

Radioaktive Substanzen im biologischen Milieu

O. Huber

Artikel eingegangen am 9. März 1970

Zusammenfassung

Es wird beschrieben, wie die Eidgenössische Kommission zur Überwachung der Radioaktivität die ihr gestellte Aufgabe löst. Meßergebnisse werden mitgeteilt und diese mit festgelegten Normen verglichen. Daraus geht hervor, daß die auftretenden Konzentrationen radioaktiver Nuklide im biologischen Milieu heute weit unter ihren maximal zulässigen Werten (MPC) sind. Als Meßtechnik wird vor allem die γ -Spektroskopie beschrieben und die Möglichkeiten aufgezeigt, die sich aus der Anwendung hochauflösender Ge-Li-Halbleiterdioden ergeben¹. Die gemessenen Spektren eignen sich zur automatischen Analyse auch auf kleineren Rechenanlagen², wie Testmessungen und Falloutmessungen gezeigt haben.

1. Einleitung

Radioaktive Substanzen im Lebensmilieu können ebenso schädlich sein wie «giftige Stoffe», wenn ihre Konzentration ein gewisses Maß überschreitet. Über ihre genetische Wirkung wird heute abgeschätzt, daß 1 rem die natürliche Mutationsrate um $1/70$ erhöht. Was die somatische Wirkung betrifft, läßt sich die Konzentration radioaktiver Substanzen vergleichen mit jener von «Giften», und es müssen Normen aufgestellt werden, sogenannte maximal zulässige Dosen (MPD), bei welchen, nach dem heutigen Stand der Wissenschaft, die Wahrscheinlichkeit somatischer wie auch genetischer Schädigungen vernachlässigbar klein ist. Solche Normen sind von der ICRP (International Commission on Radiological Protection) festgelegt sowohl für die Allgemeinheit als auch für Einzelindividuen. Für beruflich mit ionisierenden Strahlen beschäftigte Personen sind einige Normen in der Tab. 1 zusammengestellt.

Die maximal zulässige Ganzkörperdosis wird für die Gesamtbevölkerung wegen der genetischen Gefahren um einen Faktor 100 redu-

Tab. 1 Maximal zulässige Dosen für Berufstätige. (D = akkumulierte Dosis in rem bis zum Alter von N Jahren)

ganzer Körper, blutbildende Organe, Gonaden	D = 5 (N-18) 3 rem/13 Wochen
Haut und Schilddrüse	30 rem/Jahr 8 rem/13 Wochen
Alle anderen Organe oder Gewebe, wenn Bestrahlung auf ein Organ limitiert	15 rem/Jahr 4 rem/13 Wochen
Knochen	entsprechend Totalgehalt von $0,1 \mu\text{Ci } ^{226}\text{Ra}$ oder 0,56 rem/Woche

ziert. Will man jedoch einen praktischen Strahlenschutz betreiben und rechtlich verankern (Schweizerische Strahlenschutzverordnung SSVO vom 19. April 1963), dann sind diese Dosen zu übersetzen in maximal zulässige Konzentrationen (MPC) einzelner radioaktiver Nuklide, die im biologischen Milieu (Atemluft, Trinkwasser, Lebensmittel) vorhanden sein dürfen, damit die MPD nicht überschritten werden. Dabei sind neben dem Stoffwechselverhalten die radioaktiven Eigenschaften der Nuklide (Energie und Natur der Strahlung, Halbwertszeit) für die Errechnung der MPC maßgebend, und man spricht in Analogie zur rein chemisch-physikalischen Toxizität von Radiotoxizität. Diese ist besonders hoch zum Beispiel für die langlebigen «Knochensucher» ^{90}Sr und ^{239}Pu . Es kann auch vorkommen, daß die chemische Toxizität die MPC bestimmt (zum Beispiel natürliches Uran in löslicher Form).

So wurde von der ICRP auf Grund experimenteller Daten und theoretischer Überlegungen ein Katalog der MPC radioaktiver Nuklide in Atemluft und Trinkwasser für «Berufstätige» aufgestellt, an dessen Vervollkommnung ständig gearbeitet werden muß. Für die Allgemeinbevölkerung müssen die MPC jener Isotope mit vorwiegend somatischer Wirkung auf $1/30$, jener mit genetischer Wirkung aber auf $1/100$ reduziert werden.

Wenn wir also die Wirkung radioaktiver Substanzen in unserem biologischen Milieu ab-

¹ P. Winiger, O. Huber und J. Halter: Halbleitermessungen von Fallout (Helv. Phys. Acta 41, 645, 1968).

² P. Winiger, O. Huber und J. Halter: Rechenmethode zur Analyse von Halbleiterspektren (Helv. Phys. Acta, 42, 900, 1969).

schätzen wollen, dann müssen wir die gemessenen Konzentrationen mit den MPC vergleichen, und wir werden die erfreuliche Feststellung machen, daß unser Lebensmilieu zurzeit «radioaktiv sauber» ist.

2. Aufgaben der Eidgenössischen Kommission zur Überwachung der Radioaktivität (KUER)

Am 16. November 1956 ernannte der Bundesrat, als Folge der Testexplosionen von Atombomben, die KUER. Ihre Aufgaben sind kurz ausgedrückt folgende:

- a) Überwachung der Radioaktivität unseres biologischen Milieus;
- b) Berichterstattung über das Ergebnis der Überwachung;

c) Antragstellung über Maßnahmen zum Schutze der Bevölkerung im Falle erhöhter Radioaktivität.

Unter Beiziehung von Experten des Eidgenössischen Gesundheitsamtes, des Eidgenössischen Institutes für Reaktorforschung, der Prof. Lerch und Oeschger und anderen und in eigenen Laboratorien wird die Überwachungsaufgabe gelöst. In einem jährlichen Bericht werden die Meßergebnisse veröffentlicht und in bezug auf die Gefährdung der Bevölkerung diskutiert. Die Untersuchungen erstrecken sich heute auf: Atmosphärenluft inklusive Stratosphäre; Niederschläge, Oberflächen-, Grund-, Zisternen- und Abwasser; Boden, Gras, Futter; Milch, Lebensmittel und menschlichen Körper. Es werden auch gezielte Proben aus der Umgebung von Atom-

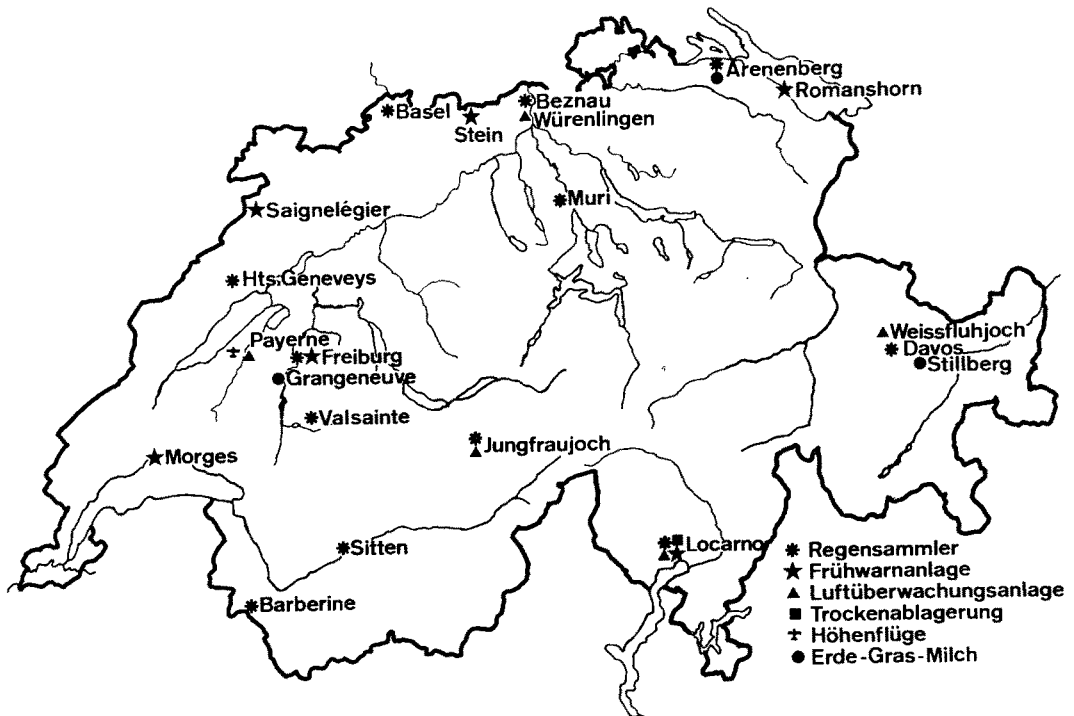


Abb. 1 Probeentnahmestellen des Labors Freiburg der KUER (Stand 1969)

anlagen und Betrieben, die radioaktive Substanzen verarbeiten, untersucht. Daß die Überwachung das ganze Gebiet der Schweiz betrifft, zeigt Abb. 1, in welcher die Probenentnahmestellen des KUER-Labors Fribourg (Dr. Halter, P. Winiger) eingezeichnet sind.

3. Meßergebnisse der Radioaktivitätsüberwachung

Einige Hauptmeßergebnisse sind in den Tab. 2 bis 4 für das Jahr 1966 zusammengestellt. In den Jahren 1962/63 waren die entsprechenden Meßwerte etwas höher, sind dann abgesunken und schwanken seit 1966 um Werte der gleichen Größenordnung, als Folge der chinesischen Atombombenversuche (9. Mai 1966, 17. Juni 1967, 3. Juli 1967, 24. Dezember 1967, 27. Dezember 1968, 29. September 1969).

Die Tab. 2 bis 4 enthalten in der zweiten Zeile die MPC-Werte für die Allgemeinbevölkerung, indem jene für Berufstätige (MPC_B) durch die entsprechenden Faktoren 30 beziehungsweise 100 dividiert werden, je nachdem, ob das betreffende Nuklid nur somati-

Tab. 2 Aktivitätskonzentrationen in Luft ($\mu\text{Ci}/\text{m}^3$)

	Unbekanntes Gemisch β	Sr-90	Cs-137
MPC Bevölkerung	ohne Sr-90		
Gen. $1/100$ MPC_B	10	13	200
Som. $1/30$ MPC_B	($1/100$)	($1/30$)	($1/100$)
Mittelwert 1966			
Locarno	< 0,3	0,003	0,008

Tab. 3 Aktivitätskonzentrationen im Niederschlag ($\mu\text{Ci}/\text{l}$)

	Unbekanntes Gemisch β	Sr-90	Cs-137	Tritium
Trinkwasser	ohne Sr-90			
MPC Bevölkerung				
Gen. $1/100$ MPC_B	200	130	2000	$3 \cdot 10^5$
Som. $1/30$ MPC_B	($1/100$)	($1/30$)	$1/100$	$1/100$
Mittelwert 1966	11	2,2	3	1200
Niederschlag	Locarno	Mailand	Locarno	Locarno

Tab. 4 Aktivitätskonzentrationen in Milch, Knochen und Körper

	Sr-90		Cs-137	
	Milch $\mu\text{Ci}/\text{gCa}$	Knochen $\mu\text{Ci}/\text{gCa}$	Milch $\mu\text{Ci}/\text{l}$	Body Burden nCi
Toleranzkonz. Bevölkerung	280	70	2000 Trinkwasser	300
Mittelwert 1966	27 Schweiz	2,2 1965 und 1967	30 Ostschweiz	12 200 Personen (20jährig)

sche oder auch genetische Effekte auslöst. In Tab. 3 stehen die MPC-Werte von Trinkwasser den gemessenen Werten im Niederschlag gegenüber (Bedeutung nur für Zisternegebiete; im Quell- und Grundwasser ist die Aktivität durch Filtrierung wesentlich kleiner). Für ^{90}Sr (Tab. 4) in der Nahrung ist bekannt, daß die Größe $\mu\text{Ci}^{90}\text{Sr}/\text{gCa}$ maßgebend für die Toleranzkonzentration ist. Für ^{137}Cs in Milch wurde der Wert für Trinkwasser eingesetzt, welcher dem täglichen Milchkonsum angepaßt werden darf. Aus den Tab. 2 und 3 geht auch hervor, daß die gemessenen Mittelwerte relativ zu den MPC für ein «unbekanntes Nuklidgemisch» viel höher sind als für bestimmte Isotope. Dies rührt

daher, daß diese MPC-Werte durch das jeweilige gefährlichste Isotop des unbekanntes Gemisches bestimmt sind. Eine Analyse ergibt dann meistens, daß dieses Isotop nur zu einem kleinen Bruchteil vorhanden ist. Die eingetragenen MPC-Werte für die Bevölkerung gelten deshalb nur für ein unbekanntes Gemisch mit gewissen Einschränkungen, die aber für «Fallout» von Atombomben zutreffen.

Die Analyse der Meßergebnisse für das Jahr 1966 zeigt weiter, andere Jahre sind analog, daß in keinem Moment die Bevölkerung nach dem heutigen Stand der Kenntnisse irgendwie gefährdet war. Die gemessenen Aktivitäten stammen praktisch vom weltweiten Aus-

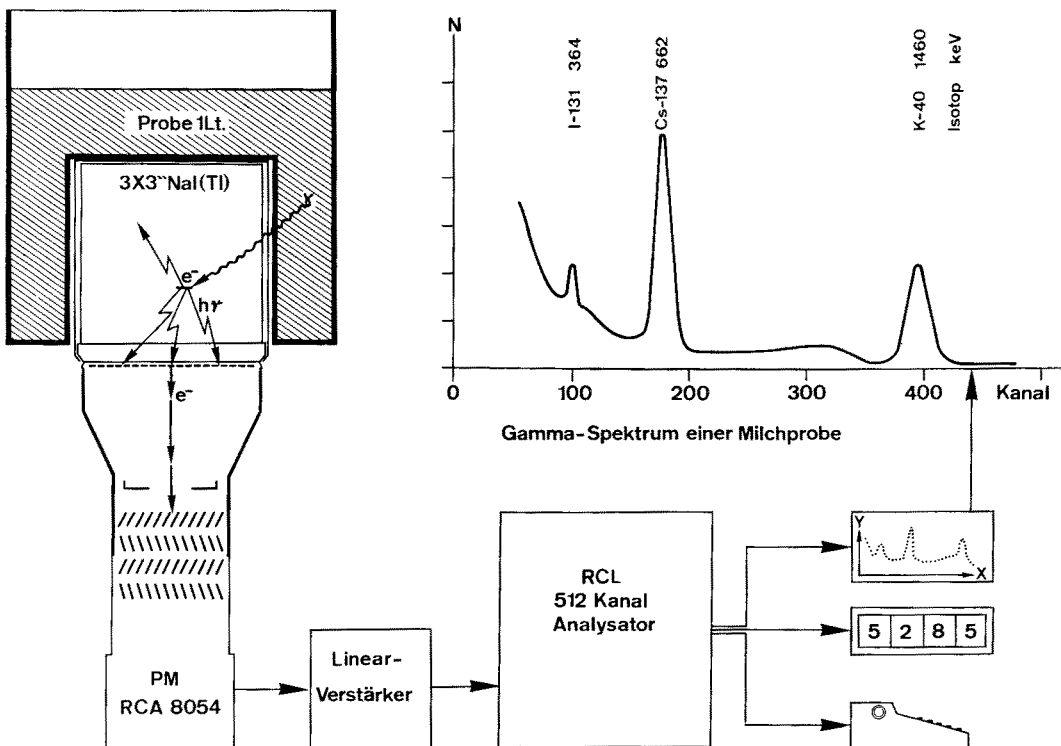


Abb. 2 Meßanordnung für Gamma-Analysen (NaI)

fall der Atombombentests. Ohne Unfälle ist auch eine unzulässige Verseuchung durch radioaktive Nuklide aus «Abfällen» ausgeschlossen, indem die SSVÖ die Abgabe von radioaktiven Stoffen an unser Lebensmilieu rigoros einschränkt. Der Fall «Radioaktive Verschmutzung im biologischen Milieu» ist ein Modell dafür, wie durch frühzeitige gesetzliche Bestimmungen eine unzulässige Verseuchung verhindert werden kann.

4. Meßtechnik

Da sich die MPC verschiedener Nuklide um Größenordnungen unterscheiden können, ist es unerlässlich, Analysen des radioaktiven Gemisches in unserem Lebensmilieu durchzuführen. Nur dadurch ist es möglich, die Aktivität und damit die Gefährdung des Menschen durch die einzelnen inkorporierten Nuklide genau zu bestimmen. Die meisten Isotope senden für sie charakteristische γ -Strahlen aus. Deshalb bietet die γ -Spektroskopie gegenüber anderen Methoden oft wesentliche Vorteile. Bei guter Energieauflösung erlaubt sie in kurzer Zeit die simultane Bestimmung vieler Nuklide mit genügender Nachweisempfindlichkeit. Da diese Methode in unserem Labor verwendet wird, sollen hier ihre Möglichkeiten aufgezeigt werden. Es gibt nur vereinzelte, in Hinsicht auf eine Radioaktivitätsüberwachung wichtige Isotope (^89Sr , ^{90}Sr , ^{239}Pu usw.) in einem Nuklidgemisch, welche vorwiegend mit chemisch-physikalischen Methoden bestimmt werden müssen.

Wir benützen zur γ -Spektroskopie große Na I(Tl)-Kristalle mit hoher Ansprechwahrscheinlichkeit und verwenden Proben bis zu 1 Liter. Das Schema der Anordnung ist in Abb. 2 gezeichnet.

Ein typisches Spektrum einer verseuchten Milchprobe ist ebenfalls in die Abb. 2 eingezeichnet. Neben dem natürlichen ^{40}K enthält sie ^{137}Cs und ^{131}I (wurde nur einmal im Mai

1966 festgestellt). Für ^{137}Cs liegt die Nachweisgrenze in Milch 400mal und für das wichtige ^{131}I 150mal (für kleine Kinder 10mal) tiefer als die Toleranzgrenze für die Allgemeinheit. Notwendige Meßzeiten für solche Analysen schwach radioaktiver Proben betragen Stunden. Dadurch wird diese Technik zu einem wichtigen Mittel der Radioaktivitätsüberwachung und gestattet in vielen Fällen die Nuklidbestimmung und deren Aktivität. Sind aber zu viele radioaktive Nuklide in einer Probe vorhanden, wie bei einem Normalfissionsproduktgemisch, dann wird die skizzierte Methode unzureichend. Sie gestattet zwar immer noch wertvolle Aussagen über die vorkommenden Nuklide, erlaubt aber deren Identifikation und Aktivitätsbestimmung eventuell nur nach vielen zeitlich auseinanderliegenden, langwierigen weiteren Messungen und büßt damit an Aktualität ein. Ein NaI- γ -Spektrum (Abb. 3) einer Fallout-Probe zeigt diesen Sachverhalt. Das Spektrum enthält viele unaufgelöste γ -Linien vieler Isotope, die nur mit viel besserer Auflösung unmittelbar identifiziert werden können (chemische Analysenmethoden sind möglich, aber aufwendig an Zeit und Arbeit). Wie Abb. 3 zeigt, tragen oft mehrere Isotope zu einer Linie bei. Da der γ -Übergang von 364 keV des ^{131}I relativ «isoliert» ist, kann dieses wichtige Isotop meistens auch in einem komplizierten Spektrum bestimmt werden. Die im Spektrum der Abb. 3 oben angeschriebenen identifizierten Isotope stammen von einer hochauflösenden γ -Spektroskopie, die nun beschrieben wird.

An die Stelle des NaI-Kristalles (Abb. 2) tritt eine Ge(Li)Diode, gefolgt von einer aufwendigeren Elektronik. Dadurch wird eine hohe Energieauflösung und außerordentlich gute Energiebestimmung möglich. Selbst kleine Halbleiterzähler benötigen deswegen nur etwas höhere Probeintensitäten oder längere Meßzeiten (P. Winiger und andere [1968])¹, ergeben aber hochaufgelöste Spektren. Diese

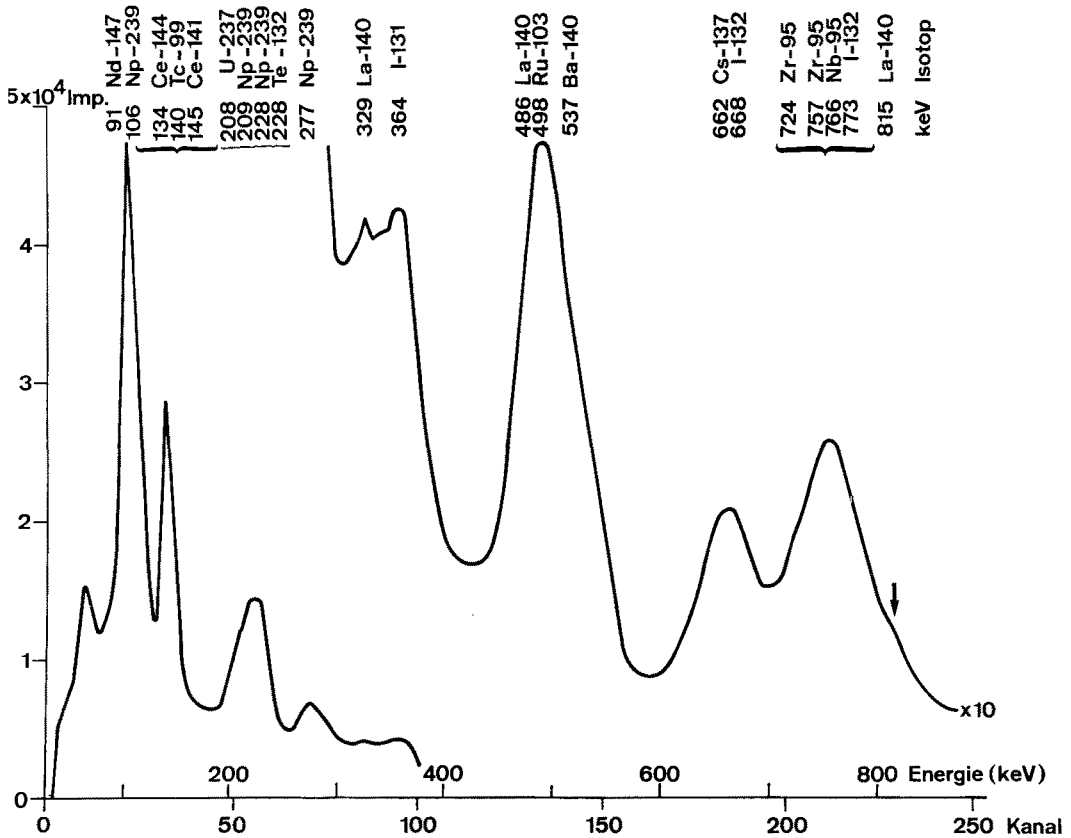


Abb. 3 γ -Spektrum einer Fallout-Probe der französischen Bombe vom 9. September 1968, gemessen am 17. September 1968 mit einem NaI $3 \times 3''$

eignen sich zur automatischen Analyse, selbst auf kleineren Rechenanlagen. Abb. 4 zeigt einen Ausschnitt (270–500 keV) des γ -Spektrums von Abb. 3. Die Messung erfolgte mit einer Ge(Li)-Planardiode von $21,5 \times 18 \times 8$ mm³, einem Vorverstärker Tennelec-202-BLR und einem Nuclear-Data-4096-Kanal-Analysator. Die Energieauflösung des Detektors und der von L. Ribordy entwickelten Elektronik erreichte Werte um 2 keV bei der 1332-keV- γ -Linie von ⁶⁰Co. Das gespeicherte Spektrum kann durch einen x-y-Präzisions-

plotter gezeichnet, durch eine Schreibmaschine herausgeschrieben oder einem Kartenlocher zugeführt werden.

Jede Linie des Spektrums der Abb. 4 kann einem bestimmten Nuklid zugeordnet werden. P. Winiger und andere² (1969) haben eine Analysenmethode ausgearbeitet, welche die Identifikation der in der Probe vorhandenen Nuklide gestattet, deren Aktivitäten bestimmt und weitere Berechnungen gestattet. Dazu sind aber sorgfältige Eich- und Testmessungen notwendig. Die Methode

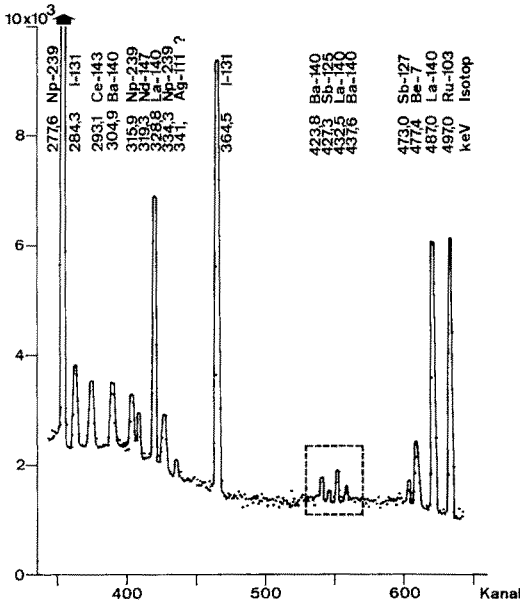


Abb. 4 Ausschnitt aus dem γ -Spektrum einer Fallout-Probe der französischen Bombe vom 9. September 1968, gemessen am 17. September 1968 mit Ge(Li)-Planardiode (3 cm^3)

gestattet selbst intensitätsschwache Linien auszuwerten, wie sie als Beispiel in Abb. 4 durch das gestrichelte Rechteck umrahmt sind. Durch diese automatische Datenverarbeitung wird die hochauflösende γ -Spektroskopie zu einem unentbehrlichen Hilfsmittel jeder Radioaktivitätsüberwachung und ergänzt andere Methoden aufs vortrefflichste. Nach Testexplosionen wurden beispielsweise bis zu 60- γ -Linien identifiziert und zu-

geordnet, unter anderem auch Röntgenlinien zu I, Xe, Pr, Pu und Np. ^{155}Eu , ein Spaltisotop von 1,81 a Halbwertszeit mit einer Spaltausbeute von $\sim 0,2\%$ konnte sogar quantitativ bestimmt werden, ebenso die neutroneninduzierten kurzlebigen Nuklide ^{239}Np und ^{237}U .

5. *Schlussbemerkungen*

Wenn auch nur Teilaspekte der in der Schweiz praktizierten Überwachungsmethoden und Teilergebnisse der Messungen vorgetragen werden konnten, so sollte doch daraus hervorgegangen sein, daß unser biologisches Milieu bezüglich Radioaktivität gründlich untersucht wird und daß es «radioaktiv sauber» ist. Externe Bestrahlungsdosen konnten in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden. Die Lage könnte sich sprunghaft ändern, wenn Atombomben- oder schwere Reaktorunfälle unser Land betreffen. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist aber äußerst klein. Gerade die Sicherheitsvorkehrungen in Atomanlagen sind enorm und haben zum Beispiel beim Reaktorzwischenfall in Lucens vom 21. Januar 1969 voll gespielt. Ein vom Bundesrat ernannter Alarmausschuß wird in solchen Fällen die notwendigen Maßnahmen zum Schutze der Bevölkerung vorschlagen oder treffen. Darauf näher einzutreten, würde den Rahmen dieses Vortrages sprengen.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. O. Huber, Physikalisches Institut der Universität, 1700 Fribourg

Diskussion:

Prof. Halden, Graz, ist beeindruckt von den Schutzmaßnahmen, die in der Schweiz getroffen werden. Auch wenn ein Unfall geschehen

sollte, sind doch Möglichkeiten geboten, durch Ionenaustauscher radioaktive Elemente aus der Milch zu entfernen.