eine gewisse Sonderstellung ein, da die Intensität der charakteristischen Röntgenstrahlung bei diesem Isotop vergleichsweise gering ist. Aus diesem Grund gehört Pu-239 zu den am schwierigsten zu messenden Transuranen. Americium-241 gehört dagegen zu den wenigen Transuranen, die außer der charakteristischen Röntgenstrahlung auch eine relativ intensive Gamma-Strahlung emittieren und daher vergleichsweise einfach zu messen sind. Die beiden Isotope Pu-239 und Am-241 stellen folglich zwei Extremfälle dar, die den Rahmen für die in vivo Messung aller Transurane abstecken.

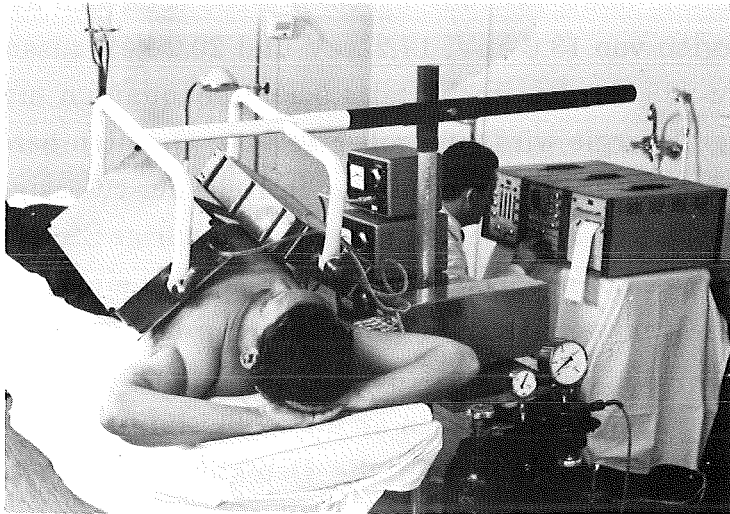
Die charakteristische Röntgenstrahlung von Pu-239 setzt sich aus drei Komponenten mit Energien von 13,6 keV, 17,2 keV und 20,2 keV zusammen. Bei 100 Zerfällen von Pu-239 werden im Mittel 4,5 Röntgenquanten erzeugt. Bedingt durch die niedrige Energie wird ein großer Teil der Quanten bereits im Körper absorbiert, so daß selbst bei Inkorporationen in Höhe der zulässigen Grenzwerte außerhalb des Körpers im allgemeinen nur extrem niedrige Strahlenintensitäten nachgewiesen werden können. So tritt beispielsweise bei einem Pu-239-Lungen-depot in Höhe des Grenzwertes von 600 Bq (Lung burden) nur ein Röntgenquant pro Minute durch eine Fläche von 100 cm<sup>2</sup> im Bereich des Thorax. Hieraus ergeben sich sehr hohe Anforderungen an die Meßtechnik. Zum einen muß man zum Nachweis dieser Strahlung spezielle Detektorsysteme benutzen, die im Energiebereich der Röntgenstrahlung von Plutonium einen möglichst hohen Wirkungsgrad und gleichzeitig einen extrem niedrigen Nulleffekt haben. Zum anderen muß man mit diesen Detektorsystemen so nahe wie möglich an die Aktivitätsdeposition im Körper herangehen, das heißt man muß gezielte Teilkörpermessungen durchführen.

## 2.1 Proportionalzähler

Die Entwicklung von Detektorsystemen zur in vivo Messung von Plutonium begann im Kernforschungszentrum vor etwa 30 Jahren. Bereits im Jahre 1961 wurde von Kiefer und Maushart der erste Plutonium-Teilkörperzähler vorgestellt /1/. Hierbei handelte es sich um eine kastenförmige Anordnung von vier flachen quadratischen Proportionalzählern. An der Stirnseite des Kastens befand sich eine Öffnung von 12 cm x 12 cm, in die der Arm der zu untersuchenden Person eingeführt werden konnte. Zur Reduzierung des Nulleffekts waren die Zähler außen von vier Antikoinzidenz-Schutzzählern umgeben. Nach Kalibrierung der Detektoranordnung mit einem Arm-Phantom aus Plexiglas ergab sich

eine untere Nachweisgrenze von 0,74 kBq Pu-239 in den Armknochen. Dies entspricht nach heutigen Kenntnissen einer Aktivität von etwa 7,5 kBq Pu-239 im Gesamtskelett. Gemessen an den Grenzwerten war die Meßanordnung demnach relativ unempfindlich, in der Konzeption war sie jedoch ihrer Zeit weit voraus, da sie die Plutoniumaktivität unmittelbar im dosisrelevanten Gewebe - nämlich im Skelett -- erfassen konnte.

Abb. 1: Der erste KfK-Lungenzähler zur in vivo Messung von Plutonium mit dreistufigen Großflächenproportionalzählern



In den folgenden Jahren ging man im Kernforschungszentrum dazu über, die Plutoniumaktivität am Eintrittsort - nämlich in der Lunge - zu messen. Dort ist die Aktivität noch auf einen relativ kleinen Bereich begrenzt, so daß prinzipiell eine wesentlich höhere Meßempfindlichkeit erzielt werden kann. Im Jahr 1964 wurde der erste von Kiefer und Maushart im Kernforschungszentrum entwickelte Plutonium-Lungenzähler (Abb. 1) vorgestellt [2]. Hierbei wurden zwei dreistufige Großflächenproportionalzähler mit einer Fensterfläche von jeweils 15 cm x 30 cm benutzt. Die mittlere Stufe der Zähler diente jeweils zum Nachweis der Röntgenstrahlung, während die untere und die obere Stufe der Zähler als Antikoinzidenz-Schutz betrieben wurden. Auf diese Weise wurde nicht nur - wie bei dem zwei Jahre zuvor entwickelten Teilkörperzähler - die aus dem Außenraum stammende Störstrahlung diskriminiert, sondern es wurde darüber hinaus auch die von der zu untersuchenden Person selbst emittierte Störstrahlung unterdrückt. Dadurch wurde im Energiebereich der Röntgenstrahlung von Plutonium ein für damalige und heutige Verhältnisse einmalig niedriger Nulleffekt erzielt. Bezogen auf die Fensterfläche der Zähler war der Nulleffekt min-

destens um den Faktor drei niedriger als bei allen anderen damaligen Detektorentwicklungen in England, Frankreich und den USA (Tab. 1).

Zur Kalibrierung des Karlsruher Detektorsystems wurde in eine männliche Leiche eine mit Pu-239 dotierte Lungennachbildung eingesetzt. Nach dieser Kalibrierung ergab sich eine untere Nachweisgrenze von etwa 0,44 kBq Pu-239 in der Lunge bei einer Meßzeit von 30 Minuten. Diese Nachweisgrenze war signifikant kleiner als alle seinerzeit mit anderen Proportionalzählern erreichten Werte (Tab. 1,) und sie konnte bis heute auch von anderen Detektorsystemen noch nicht wesentlich unterboten werden. Insofern gehören die Proportionalzähler auch heute noch prinzipiell zu den empfindlichsten Meßanordnungen zur in vivo Messung von Plutonium.

Tab. 1: Zusammenstellung von Proportionalzählern zur in vivo Messung von Plutonium

Autor	Taylor [3]	Lansiart [4]	Ehret [2]	Ramsden [5]
Zählgas	A/CH <sub>4</sub>	Xe/CH <sub>4</sub> (2 at)	ACH <sub>4</sub>	Xe/CH <sub>4</sub>
Fensterfläche (empf.) in cm	150	250	2 x 450	60
Antikoinzidenz- Schutzzähler	nein	nein	ja	nein
Nulleffekt/Fenster- fläche in ipm/cm <sup>2</sup>	1,7	3,2	0,45	6,5
Kalibrierung	in vivo	Quelle	Leiche	Phantom
Meßzeit in min	100	60	30	50
Nachweisgrenze in kBq Pu-239	2,0	0,74	0,44	1,1

Die praktische Erprobung zeigte allerdings sehr schnell, daß die Proportionalzähler nur bei Inkorporationen von Transuranen mit bekannter Isotopenzusammensetzung eingesetzt werden können - und dies ist in der Praxis selten der Fall. So tritt Plutonium im kerntechnischen Arbeitsbereich praktisch immer zusammen mit Am-241 auf. Die charakteristische Röntgenstrahlung von Am-241 hat nahezu die gleiche Energie wie die der Plutonium-Isotope und kann daher nicht spektroskopisch separiert werden. Erschwerend kommt hinzu, daß die Röntgenstrahlung von Am-241 eine zehnmal so große Emissionswahrscheinlich-

keit wie die Röntgenstrahlung von Pu-239 hat und daher auch bei kleinen Aktivitätsanteilen bereits einen signifikanten Spektrumsbeitrag liefert. Zur Separierung dieses Beitrags muß der Aktivitätsanteil von Am-241 möglichst genau bekannt sein. Aus diesem Grund sollte stets eine explizite Messung des Aktivitätsanteils von Am-241 über die Gamma-Strahlung bei 60 keV durchgeführt werden. Bedingt durch das äußerst geringe Ansprechvermögen für 60-keV-Photonen ist dies mit Proportionalzählern jedoch nicht möglich.

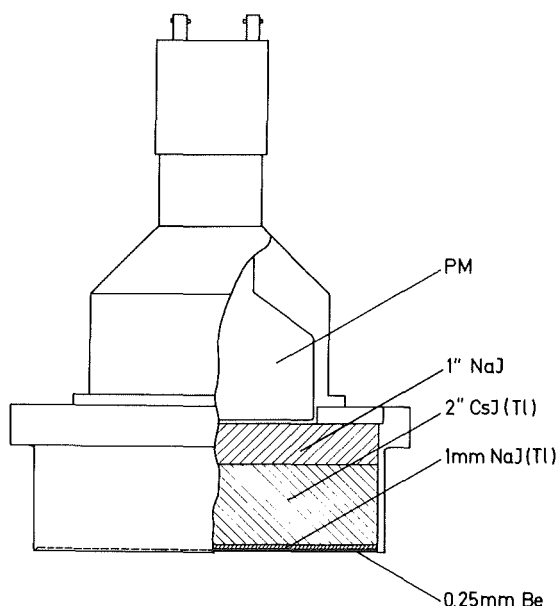
## 2.2 Phoswich-Detektoren

Eine Lösung der Probleme zeichnete sich Anfang der siebziger Jahre ab, als die Phoswich-Detektoren auf den Markt kamen. Diese Detektoren bestehen im allgemeinen aus einem dünnen NaI(Tl)-Kristall zum Nachweis der niederenergetischen Photonenstrahlung und einem vergleichsweise dicken CsI(Tl)-Kristall, der sowohl als Anti-Compton-Schild für den NaI(Tl)-Kristall als auch zum Nachweis der höherenergetischen Strahlung dient (Abb. 2). Mit diesen Detektoren, die sich insbesondere im Energiebereich zwischen 10 und 70 keV durch eine sehr hohe Ansprechwahrscheinlichkeit und einen sehr niedrigen Nulleffekt auszeichnen, schien eine spektroskopische Separierung der Plutonium-Komponente von der Am-241-Komponente zumindest prinzipiell möglich zu sein. Aus diesem Grund wurden die Proportionalzähler des Karlsruher Lungenzählers Mitte der siebziger Jahre durch Phoswich-Detektoren ersetzt (Abb. 3). Dabei wurde in Kauf genommen, daß das Energieauflösungsvermögen der neuen Detektoren wesentlich schlechter ist als das der alten. Dies wird durch die Abbildung 4 verdeutlicht, in der die Spektren beider Detektorsysteme für ein definiertes Plutonium-Lungendepot gegenübergestellt sind. Während im Spektrum des Proportionalzählers die drei Linien der charakteristischen Röntgenstrahlung von Plutonium noch deutlich aufgelöst sind, zeigt sich im Spektrum des Phoswich-Detektors nur ein breiter Überlagerungspeak. Bedingt dadurch ist die Peakseparierung in den Spektren der Phoswich-Detektoren wesentlich schwieriger als in den Spektren der Proportionalzähler.

Etwa zeitgleich mit der Installation der Phoswich-Detektoren wurde auch ein neues Kalibrierverfahren für Plutonium-Depositionen in der Lunge bereitgestellt. Bei diesem Verfahren wurde zunächst der Wirkungsgrad für eine definierte Plutonium-Deposition in einem behelfsmäßigen Lungen-Phantom bestimmt und danach mit Hilfe von speziellen halbempirischen Korrektionsformeln

auf die jeweiligen Körperproportionen des Probanden umgerechnet. Dieses Verfahren war allerdings noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Bessere Ergebnisse wurden in anderen Laboratorien mit in vivo Kalibrierungen erzielt, bei denen von einer Referenzperson ein Aerosol mit einem Plutoniumsimulator und einer Markierungssubstanz inhaliert wurde. Als Plutoniumsimulator diente dabei ein kurzlebige Radionuklid mit einem ähnlichen Photonenspektrum wie Pu-239 (z. B. Pd-103) und als Markierungssubstanz ein kurzlebige Radionuklid mit durchdringender Gamma-Strahlung (z. B. Cr-51). Nach der Inhalation wird zunächst der Wirkungsgrad für das Photonenspektrum des Plutoniumsimulators bestimmt.

Abb. 2: Aufbau eines Phoswich-Detektors (Harshaw Type 32 MBSH 1M/5B-X)



Dieser Wirkungsgrad wird dann auf das Spektrum der Röntgenstrahlung von Pu-239 umgerechnet. Dieses Verfahren wurde allerdings in Karlsruhe nicht angewandt. Anfang der achtziger Jahre kam eine kommerzielle Version des vom Lawrence Livermore Laboratory entwickelten Torso-Phantoms auf den Markt. Bei diesem Phantom können sowohl die Körperproportionen als auch das Verhältnis der Fett- und Muskelgewebeanteile in einem weiten Bereich variiert werden. Man kann daher mit diesem Phantom den individuellen Wirkungsgrad mit mindestens ebenso hoher Genauigkeit bestimmen wie mit der in vivo Kalibrierung. Voraussetzung ist dabei allerdings, daß die Gewebestrukturen im Bereich des Thorax des Probanden mit einem geeigneten Ultraschallgerät bestimmt und die Strukturen des Phantoms entsprechend angepaßt werden.

Abb. 3: Der KfK-Lungenzähler zur in vivo Messung von Plutonium mit Phoswich-Detektoren

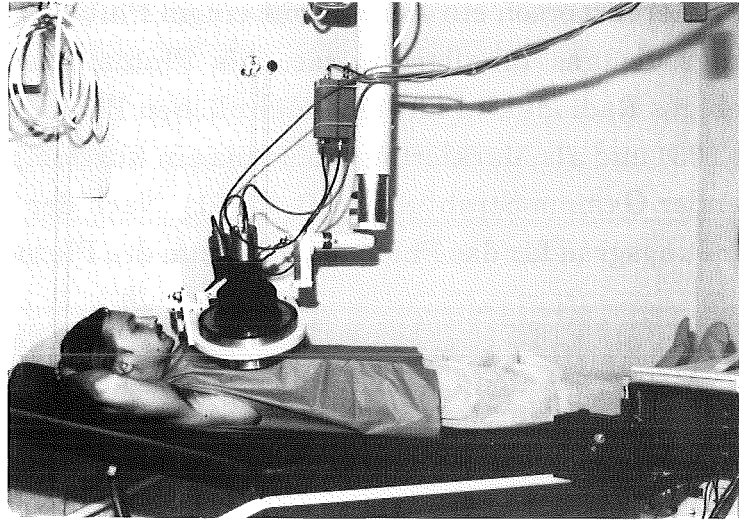


Abb. 4: Vergleich der Spektren des Proportionalzählers und des Phoswich-Detektors für ein Pu-239-Lungendepot

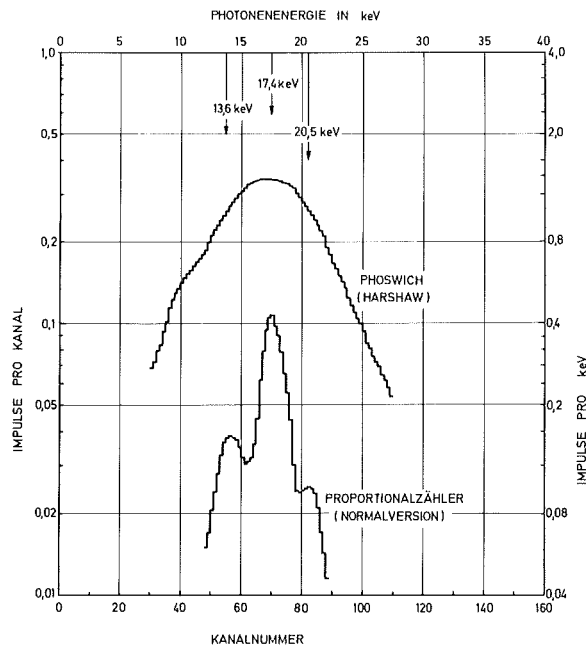
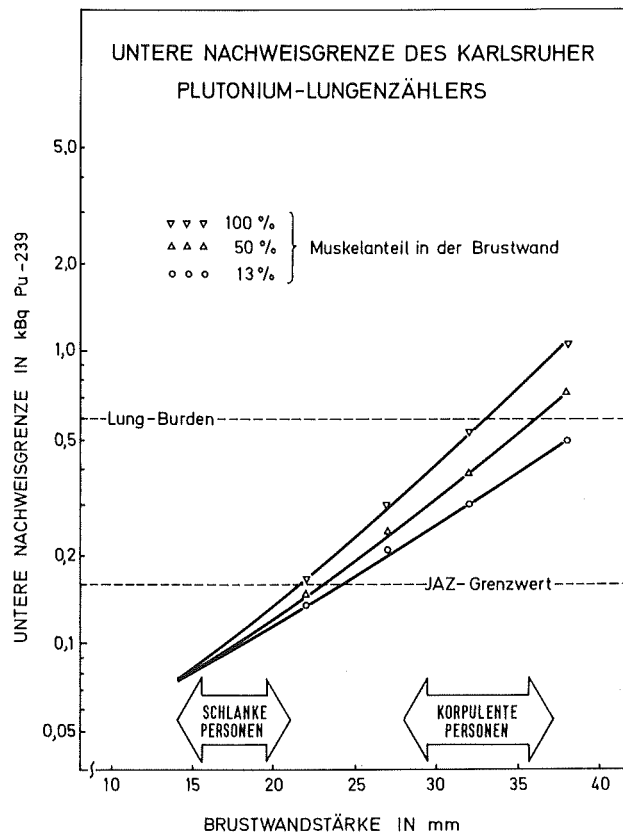


Abbildung 5 zeigt die anhand von Kalibriermessungen mit dem Lawrence-Livermore-Phantom für verschiedene Brustwandstärken und verschiedene Fett/Muskel-Gewebeverhältnisse ermittelte untere Nachweisgrenze der beiden Phoswich-Detektoren des Karlsruher Lungenzählers. Die Nachweisgrenze bezieht sich hierbei auf ideale Meßbedingungen, d. h. (a) das Plutonium ist homogen in

der Lunge verteilt, (b) außer Plutonium und der natürlichen Radioaktivität befinden sich keine radioaktiven Stoffe im Körper, (c) zur Spektrumsauswertung steht ein geeignetes Vergleichsspektrum zur Verfügung und (d) die Meßgeometrie von Vergleichs- und Kalibriermessung wird genau reproduziert. Sind alle diese Voraussetzungen erfüllt, so liegt die untere Nachweisgrenze zwischen etwa 0,1 kBq Pu-239 bei sehr schlanken Personen und etwa 1 kBq Pu-239 bei sehr korpulenten Personen. Diese Werte liegen in der gleichen Größenordnung wie die von anderen Autoren für Phoswich-Detektoren publizierten Nachweisgrenzen (Tab. 2).

Abb. 5: Untere Nachweisgrenze des Phoswich-Lungenzählers für homogene Pu-239-Lungendepositionen nach Kalibrierung mit dem Lawrence-Livermore-Phantom





Tab. 2: Zusammenstellung von Phoswich-Detektoren zur in vivo Messung von Plutonium

Autor	Tomlinson [6]	Clemente [7]	Lößner[8]	Sharma[9]
Detektoranzahl	2	1	1	1
Durchmesser in cm	12,5	12,5	12,5	20
Kristallstärke in mm	1 NaI(Tl) 51 CsI(Tl) in vivo	0,5 NaI(Tl) 51 CsI(Tl)	2 CsI(Tl) 51 NaI(Tl)	3 NaI(Tl) 51 CsI(Tl)
Kalibrierung	Phantom/	Phantom	Phantom	in vivo
Meßzeit in min	33	33	?	40
Nachweisgrenze in kBq Pu-239	0,37	0,15	0,19-0,93	0,22-1,5

### 3 Beispiele aus der Praxis

#### 3.1 Plutonium-Inkorporationen

Mit dem Karlsruher Lungenzähler wurde bisher nur in einem einzigen Fall eine Plutonium-Inkorporation direkt nachgewiesen. Es handelte sich dabei um einen Probanden, der im Jahr 1983 bei einem Zwischenfall im Ausland mit Plutonium und Am-241 kontaminiert wurde. Die Abbildung 6 zeigt als Beispiel das über der Lunge des Probanden gemessene Nettospektrum im Vergleich zu einem entsprechend angepaßten Spektrum des Lawrence-Livermore-Phantoms für ein Lungen-depot von 280 Bq Am-241. Im Bereich des Photopeaks der Gamma-Strahlung von Am-241 bei 60 keV stimmen beide Spektren sehr gut überein, so daß man davon ausgehen kann, daß die Phantom-Messung die Am-241-Komponente im gesamten Energiebereich gut wiedergibt. Die Differenz zwischen beiden Spektren sollte daher im wesentlichen die Plutonium-Komponente darstellen. Wie allerdings aus Abbildung 7 hervorgeht, hat das Differenzspektrum im Bereich zwischen etwa 30 keV eine negative Komponente. Als Ursache für diese negative Komponente stellte sich nach umfangreichen Untersuchungen heraus, daß der bei etwa 48 keV liegende Rückstreu-Peak der Gamma-Strahlung von Am-241 bei der Phantommessung größer als bei der Probandenmessung war. Die negative Komponente kann daher quasi durch einen negativen Rückstreu-Peak angenähert

werden. Die Plutonium-Komponente, die in der gleichen Weise wie die Am-241-Komponente durch Anpassung eines mit dem Lawrence-Livermore-Phantom gemessenen Spektrums ermittelt wurde, entspricht einer Lungenaktivität in Höhe von etwa 2,3 kBq Pu-239. Dieser Wert ist etwa fünfmal so groß wie die unter idealen Meßbedingungen ermittelte untere Nachweisgrenze der Meßanordnung (Abb. 5). Bei Berücksichtigung des zählstatistischen Fehlers, des Fehlers bei der Peak-Separierung und des Kalibrierfehlers ergibt sich für die Plutoniumaktivität ein Gesamtfehler von etwa 50 bis 70%. Bei einem isotopenreinen Plutonium-Lungendepot in dieser Höhe würde man dagegen nur mit einem Gesamtfehler in Höhe von 20 bis 30 % rechnen. Dies macht deutlich, daß bereits sehr geringe Am-241-Aktivitätsanteile - im vorliegenden Fall waren es etwa 10 % - den Fehler bei der in vivo Messung von Plutonium massiv in die Höhe treiben können.

Es ist daher in den meisten Fällen, in denen Plutonium zusammen mit Am-241 inkorporiert wurde, wesentlich zweckmäßiger, die Plutonium-Körperaktivität indirekt über die Am-241-Körperaktivität zu bestimmen. Die aus dem unterschiedlichen Stoffwechselverhalten von Plutonium und Americium resultierenden Fehler sind - zumindest in den ersten Jahren nach der Inkorporation - sicher kleiner als die bei der direkten Plutonium-Bestimmung zu erwartenden Fehler.

Abb. 6: Beispiel für eine mit dem Phoswich-Lungenzähler nachgewiesene Plutonium/Americium-Inkorporation: Probandspektrum im Vergleich zum Am-241-Phantomspektrum

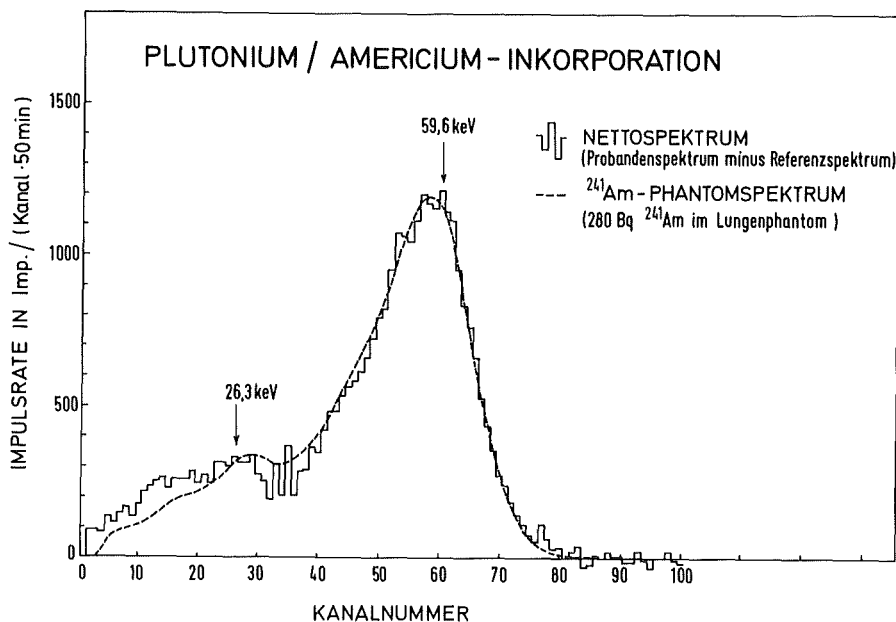
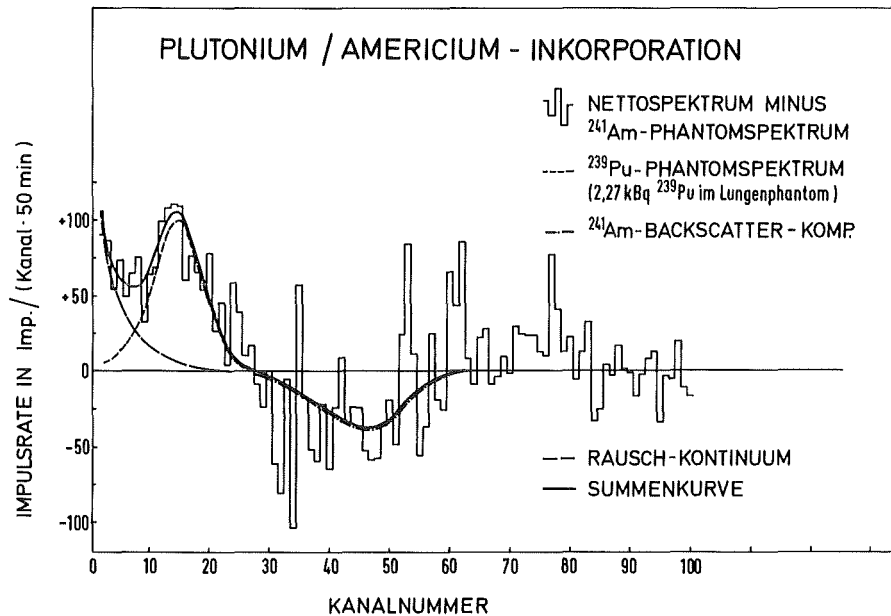


Abb. 7: Beispiel für eine mit dem Phoswich-Lungenzähler nachgewiesene Plutonium/Americium Inkorporation: Probandenspektrum (Abb. 6) nach Abzug des Am-241-Phantomspektrums im Vergleich zum Pu-239-Phantomspektrum



### 3.2 Americium-Inkorporationen

Die *in vivo* Messung von Am-241 ist vergleichsweise einfach, da die auf die Aktivität bezogene Impulsrate der Phoswich-Detektoren bei Am-241 nahezu 500 mal so groß wie bei Pu-239 ist. Hinzu kommt, daß die Körperproportionen bei Am-241 bei weitem keinen so großen Einfluß auf die Kalibrierfaktoren haben wie bei Plutonium. Auch konnten die Verfahren zur Spektrumauswertung so weit verbessert werden, daß die untere Nachweisgrenze im Laufe der Zeit bis auf etwa 4 Bq Am-241 reduziert werden konnte. Eine entscheidende Hilfe war hierbei der Aufbau einer Bibliothek von etwa 1000 Referenzspektren von Personen, die keinen Umgang mit Transuranen haben. Aus dieser Bibliothek konnte anhand der Körperproportionen und des natürlichen K-40-Gehalts der Probanden stets ein repräsentatives Vergleichsspektrum generiert werden.

Nach dem Unfall von Tschernobyl hat sich jedoch die Situation sehr verändert. Bedingt durch die signifikante Cäsium-Körperaktivität in der Bevölkerung ist die Referenzspektren-Bibliothek bis auf weiteres wertlos. Hinzu kommt, daß der Photopeak der Gamma-Strahlung von Am-241 gerade zwischen dem Photopeak

der charakteristischen Röntgenstrahlung von Cäsium und dem Maximum des Streustrahlungskontinuums der Phoswich-Spektren liegt. Dadurch wird die Peak-Erkennung außerordentlich erschwert und die Nachweisgrenze auf etwa 50 Bq Am-241 angehoben.

In dieser Situation mußten anlässlich einer Am-241-Kontamination in einem externen Forschungsinstitut insgesamt 129 Personen systematisch untersucht werden. Für diese Untersuchungen wurde das Verfahren zur Spektrumsauswertung zunächst notdürftig und danach im Laufe der Zeit ständig besser an die durch Tschernobyl veränderten Meßbedingungen angepaßt. Dadurch konnte schließlich die Nachweisgrenze wieder auf etwa 25 Bq Am-241 gesenkt werden [10].

Bei den Untersuchungen mußte berücksichtigt werden, daß die Am-241-Aktivität auf die Lunge und die pulmonalen Lymphknoten sowie auf Leber und Skelett verteilt sein kann. Zur selektiven Bestimmung der Aktivität in diesen Bereichen wurden vier Meßpositionen definiert, in denen die Detektoren jeweils symmetrisch über dem Kopf, der Lunge, der Leber und den Knien des Probanden angeordnet sind.

In diesen Meßpositionen wurde das Detektorsystem für alle in Betracht kommenden Nukliddepositionen im Körper kalibriert. Hierfür wurden das Lawrence-Livermore-Phantom und verschiedene Schädel-, Thorax- und Knie-Phantome vom New York University Medical Center benutzt. Aufgrund der ersten Untersuchungen lag die Am-241-Körperaktivität bei etwa 85 % der gemessenen Personen unter der Nachweisgrenze. Bei 11 Personen wurden Werte zwischen 25 und 50 Bq gemessen, bei 6 Personen Werte zwischen 50 und 100 Bq und bei 3 Personen Werte zwischen 100 und 200 Bq.

Um zu einer Dosisabschätzung zu gelangen, wurde in einem ersten Schritt die Aktivitätsverteilung auf die Leber und auf das Skelett ermittelt. Hierfür wurden alle Fälle herangezogen, für die jeweils ein kompletter Satz von Messungen in allen Meßpositionen vorlag. Bei Vernachlässigung der Fälle, bei denen die Aktivitätsverteilung durch therapeutische Maßnahmen möglicherweise beeinflusst war, ergab sich ein mittleres Aktivitätsverhältnis von nahezu 1. Dies entspricht den älteren ICRP-Modellen von 1979 [11], steht jedoch in Widerspruch zu den neueren ICRP-Modellen von 1986 [12], nach denen die Leberaktivität nur 60 % der Skelettaktivität ausmacht. In einem zweiten Schritt wurde die biologische Halbwertszeit der Am-241-Aktivität in der Lunge bestimmt. Dabei wurde die im

ersten Schritt ermittelte Aktivitätsverteilung als Randbedingung benutzt. Hierbei ergab sich zunächst eine mittlere Halbwertszeit von etwa 200 d. Weitere Untersuchungen ergaben jedoch Hinweise darauf, daß die Lungenaktivität in zwei Fraktionen mit unterschiedlichen biologischen Halbwertszeiten vorliegt. Etwa 80 % der deponierten Aktivität wird wahrscheinlich mit einer biologischen Halbwertszeit von weniger als 100 d und der Rest mit einer biologischen Halbwertszeit von mehr als 500 d abgebaut.

Es zeigte sich, daß die ICRP-Modelle in diesen konkreten Fällen nicht ohne weiteres übernommen werden können. Bei geeigneter Anpassung der Modellparameter konnte allerdings in nahezu allen untersuchten Fällen eine gute Konsistenz zwischen den Meßergebnissen und den Modellrechnungen erzielt werden. Mit Hilfe des angepaßten Modells konnte dann schließlich auch eine Abschätzung der zu erwartenden Knochendosen vorgenommen werden. Dabei ergaben sich in den meisten Fällen Werte unterhalb der Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung. In einigen Fällen wurden Knochendosen zwischen dem ein- und zweifachen der Grenzwerte abgeschätzt. Überschreitungen des zweifachen Grenzwertes wurden nicht gefunden.

#### 4    **Schlußfolgerungen**

Die Untersuchungen haben insbesondere gezeigt, daß eine zuverlässige Ermittlung der inneren Strahlenexposition von Am-241 erst nach Bestimmung der Aktivitätsdeposition im dosisrelevanten Körpergewebe - nämlich im Skelett - möglich ist. Alle anderen Meßverfahren wie z. B. die Messung der Aktivität in den Ausscheidungen oder auch die Messung der primären Aktivitätsdeposition in der Lunge lassen nur indirekte Schlüsse auf die zu erwartende Strahlenexposition zu. Diese indirekten Schlüsse basieren auf standardisierten Modellvorstellungen und sind daher unter Umständen mit sehr großen Fehlern behaftet. Insofern ist es von großer Bedeutung, daß die Stoffwechselmodelle speziell in Hinblick auf die Expositionsbedingungen im kerntechnischen Arbeitsbereich weiterentwickelt werden.

Außerdem ist es von Bedeutung, daß die Verfahren zur in vivo-Messung der Transurane im Skelett noch weiter verbessert werden. Und hier schließt sich der Kreis zu den ersten Anfängen von Kiefer und Maushart aus dem Jahr 1961, denen damals bereits klar war, daß das Ziel der Inkorporationsmessung stets die

Bestimmung der Aktivität im kritischen Organ sein sollte. Folgerichtig bauten sie auch als erstes ein Detektorsystem zur Bestimmung der Plutoniumaktivität im Skelett. Damals wie heute sind die verfügbaren Detektorsysteme allerdings zu unempfindlich, um eine Plutonium-Exposition unterhalb der Grenzwerte im Skelett direkt messen zu können. Was jedoch das Am-241 angeht, so ist heute bereits eine Exposition von weniger als 25 % der Grenzwerte meßbar.

Zur weiteren Verbesserung der in vivo-Messung der Transurane wird im Kernforschungszentrum zur Zeit im Rahmen eines vom Bundesumweltministerium geförderten Forschungsvorhabens ein neuer Teilkörperzähler mit speziellen Germanium-Teleskopdetektoren aufgebaut [13]. Bei diesen Detektoren handelt es sich um ein Halbleiter-Analogon der Phoswich-Detektoren. Sie bestehen jeweils aus einem flachen Low-Energy-Germaniumkristall und einem unmittelbar dahinter angeordneten großen koaxialen Germaniumkristall. Für den neuen Teilkörperzähler werden sieben Teleskopdetektoren verwendet, die zur weiteren Nulleffektreduzierung in einem gemeinsamen Plastik-Szintillationsdetektor eingebettet sind. Vor den Strahleneintrittsfenstern der Teleskopdetektoren befindet sich jeweils ein dünner Proportionalzähler, mit dessen Hilfe die Beta-Strahlung und die Compton-Elektronen aus der Umgebung eliminiert werden sollen. Mit diesem neuen Teilkörperzähler sollte es möglich sein, ein weiteres Stück auf dem von Kiefer und Maushart im Jahr 1962 vorgezeichneten Weg voranzukommen.

## 5 Literatur

- [1] Kiefer, H., Maushart, R.; Determination of Pu-239 Body Burden Using Gamma Spectrometry with Proportional Counters, Proc. IAEA Symp. on Whole Body Counting, Wien 1961, p. 289-297
- [2] Ehret, R., Kiefer, H., Maushart, R., Möhrle G.; Performance of an Arrangement of several Large-area Proportional Counters for the Assessment of Pu-239 Lung Burden, Proc. IAEA Symp. on Assessment of Radioactive Body Burden in Man, Heidelberg, 1964, Band I, S. 141
- [3] Taylor, B. T., Rundo, J.; A Progress Report on the Measurement of Pu in vivo, SERE-R 4155, 1962
- [4] Lansart, A., Morucci, J. P., Nouveau compteur proportionnel destiné à la detection in vivo de traces de Pu dans les poumons, Proc. IAEA Symp. on Assessment of Radioactive Body Burden in Man, Heidelberg, 1964, Band I, S. 131
- [5] Ramsden, D.; A Multiwire Proportional Counter for the Detection of Pu-239 in vivo, AEEW-M 526, 1965

- [6] Tomlinson, F. K.; Plutonium-238 Lung Counting with Phoswich Detectors, IAEA-SR-6131, 1976
- [7] Clemente, G. F.; In vivo Measurements of Pu-239 in Man, Second European Congress on Radiation Protection, Budapest, 1972
- [8] Löbner, V.; Der empfindliche Nachweis niederenergetischer Quantenstrahler mittels Impulsformanalyse, Dissertation, Humboldt-Universität Berlin, 1974
- [9] Sharma, R. C.; Assessment of Chest Burdens of Plutonium, IAEA-SR-6150, 1976
- [10] Doerfel, H.; Zur Auswertung der Phoswich-Spektren von Am-241 nach Tschernobyl, in: Jahresbericht 1987 der Hauptabteilung Sicherheit (Red. Kiefer, H., König, L.A.), KfK 4400, pp. 200-202, 1988
- [11] International Commission on Radiological Protection, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 30, Part 1, Ann. ICRP 2 (3/4), (1979)
- [12] International Commission on Radiological Protection, The Metabolism of Plutonium and Related Elements, ICRP Publication 48, Ann. ICRP 16 (2/3), (1986)
- [13] Doerfel, H.; Entwicklung eines neuen Teilkörperzählers mit Germanium-Teleskopdetektoren, in: Jahresbericht 1987 der Hauptabteilung Sicherheit (Red. Kiefer, H., König, L.A.), KfK 4400, pp. 207-208 (1988)

**Strahlenschutzmedizinische Probleme  
aus der Sicht der Berufsgenossenschaften**

**K. Renz**

**Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik,  
Institut für Strahlenschutz**

Die Berufsgenossenschaft hat vielfältige Aufgaben, die der Verhütung und der Entschädigung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten dienen. Die Umsetzung dieser Aufgaben erfordert die Anwendung des Wissens sehr unterschiedlicher Fachgebiete. Damit ist eine Institution in der Regel überfordert, denn sie kann nicht von Amtes wegen allwissend sein. Sie ist auf Hilfe von außen angewiesen.

Das schwierige, komplexe Gebiet des Strahlenschutzes ist ein Paradebeispiel. Hier überschneiden sich naturwissenschaftliche, technische und medizinisch-biologische Fragestellung. Wenn man sinnvolle Strategien und Maßnahmen der Prävention, der Ersten Hilfe und der medizinischen Behandlung entwickeln will, ist man auf die Unterstützung von Experten angewiesen. Es sei mir gestattet, einen der uns beratenden Experten besonders hervorzuheben.

Herr Professor Kiefer hat uns viele Jahre lang in den unterschiedlichsten Beratungsgremien mit Rat und Tat zur Seite gestanden. Sein umfassendes Wissen und sein großer Schatz an Erfahrungen verbunden mit einem unbestechlichen Sinn für die Realität haben uns häufig weitergeholfen, wenn es anfang schwierig zu werden. Herr Prof. Kiefer hat wesentlich dazu beigetragen, Lösungen für unsere Probleme zu finden und sie dann in die Praxis umzusetzen. Die Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik und der chemischen Industrie danken Herrn Prof. Kiefer sehr für seine Mithilfe und Unterstützung bei der Wahrnehmung ihrer Aufgaben im Strahlenschutz. Es war die Problematik der Versorgung von Strahlenunfällen, die Herrn Prof. Kiefer bereits Anfang der siebziger Jahre mit der Berufsgenossenschaft zusammenführte. Es galt eine Konzeption zu entwickeln, die es ermöglichte, im Ernstfall die erforderliche medizinisch-naturwissenschaftliche Hilfe zur Verfügung zu haben.

Dem gegenüber stand die sehr geringe Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines schweren Strahlenunfalles, dank des konsequenten Strahlenschutzes in der Bundesrepublik. Es sollte ein System geschaffen werden, das einerseits die



notwendigen Voraussetzungen erfüllte und andererseits nicht zu aufwendig war. Die wichtigste Voraussetzung war, Einrichtungen zu haben, die in der Lage sind, Vorkommnisse mit ionisierender Strahlung möglichst rasch richtig zu beurteilen und danach die weiteren Maßnahmen einzuleiten.

Solche Einrichtungen gab es in der Bundesrepublik, in den Kernforschungszentren und auch anderswo. Sie hatten aber naturgemäß andere Aufgaben und mußten für die Mitwirkungen bei der Versorgung von Strahlenunfällen erst gewonnen werden. Das war keineswegs selbstverständlich. Es hat in der Tat einige Zeit gedauert, bis diese Konzeption der Regionalen Strahlenschutzzentren realisiert werden konnte, die dem Merkblatt "Erste Hilfe bei erhöhter Einwirkung ionisierender Strahlen" zugrunde liegt.

Heute stehen acht regionale Strahlenschutzzentren zu Verfügung:

- das Kernforschungszentrum Karlsruhe
- die Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung Neuherberg/München
- Schwabinger Krankenhaus in München
- die Universitätskliniken Homburg/Saar
- die Kernforschungsanlage Jülich
- die Medizinische Hochschule Hannover
- das Allgemeine Krankenhaus St. Georg in Hamburg
- das Universitätsklinikum Steglitz in Berlin

In Würzburg entsteht derzeit eine neue Einrichtung im Rahmen der Nuklearmedizin, die als weiteres Regionales Strahlenschutzzentrum in Frage kommen wird.

Maßgebend für die Auswahl der Regionalen Strahlenschutzzentren war und ist das dort vorhandene Fachwissen und die apparative Ausstattung. Alle Zentren verfügen über erfahrene Fachleute auf dem Gebiet der Strahlenmedizin, des

physikalischen und radiochemischen Strahlenschutzes. Die Zentren fungieren als Leitstellen für alle Fragen einer strahlenschutzmedizinischen Beratung, Versorgung und Überwachung. Sie schließen vor allem die Lücke zwischen der Ersten Hilfe am Unfallort und nachfolgenden klinischen Untersuchungen oder stationärer Behandlung bis hin zur Einweisung in die Spezialabteilung der Berufsgenossenschaft Unfallkliniken Ludwigshafen. Um ihre Aufgabe zu erfüllen, sollen sie selbst oder im Zusammenwirken mit anderen Stellen in der Lage sein, die erforderlichen Maßnahmen zur Aufklärung einer Strahlenwirkung und die erforderlichen strahlenschutzärztlichen Maßnahmen durchzuführen.

Inzwischen sind die Regionalen Strahlenschutzzentren zu einer Institution geworden. Sie haben sich im praktischen Einsatz bewährt.

Glücklicherweise mußten sie sich bisher nicht mit wirklich schwerwiegenden Strahlenunfällen befassen. Sie werden jedoch relativ häufig mit Vorkommnissen konfrontiert, bei denen Exposition und gesundheitliche Auswirkungen unklar sind. In der Regel können diese Fälle ohne große Schwierigkeiten aufgeklärt und beurteilt werden. Schwierigkeiten bereitet dagegen die Aufklärung eines Falles wie er im vorangehenden Bericht des Herrn Dr. Doerfel beschrieben wird.

Bei unklaren Kontaminationssituationen kann es erforderlich werden, eine große Zahl von Mitarbeitern vorbeugend zu untersuchen. Sollen 130 Personen kurzfristig auf eine Alphastrahler-Inkorporation untersucht werden, so stößt man schnell an die Grenzen der verfügbaren Kapazität, insbesondere bei den Ausscheidungsanalysen. Beim Am-241 war es über die 60 keV-Strahlung möglich, ein Screening mit dem Teilkörperzähler durchzuführen. Danach mußten nur noch bei etwa einem Fünftel der Betroffenen zusätzlich Ausscheidungsanalysen durchgeführt werden. Vier dieser Personen wurden in der medizinischen Abteilung des Kernforschungszentrums einer DTPA-Therapie zur Ausscheidungsintensivierung unterzogen. Diese Maßnahme zeigt einen unerwartet guten Effekt, obwohl der Inkorporationszeitpunkt wahrscheinlich länger als ein Jahr zurücklag.

Im günstigsten Fall konnte eine Reduzierung der Folgeäquivalentdosis um 40% erzielt werden. Das in der Leber deponierte Am-241 konnte nahezu vollständig entfernt werden.

Beispielhaft war auch der Einsatz der Regionalen Strahlenschutzzentren nach den Ereignissen von Tschernobyl. Personen, die aus Rußland zurückkamen, wurden meßtechnisch untersucht und vorsorglich strahlenschutzärztlich betreut. Bei denjenigen, die sich in der Nähe von Tschernobyl aufgehalten hatten, wurden zum Teil erhebliche Kontaminationen festgestellt, die zunächst beseitigt werden mußten.

Das Zusammenwirken der Berufsgenossenschaften mit den Strahlenschutzzentren und insbesondere mit dem Kernforschungszentrum Karlsruhe führte dazu, daß die deutschen Firmen unverzüglich ihre Mitarbeiter aus den Gebieten um Tschernobyl zurückzogen. Erst nach eingehenden Untersuchungen durch Mitarbeiter des Kernforschungszentrums vor Ort in Rußland nahmen die Firmen ihre Arbeiten in den betroffenen Gebieten wieder auf.

Für die Berufsgenossenschaften war es darüber hinaus wichtig, die Strahlenexpositionen derjenigen zu erfassen, die sich in den kritischen Tagen Ende April / Anfang Mai 1986 in der Nähe von Tschernobyl aufhielten. Mit Hilfe der Regionalen Strahlenschutzzentren konnten wir eine große Zahl von Meßwerten über die inkorporierten Aktivitäten an den verschiedenen kritischen Orten zusammenstellen.

Es zeigte sich, daß die Expositionen nicht so hoch lagen, wie anfangs zu befürchten war. Die höchste mittlere Exposition stellten wir bei Personen fest, die sich in Mozyr, etwa 100 km nordwestlich von Tschernobyl entfernt, aufgehalten hatten. Abbildung 1 bezieht sich auf I-131 als Leitnuklid. Die mittlere Folgeäquivalentdosis für Mozyr wurde mit 2 mSv abgeschätzt. Der maximale Einzelwert wurde in Gomel mit über 7 mSv festgestellt. Die äußere Bestrahlung dürfte nach Abschätzungen aus Karlsruhe und Jülich im Höchstfall zu einer Dosis von 1 mSv geführt haben. Damit liegt die maximale Gesamtdosis allenfalls bei 10 mSv.

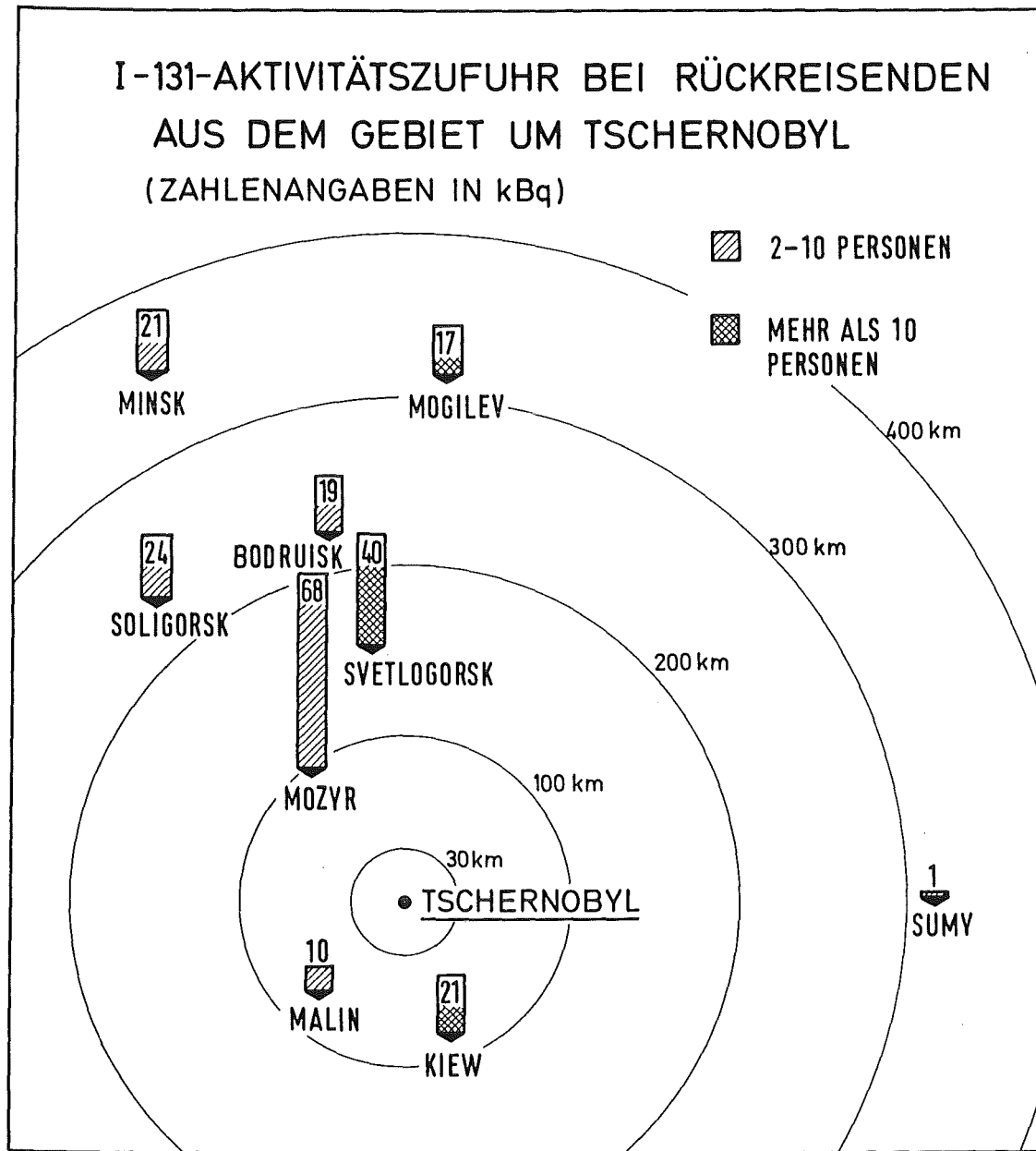


Abb. 1: I-131-Aktivitätszufuhr bei Rückreisenden aus dem Gebiet um Tschernobyl aufgrund von Messungen in verschiedenen Ganzkörperzählern des Kernforschungszentrum Karlsruhe nach Rückkehr in die Bundesrepublik Deutschland

Die Berufsgenossenschaften müssen damit rechnen, daß bei späteren Erkrankungen dieses Personenkreises ein Zusammenhang mit der Exposition in der Nähe von Tschernobyl auf die vorhandene Dokumentation stützen.

Die Anerkennung von Erkrankungen als Berufskrankheiten, die von der Berufsgenossenschaft entschädigt werden, ist ein generelles Problem. Dies gilt in besonderem Maße auch für die Anerkennung der Berufskrankheit Nr. 2402, "Erkrankungen durch ionisierende Strahlen". Die Berufsgenossenschaft darf nur anerkennen, wenn der Zusammenhang mit der beruflichen Tätigkeit wahrscheinlich und die berufliche Exposition wesentliche Ursache ist. Dies entspricht den Prinzipien der gegliederten Sozialversicherung mit den unterschiedlichen Zuständigkeiten der Krankenversicherung, der Rentenversicherung und der Unfallversicherung. An den Nachweis des kausalen Zusammenhanges der Erkrankung mit der beruflichen Tätigkeit werden deshalb besondere Anforderungen gestellt. Problematisch ist zumeist die medizinische Begutachtung, die den ursächlichen Zusammenhang zwischen Exposition und Erkrankung feststellen soll. Bekanntlich ist ein strahleninduzierter Tumor von einem spontan entstandenen nicht zu unterscheiden.

Der Gutachter hat zu beurteilen, ob die aufgetretene Krankheit durch eine Strahlenexposition induziert sein kann, und falls dies bejaht wird, die Wahrscheinlichkeit abzuschätzen, mit der die aufgetretene Erkrankung auf die ermittelte Strahlenexposition zurückzuführen ist.

Dem Gutachter standen bisher insbesondere die Veröffentlichungen der Internationalen Strahlenschutzkommission zur Risikoabschätzung sowie die zusammenfassende Darstellung des BEIR III-Reports zur Verfügung. Neuerdings kann er sich auch auf die radioepidemiologischen Tabellen der amerikanischen National Institutes of Health stützen (2). Sie geben an, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Krebserkrankung durch eine vorausgegangene Exposition verursacht wurde.

Noch nicht in diese Tabellen eingeflossen sind die neuen Ergebnisse der japanischen Studien an den Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki. Daraus werden auch Änderungen der errechenbaren Verursachungswahrscheinlichkeiten resultieren.

Die Tabellen geben die Wahrscheinlichkeit (PC-Probability of Causation) für die strahlenbedingte Entstehung einer Krebserkrankung in Abhängigkeit von der Dosis, dem Alter zum Zeitpunkt der Exposition, vom zeitlichen Abstand der Erkrankung nach der Exposition und vom Geschlecht an. Aufgrund der differenzierten Darstellung insbesondere der zeitlichen Zusammenhänge zwischen Exposition und Erkrankung sowie der Altersabhängigkeit erhält man z. T. eine erheblich höhere Verursachungswahrscheinlichkeit als bei der Abschätzung unter Verwendung der pauschalen ICRP-Risikofaktoren.

Das Beispiel "akute Leukämie von Männern" (Abbildung 2) soll dies verdeutlichen. Die Darstellung gibt den Zusammenhang zwischen Verursachungswahrscheinlichkeit und Latenzzeit bis zum Auftreten der Krankheit wieder. Tritt bei einer einmaligen Exposition von 0,1 Gy nach etwa 2 Jahren bei einem zwanzigjährigen Manne eine akute Leukämie auf, so ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß diese Exposition die Ursache ist, ca. 40%. Das ist eine relativ hohe Verursachungswahrscheinlichkeit. Die Forderung, daß die berufliche Exposition wesentlich für die Erkrankung ist, ist nahezu erfüllt. Bei einem vierzigjährigen Mann liegt dagegen ein Maximum der Verteilung nunmehr bei etwa einem Drittel dieses Wertes.

Die Verursachungswahrscheinlichkeit aus diesen Tabellen kann dem Gutachter natürlich nur zur Orientierung dienen. Letztlich liegt es an ihm, wie er alle Aspekte des Einzelfalles und die Unsicherheiten der Abschätzung bewertet. Abgesehen von den Unsicherheiten, die sich aus den zugrundeliegenden Untersuchungen und Modellen ergeben, ist die Übertragung der Tabellen auf eine andere Population, wie z. B. die der Bundesrepublik Deutschland, problematisch. Unterschiede der Krebsmorbidity müssen berücksichtigt werden.

Bei allen Einschränkungen ist es aber aus der Sicht der Berufsgenossenschaften sehr wünschenswert, die Radioepidemiologischen Tabellen fortzuschreiben und sie an bei uns vorliegende Gegebenheiten anzupassen. Dieser Aufgabe hat sich die Strahlenschutzkommission beim Bundesumweltministerium angenommen. Die Berufsgenossenschaft geht davon aus, daß die radioepidemiologischen Tabellen durch Fortschreibung im Laufe der Zeit zu mehr Sicherheit bei der Entschädigung von Berufskrankheiten durch ionisierende Strahlen führen werden.

# Akute Leukämie

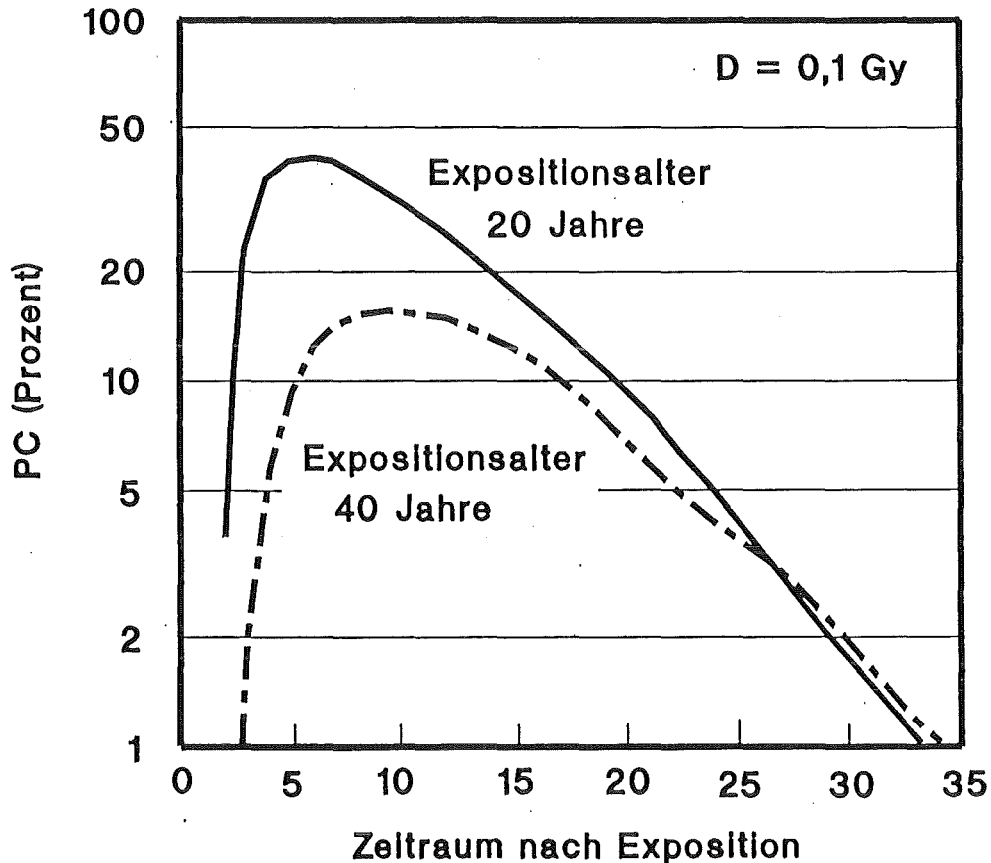


Abb. 2: Wahrscheinlichkeit des Auftretens akuter Leukämie nach einer einmaligen Exposition von 0,1 Gy als Funktion der Zeit nach der Exposition für 20 bzw. 40 Jahre Expositionsalter

## Literatur:

- (1) H. D. Roedler, D. Noßke, L. Ohlenschläger, H. Schieferdecker, H. Doerfel, K. Renz; Workshop "Biological Assessment of Occupational Exposure to Actinides", Versailles May 30 - June 2, 1988.
- (2) Report Of The National Institutes Of Health, Ad Hoc Working Group To Develop Radioepidemiological Tables, January 4, 1985, NIH publication No. 85 - 274

## Panel-Schlußwort

H. Kiefer

### Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH

#### Hauptabteilung Sicherheit

Liebe Strahlenschutzkolleginnen und -kollegen - wenn ich mich hier umsehe, könnte ich fast "liebe Freunde" sagen -,

nachdem ich kurz vor dem Abschluß meines aktiven Berufslebens als Strahlenschutzler stehe und hier das Schlußwort habe, möchte ich doch einen Vergleich wagen zwischen den Anfängen des kerntechnischen Strahlenschutzes 1956 bei uns und heute. Was hat sich geändert? Salopp könnte man formulieren: 1956 hatten wir noch Angst vor der Strahlung, heute nur noch vor den Bußgeldern.

Ist das nun ein Fortschritt? Damals wußte man zwar viel über die Wirkung ionisierender Strahlung, viel mehr als über die Wirkung anderer Noxen, denen der Mensch ausgesetzt ist, aber die Repaireffekte waren beispielsweise noch nicht entdeckt. Es gab eine gute Dosis- und Dosisleistungsmessung für höhere Dosen, also für medizinische Anwendungen; dank Prof. Wachsmann - wir haben ja die Freude, daß er heute unter uns weilt - eine organisierte überregionale Filmdosimetrie zur Personenüberwachung vor allem in der Medizin. Aber die Meßtechnik für geringe Aktivitätskonzentrationen, für die Energiespektroskopie zur Nuklididentifizierung, Voraussetzung jeder Immissionsüberwachung und Inkorporationsüberwachung steckte noch in den Kinderschuhen, ähnlich wie die Neutronendosimetrie. Wir mußten anfangs unseren Radiochemikern beibringen, daß das Pipettieren radioaktiver Lösungen mit dem Mund so, daß nichts in den Körper gelangt, keineswegs eine von uns anerkannte Kunstfertigkeit darstellt. Wozu gibt's technische Hilfsmittel. Unsere Physiker reduzierten nach dem Gesetz des Abstandes und der Abschirmung ihren Nulleffekt am Arbeitsplatz in den Baracken hier im Wald dadurch, daß sie die teilweise dicken Strahlenquellen so geschickt hinter Bäume plazierten, daß der Nulleffekt an ihrem Labortisch tatsächlich sank. Auch das war nicht gerade *lege artis*. Daß Strahlenschutz Geld kostet, war auch noch nicht ins allgemeine Bewußtsein gedrungen. Als mir unser juristischer Geschäftsführer das Geld für den ersten Strahlenmeßplatz genehmigen mußte, kam er sich zweifellos wie Mäcenas vor, der einen jungen, vielleicht sympathischen, aber wenig hoffnungsvollen Dichter erstmals zu sich zum Mahle



lud. Es gab keine Strahlenschutzgesetzgebung - die Röntgenverordnung schließe ich hier aus -, wir richteten uns am internationalen Stand aus, also letzten Endes an ICRP. Dafür hatten wir ein klares Ziel, nämlich den Schutz des Menschen und seiner Umgebung und trugen dafür auch die volle Verantwortung.

Heute plagt uns die Ver- und Überregelung des Strahlenschutzes, die den Betroffenen zwar die Verantwortung, nicht aber den notwendigen Handlungsspielraum für einen jeweils der Situation bestens angepaßten Strahlenschutz läßt. Den aktuellen Stand der wissenschaftlichen und meßtechnischen Entwicklung mit Zukunftsperspektiven haben wir heute ja in den hervorragenden Vorträgen gehört. Es ist die Seite, die uns als Wissenschaftler Spaß macht, sozusagen die Butter auf dem Brot des Strahlenschutzes.

Es gibt aber auch andere Seiten. Dürfen wir den Strahlenschutz so isoliert betrachten, wie es zur Zeit üblich ist? Wie sieht es mit der Optimierung im weitesten Sinne aus? Wer gibt uns eigentlich das Recht - ich meine hier nicht den Gesetzgeber -, zur Reduzierung desselben Gesundheitsrisikos für den Schutz vor emittierten radioaktiven Stoffen ungleich mehr Mittel auszugeben als für den Schutz vor emittierten nicht radioaktiven Substanzen? Ist es beispielsweise sinnvoll, Bevölkerungsdosen in Entwicklungsländern zu reduzieren, die durch Abgabe von Kr-85 bei uns entstehen, wenn mit den Mitteln für eine mögliche Rückhaltung ein ungleich größerer Nutzen in diesen Ländern durch medizinische Prophylaxe, etwa Impfungen, erreicht werden könnte? Oder im kleinen bei uns. Warum fällt die Lungendosis durch Rn-Folgeprodukte im Uranbergwerk unter die Strahlenschutzverordnung, nicht aber im Flußspatwerk? Von den Bevölkerungsdosen in Wohnungen will ich gar nicht reden. Und damit bin ich wieder beim Thema: Novellierung der Strahlenschutzverordnung, die ich aus drei Gründen zur Zeit für unglücklich halte:

1. Der Zeitpunkt ist viel zu spät. Zehn Jahre nach Änderung des Standes der Wissenschaft, also Erscheinen von ICRP 26, könnte man nur dann anpassen, wenn man damit nicht die Anpassung an die nächsten Grundlagenempfehlungen der ICRP in 2 bis 4 Jahren blockieren würde, wie das in der Praxis der Fall sein wird. Der Justizminister spielt bekanntlich bei so kurz aufeinander folgenden Novellierungen nicht mit. Besser wäre jetzt ein vom Atomgesetz unabhängiges, umfassendes Strahlenschutzgesetz vorzubereiten, konform mit den anderen Ländern der EG, das als wissenschaftliche Grundlage die zu erwartenden ICRP-Empfehlungen enthält und möglichst

im selben Jahr in Kraft tritt. Am besten wäre allerdings ein Strahlenschutzgesetz, welches die ganze EG umfaßt.

2. Der Perfektionismus treibt an manchen Stellen unwahrscheinliche Blüten. Beispiel: die Referenzperson zur Ermittlung der Strahlenexposition in § 45, SSVO. Während alle internationalen Strahlenschutzempfehlungen auch unsere Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr mit Luft und Wasser in der Strahlenschutzverordnung auf den Eigenschaften einer für die Bevölkerung repräsentativen Person beruhen, unserem "Reference-Man" nach ICRP, sie erinnern sich: 70 kg schwer, 1,70 m groß, wird hier eine zusätzliche Referenzperson eingeführt, für die - ich zitiere "Die verwendeten Zahlen für die Referenzperson "(z. B. Lebensmittelverzehr, 1000 h Aufenthalt im Sediment)" sind in jeder Hinsicht konservativ und decken daher alle denkbaren Personengruppen ab". Das wäre genauso, wie wenn ein Kleiderkonfektionär eine Anzuggröße herstellen würde, in die auch der Längste und Dickste noch hineinpaßt, passen würde dieser Anzug aber niemanden. Die Folge sind stark erhöhte Anforderungen an die Überwachungsmeßtechnik, ohne daß damit eine wesentliche Dosisreduktion verbunden ist. Das Problem wäre über Emissionsmessungen und dem daraus resultierenden Medianwertes der Dosis der umwohnenden Bevölkerung sauber lösbar gewesen, wobei man sich dann nur noch über einen Sicherheitsfaktor zu einigen gehabt hätte.
3. Die fehlende vollständige Harmonisierung mit den Grundnormen der Europäischen Gemeinschaft. Hier geht es um unsere Glaubwürdigkeit. Da die deutsche Bevölkerung weder mehr noch weniger strahlenempfindlich sein dürfte als unsere Nachbarn, müßte man davon ausgehen, daß unsere Regierung mehr zum Schutz unserer Bevölkerung tut als die Regierungen unserer Nachbarländer. Das glaubt man aber einem Lande nicht, das keine Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen kennt, das die Zwangsiodierung von Kochsalz nicht einführt und das sich auch gegenüber dem Rauchen sowie dem Alkoholkonsum relativ großzügig verhält. Man wird uns politischen Opportunismus vorwerfen, wie wir ihn auf Länderebene bei der Einführung von unterschiedlichen Iodgrenzwerten nach Tschernobyl zur Genüge erlebt haben.

Was wir Strahlenschützer aber brauchen wie die Luft zum Atmen ist Glaubwürdigkeit. Glaubwürdigkeit ist die Voraussetzung für das Vertrauen zwischen

Überwachten und Überwachern. Und Vertrauen, nicht die Kontrolle, ist die Basis des Strahlenschutzes. Wir sollten deshalb auch in Zukunft zum Schutz des Menschen und seiner Umwelt das Notwendige durchzusetzen versuchen, das Überzogene aber abwehren.

### Teilnehmerliste

E.	Abele	Kernforschungszentrum Karlsruhe
S.	Andresen	Krankenhaus Borromäerinnen, Trier
A.	Baier	Kernforschungszentrum Karlsruhe
K.	Bätjer	AGÖF Radioaktivität
B. W.	Bauer	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
C.	Becker	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
K.	Becker	Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
R.	Becker	Kernforschungszentrum Karlsruhe
W.	Beetz	Technischer Überwachungsverein e. V. Baden
S.	Bellaire	Kernforschungszentrum Karlsruhe
K.	Bender	Kernforschungszentrum Karlsruhe
W.	Bentele	Gemeinschaftskernkraftwerk Neckarwestheim
H.	Bergs	Hoechst AG
H.	Bittner	Technische Universität München
H.-J.	Bleyl	Kernforschungszentrum Karlsruhe
Ch.	Blickheuser	Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk
D.	Blickle	Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr Baden- Württemberg
H.	Böhm	Kernforschungszentrum Karlsruhe
	Bröcking	Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
	Brückner	Universität Freiburg
	Brüggemeyer	Niedersächsisches Landesamt für Emissionsschutz
W.	Burck	Kernforschungszentrum Karlsruhe
B.	Burgkhardt	Kernforschungszentrum Karlsruhe
K.	Burkart	Kernforschungszentrum Karlsruhe
W.	Burkart	Paul Scherrer Institut

	Carstensen	Sozialministerium Schleswig-Holstein
R. H.	Clarke	National Radiological Protection Board, Chilton, UK
K.-D.	Closs	Kernforschungszentrum Karlsruhe
E. M.	Dahlke	Kernforschungszentrum Karlsruhe
	Defft	Gewerbeaufsichtsamt Stuttgart
W.	Deller	Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk
P.	Demtröder	Morant und Buchen Dekontaminationsservice GmbH
H.	Dertinger	Kernforschungszentrum Karlsruhe
	Detting	Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Sozialordnung Baden-Württemberg
S.	Diabaté	Kernforschungszentrum Karlsruhe
W.	Diefenbacher	Kernforschungszentrum Karlsruhe
A.	Diehl	Institut für Kernchemie
H.	Dilger	Kernforschungszentrum Karlsruhe
V.	Duill	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH
E.	Duran	Kernforschungszentrum Karlsruhe
F.	Eberbach	Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg
J.	Ehrhardt	Kernforschungszentrum Karlsruhe
D.	Ehrlich	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
N.	Eickelpasch	Kernkraftwerk Grundremmingen
	Elias	Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege
N.	Elstermann	
A.	Engelmann	Daimler Benz AG
H.	Eriskat	Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Direktion Gesundheit und Sicherheit
F.	Fenzl	Brennelementelager Gorleben GmbH
W.	Fessen	Nokia Graetz GmbH
H.	Fessler	Kernforschungszentrum Karlsruhe

J. G.	Festag	Gesellschaft für Schwerionen- forschung mbH, Darmstadt
A.	Fiege	Kernforschungszentrum Karlsruhe
H.	Frank	
D.	Franke	Katastrophenschutzstelle des Bundes
E.	Frenzel	FAG-Kugelfischer
B.	Funsch	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
R.	Gammel	Badenwerk AG
L.	Gärtner	Institut für Ökologische Forschung Gruppe Ökologie (GÖK)
	Gehrmann	Siemens AG Unternehmensbereich KWU
V.	Genrich	Genitron Instruments GmbH
N.	Gilles	Kernforschungszentrum Karlsruhe
H.	Glantz	Kernforschungszentrum Karlsruhe
B.	Gloebel	CERN DIV. TIS
A.	Göhringer	Berufsakademie Karlsruhe
A.	Götz	
K.-H.	Gräßle	Kernforschungszentrum Karlsruhe
M.	Griesbach	
A.	Großkopf	Allgemeine Unfallversicherungsanstalt
A.	Grünes	Kernforschungszentrum Karlsruhe
	Gumprecht	Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH, Köln
	Haas	Staatliche Technische Überwachung
U.	Haberkorn	Hoechst AG
J.	Hacke	Hahn-Meitner-Institut für Kernforschung Berlin GmbH
	Hagenberg	Alkem GMBH
I.	Hagenlocher	
	Hahn	Gewerbeaufsichtsamt Göttingen
	Harder	Institut für Medizinische Physik, Göttingen
W.	Harm	Kraftanlagen AG
G.	Hartkopf	Kernforschungszentrum Karlsruhe

I.	Hasemann	Kernforschungszentrum Karlsruhe
M.	Hauser	Kernforschungszentrum Karlsruhe
R.	Hausser	Bundeswehr
S.	Heitz	Kernforschungszentrum Karlsruhe
S.	Hempelmann	Kernforschungszentrum Karlsruhe
K.-D.	Henning	GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH
J.	Herrmann	Siemens AG
	Hesse	Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk
R.	Heusinger	Prüfstelle für Strahlenschutz
K.	Heuss	Krankenanstalten der Stadt Köln
G.	Heusser	Max-Planck-Institut für Kernphysik
S.	Hiller	Siemens AG Unternehmensbereich KWU
H.	Hingmann	FH Gießen-Friedberg
A.	Hoegl	Siemens AG
C.	Hoffmann	Münchner Apparatebau für elektrische Geräte GmbH
B.	Hofmann	Brown Boveri Reaktor GmbH
I.	Hofmann	Kernforschungszentrum Karlsruhe
M.	Hofmann	Kernforschungszentrum Karlsruhe
R.	Holleuffer- Kypke von	Kernforschungszentrum Karlsruhe
W.	Hunzinger	
	Ilmstädter	Hessische Landesanstalt für Umwelt
	Iwatschenko- Borho	FAG Kugelfischer
W.	Jacobi	Gesellschaft für Strahlenschutz und Umweltforschung mbH
R.	Jahr	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
A.	Janner	Kernforschungszentrum Karlsruhe
H.	John	Kernforschungszentrum Karlsruhe
L.	Kahl	Kernforschungszentrum Karlsruhe
M.	Kalcher	Stratec Elektronik
H.-P.	Kappis	Sina GmbH

K.-H.	Kaspar	Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg
G.	Kaufmann	Kernkraftwerk Leibstadt AG
K. D.	Keller	Universität Tübingen
C.	Kiefer	Universtität Karlsruhe
H.	Kiefer	Kernforschungszentrum Karlsruhe
S.	Kiefer	Universität Genf
U.	Kiefer	
	Klar	Berufsgenossenschaft für Gesund- heitsdienst und Wohlfahrtspflege
H.	Kleinfeld	Kernforschungszentrum Karlsruhe
	Kluge	Kernkraftwerk Isar II
G.	Knedlitschek	Kernforschungszentrum Karlsruhe
W.	Koelzer	Kernforschungszentrum Karlsruhe
W.	Kolb	Physikalisch Technische Bundes- anstalt
L. A.	König	Kernforschungszentrum Karlsruhe
W.	König	Robert Bosch GmbH
K.	Körting	Kernforschungszentrum Karlsruhe
G.	Krafft	Kernforschungszentrum Karlsruhe
H.	Krause	Kernforschungszentrum Karlsruhe
C.	Krauß	Kernforschungszentrum Karlsruhe
O.	Krauss	Deutsches Krebsforschungszentrum
H.-J.	Kreiner	FAG Kugelfischer KG
W.	Kreisel	Hessische Landesanstalt für Umwelt
H.	Kronmüller	Universität Karlsruhe
K.	Krug-Krause	Deutsches Krebsforschungszentrum
C.-M.	Krüger	Kernforschungszentrum Karlsruhe
G.	Kübler	Gewerbeaufsichtsamt Stuttgart, Strahlenschutz
	Kunz	Landesanstalt für Umweltschutz Rheinland-Pfalz
E.	Lachmann	Kernforschungszentrum Karlsruhe
K.-G.	Langguth	Kernforschungszentrum Karlsruhe
H.	Ledermann	
Ch. W.	Lee	Environmental Division, Chang- Noom, Korea



W.	Lessle	Kernforschungszentrum Karlsruhe
	Linhart	Hessisches Landesamt für Umweltschutz
	Linke	Hamburgische Elektrizitätswerke
U.	Lohoff	St. Katharinenhospital Stuttgart
A.	Loida	Kernforschungszentrum Karlsruhe
D.	Maier	
G.	Maisch	Daimler Benz AG
F.-J.	Maringer	
B.	Maushart	Labor Prof. Dr. Berthold
R.	Maushart	Labor Prof. Dr. Berthold
J.	Mehl	
U.	Melcher	
	Merwitz	
S.	Metzger	Kernforschungszentrum Karlsruhe
	Metzke	Technischer Überwachungsverein e. V. Bayern
R.	Michel	Universität Hannover
H.	Miska	Ministerium des Innern und für Sport
	Modreker	Kraftanlagen Heidelberg AG
U.	Mohr	Kernforschungszentrum Karlsruhe
G.	Möhrle	Baden-Werk AG
	Mohrmann	Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk
J.	Müller	
W.	Müller	Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH
R.	Mundt	Hahn-Meitner-Institut
R.	Nagel	Kernforschungszentrum Karlsruhe
B.	Nahrath	Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg
J.	Narrog	Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg
K.	Nast	Landesbergamt Baden-Württemberg
R.	Neider	Bundesanstalt für Materialprüfung
P.	Nemecek	Labor Prof. Dr. Berthold

	Neu	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
E. A.	Neuburger	
	Niebergall	Landesbergamt Baden- Württemberg
	Nill	Universität Tübingen
U.	Nobbe	Kernforschungszentrum Karlsruhe
	Nolte	Physikalisch-Technische Bundes- anstalt
S.	Nuss	Kernforschungszentrum Karlsruhe
E.	Oberhausen	Universität des Saarlandes
G.	Paffrath	Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk
G.	Pagliosa	Kernforschungszentrum Karlsruhe
D.	Papadopoulos	Kernforschungszentrum Karlsruhe
J.	Päsler-Sauer	Kernforschungszentrum Karlsruhe
E.	Pawlik	Kernforschungszentrum Karlsruhe
W.	Pfeifer	Kernforschungszentrum Karlsruhe
P.	Pfeiffer	Harshaw Chemie GmbH
R.	Pfotzer	Kernforschungszentrum Karlsruhe
E.	Piesch	Kernforschungszentrum Karlsruhe
M.	Pimpl	Kernforschungszentrum Karlsruhe
H.	Prinz	Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik GmbH
A.	Radziwill	Kernforschungszentrum Karlsruhe
W.	Raskob	
Th.	Reddmann	Kernforschungszentrum Karlsruhe
	Reichert	SINA AG, Pforzheim
	Reinecke	Physikalisch-Technische Bundes- anstalt
K.	Renz	Berufsgenossenschaft der Fein- mechanik und Elektrotechnik
B.	Ribbat	Hochtemperatur Reaktorbau GmbH
K.	Riedel	
W.	Riedl	Münchener Apparatebau für elektronische Geräte GmbH
P.	Riehn	Hessisches Ministerium für Umwelt und Reaktorsicherheit

H.	Rininsland	Kernforschungszentrum Karlsruhe
B.	Ritz	Kernforschungszentrum Karlsruhe
H.	Ritz	
H. G.	Röber	Kernforschungszentrum Karlsruhe
B.	Rogge	Städtische Kliniken Offenbach
G.	Roos	Ministerium für Umwelt und Gesundheit Rheinland-Pfalz
O.	Rosenbaum	Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Soziales Nordrhein-Westfalen
W.	Rosenstock	Fraunhofer Institut für Natur- wissenschaften
E.	Sadri	Kernforschungszentrum Karlsruhe
	Sarbin	Klinikum Ludwigshafen
Ph.	Sargent	
	Schäffler	Bayrisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umwelt- fragen
	Schellhase	Brown Boveri Reactor
H.	Schieferdecker	Kernforschungszentrum Karlsruhe
J.	Schindewolf	Kernkraftwerk-Betriebsgesellschaft mbH
	Schink	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe
L.	Schmidkunz	Hessische Landesanstalt für Umwelt - Außenstelle Darmstadt
M.	Schmidt	
R.	Schmidt	
J.	Schmitz	Kernforschungszentrum Karlsruhe
H.	Schnadt	Technischer Überwachungsverein e. V. Rheinland
Y.	Schneider	
P.	Schneider- Kühnle	Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk
	Schober	Brown Boveri (ABB)
H.	Schreyer	Technischer Überwachungsverein e. V. Stuttgart
S.	Schuhbeck	Institut für Strahlenhygiene des Bundesgesundheitsamtes
H.	Schultz	

M.	Schwall	Kernforschungszentrum Karlsruhe
H.	Schwarz	
W.	Schwarz	Kernkraftwerk ISAR I
G.	Schwarzl	Deutsche Gesellschaft für Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen mbH
H.	Schweizer	Berufsakademie Karlsruhe
R.	Sehr	
	Seitz	Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik
H.	Siwek	Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg
A.	Spang	Siemens AG
E.	Stauber	
C.	Steinhauer	Kernforschungszentrum Karlsruhe
S.	Strack	Kernforschungszentrum Karlsruhe
W.	Tachlinski	Kernforschungszentrum Karlsruhe
P.	Thomas	Kernforschungszentrum Karlsruhe
H.	Trauboth	Kernforschungszentrum Karlsruhe
G.	Trippe	
S.	Ugi	Kernforschungszentrum Karlsruhe
M.	Urban	Kernforschungszentrum Karlsruhe
M.	Vilgis	Kernforschungszentrum Karlsruhe
S.	Vogt	Kernforschungszentrum Karlsruhe
F.	Wachsmann	Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH
E.	Wagner	Universität Freiburg
W.	Wagner	Alkem GmbH
K.-F.	Weibezahn	Kernforschungszentrum Karlsruhe
	Weimar	Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg
H.	Weller	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt, Bezirksverband Pfalz
S.	Weyhe	Buchler GmbH
A.	Wicke	Kernforschungszentrum Karlsruhe
K.	Wickert	Kernforschungszentrum Karlsruhe
H.	Wilker	Kernforschungszentrum Karlsruhe

H.	Zehner	Preussen Elektra
A.	Zieger	Kernforschungszentrum Karlsruhe
E.	Ziegler	
V.	Zimmermann	Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg