

KFK-61

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

MAI 1961

KFK 61

STRAHLENMESSABTEILUNG

DIE KARLSRUHER ANLAGE ZUR MESSUNG VON RADIOAKTIVITÄT IM MENSCHEN
(„GANZKÖRPERZÄHLER“)

H. KIEFER
R. MAUSHART

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
in der Helmholtz-Gemeinschaft
Hauptabteilung Bibliothek und Medien



KERNREAKTOR

BAU- UND BETRIEBS-GESELLSCHAFT M. B. H.

KARLSRUHE

Die Karlsruher Anlage zur Messung von Radioaktivität im Menschen (»Ganzkörperzähler«)

Von H. Kiefer und R. Maushart Aus der Strahlenmeßabteilung des Kernforschungszentrums Karlsruhe

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt nach einem kurzen Überblick über die verschiedenen Typen von Ganzkörperzählern Aufbau, Organisation und Leistungsfähigkeit der Karlsruher Anlage, die Anfang Januar 1961 in Betrieb genommen wurde.

Wozu braucht man Ganzkörperzähler?

Ganzkörperzähler (im Englischen »Whole Body Counter« oder »Human Body Counter«) sind Meßanlagen, die zur in vivo-Bestimmung der Gammastrahlung und der Betabremsstrahlung dienen, die aus dem menschlichen Körper austritt. Bedarf für solche Geräte besteht im wesentlichen auf zwei Gebieten. Das eine Gebiet ist der Strahlenschutz. Jeder, der mit offenen radioaktiven Isotopen umgeht, sieht sich der Möglichkeit ausgesetzt, solche Isotope zu inkorporieren, d. h. in seinen Körper aufzunehmen. Deshalb sind regelmäßige Überprüfungen auf inkorporierte Aktivitäten notwendig. Schon Spuren von Fremdaktivitäten im menschlichen Körper zeigen an, daß irgendwelche Fehler in der Arbeitsmethodik vorliegen, die beseitigt werden müssen. Neben diesen laufenden Untersuchungen ist es wichtig, bei allen, auch kleinen Zwischenfällen so schnell wie möglich festzustellen, ob der Betroffene Radioaktivität aufgenommen hat. Maßnahmen zur Dekorporierung sind nämlich meist nur dann wirksam, wenn sie unmittelbar nach der Inkorporierung eingeleitet werden.

Außer der eigentlichen Inkorporation können radioaktive Isotope durch Einwirkung von Neutronen auch im Körper direkt erzeugt werden (neutroneninduzierte Kernumwandlungen der im Körper vorhandenen inaktiven Elemente). Die Strahlung dieser meist kurzlebigen Isotope (z. B. Natrium 24 mit 15 Stunden Halbwertszeit kann als Anhaltspunkt für die Neutronendosis benützt werden.

Die zweite Anwendung des Ganzkörperzählers liegt auf medizinischem Gebiet. Von den etwa vierzig unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten sollen hier nur Stoffwechseluntersuchungen mit radioaktiven Spurenelementen und die Bestimmung des Kalium-Gehalts des menschlichen Körpers durch Ausmessung der Strahlung des Kalium-Isotops ^{40}K genannt werden. (Das Kalium findet sich nur im Muskel-, nicht im Fettgewebe des Körpers. Man hat so eine Methode, um den Fettgehalt zu bestimmen, der lediglich aus dem Gewicht eines Menschen nicht ohne weiteres hervorgeht.)

Die Grenze zwischen Strahlenschutz und Medizin kann natürlich nicht bei allen Anwendungen scharf gezogen werden. Gemeinsames Interesse liegt beispielsweise bei der Bestimmung des Gehaltes an Cäsium 137 in möglichst vielen Personen aller Altersstufen und Wohngebiete vor, um die großräumigen Auswirkungen von Kernbombentests zu untersuchen. Die hier gegebene kurze Übersicht läßt bereits erkennen, daß es kein »bestes« Meßgerät zur Erfassung der Radioaktivität im Menschen gibt. Die Auslegung des Geräts muß jeweils der einzelnen Aufgabe angepaßt werden. Je genauer man den Zweck kennt, der mit den Messungen verfolgt werden soll, um so besser und wirkungsvoller läßt sich die Anlage projektieren.

Verschiedene Typen von Ganzkörperzählern

Als Detektoren für Ganzkörperzähler verwendet man heute so gut wie ausschließlich Szintillationszähler, die sich nur in der Wahl des Szintillationsmediums unterscheiden. Nur bei den ersten Anlagen dieser Art wurden auch Ionisationskammern benützt (z. B. R. M. Sievert in Schweden).

Die eine Möglichkeit besteht in der Verwendung von flüssigen Szintillatoren. Diese Methode wurde im wesentlichen in Los Alamos (E. C. Anderson) angewandt. Man kann mit Flüssigszintillatoren, bei denen der Szintillator selbst relativ billig ist, sehr große zählempfindliche Volumina schaffen. Das bedeutet ein großes geometrisches Ansprechvermögen für die aus dem menschlichen Körper kommende Strahlung und damit eine hohe Empfindlichkeit und hohe statistische Genauigkeit schon bei Zählzeiten von etwa einer Minute. Dem steht als Nachteil die relativ schlechte Energieauflösung gegenüber, die eine Unterscheidung einzelner Nuklide erschwert. Die Wartung der Anlage ist schwierig, da die Szintillationsflüssigkeit meist feuergefährlich ist und öfter erneuert werden muß. Ein typisches Beispiel eines Flüssigszintillationszählers ist der sogenannte »Genf-Zähler«, der diesen Namen von seinem ersten öffentlichen Auftreten bei der Ausstellung der 2. Internationalen Atomkonferenz 1958 in Genf erhielt. Derselbe Zähler steht jetzt bei der US Army Medical Research Unit in Landstuhl und dient hauptsächlich zur Untersuchung der Auswirkung von Kernbombenversuchen in Europa. Für diese Aufgabe (genaue ^{137}Cs -Bestimmung) kann auf hohe Energieauflösung ohne weiteres verzichtet werden.

Die zweite Möglichkeit ist die Verwendung von einem oder mehreren großvolumigen Natriumjodid-Kristallen als Detektoren. Diese Methode wurde vor allem in Argonne (L. D. Marinelli) entwickelt. NaJ-Kristalle sind teuer und nur in begrenzter Größe herstellbar. Das bedeutet gegenüber dem Flüssigszintillationszähler geringeres verfügbares Zählvolumen und damit kleineres geometrisches Ansprechvermögen. Dafür hat man den Vorteil einer maximal hohen Energieauflösung. NaJ-Kristalle werden dann zur Anwendung kommen, wenn man es zunächst mit unbekanntem Isotopen zu tun hat und aus der Energie der Strahlung die Art des Isotops erfahren möchte. Deshalb ist diese Art von Zählern besonders für Strahlenschutz zwecke geeignet, wo Personen untersucht werden, die mit vielerlei radioaktiven Stoffen umgehen. Weiterhin sind NaJ-Kristalle die beste Lösung, um den Ort eines radioaktiven Isotops im Körper zu bestimmen. Das ist vor allem in der Medizin bei Erforschung von Stoffwechselvorgängen der Fall. Man wird oft sogar so weit gehen müssen, daß man den Kristall kollimiert, d. h. so abschirmt, daß nur Strahlen aus einem ganz bestimmten und eng umgrenzten Feld in den Kristall gelangen können. Das setzt natürlich das geometrische Ansprechvermögen herab, so daß in solchen Fällen mit relativ hohen Aktivitäten gearbeitet werden muß. (Eine Sonderausführung gestattet es, die Kristalle definiert am Körper entlang zu bewegen, um die Aktivitätsverteilung im Körper aufzunehmen. Man nennt solche Anlagen »Scanner«.) Ein typisches Beispiel für eine Anlage mit mehreren NaJ-Kristallen ist die Karlsruher Anlage, die weiter unten näher beschrieben wird.

Die dritte Möglichkeit sind die sogenannten Plastikszintillatoren, die in ihren Eigenschaften eine Mittelstellung zwischen festen Kristallen und Flüssigszintillatoren einnehmen. Sie haben kein so hohes Auflösungsvermögen wie NaJ-Kristalle, lassen sich aber dafür fast in beliebiger Größe und auch in beliebigen Formen herstellen. Die Grenze ist durch Licht-eigenabsorption und die wachsenden Anpassungsschwierigkeiten an die Photomultiplier gegeben. Ganzkörperzähler mit Plastikszintillatoren sind vor allem in Leeds in England

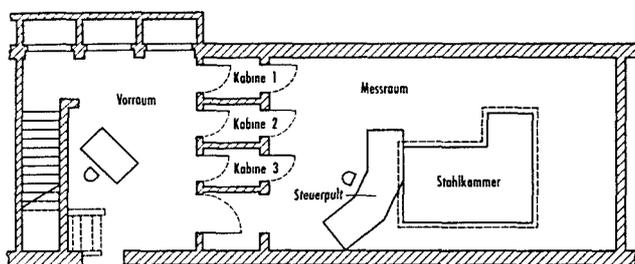


Abb. 1: Grundriß der zur Anlage gehörigen Räume im Kellergeschoß des Strahlenschutzgebäudes. Im Erdgeschoß, über eine besondere Treppe mit dem Vorraum verbunden, befindet sich ein Warteraum sowie Dusch- und Waschräume zur Entfernung evtl. äußerer Kontamination.

entwickelt worden (P. R. J. Burch). Ein typisches Beispiel für einen Plastiksintillationszähler ist ein Gerät, das von einer schottischen Firma entwickelt wurde, um den Fettgehalt von geschlachteten Schweinen mit Hilfe des Kaliumgehalts zu bestimmen. Der Plastiksintillator ist hier in Form eines Hohlzylinders von etwa 90 cm innerem Durchmesser angeordnet. An Hand der in 40 sec gewonnenen Ergebnisse über das Fleisch-Fettverhältnis wird der Preis für das Schwein festgelegt. Bei allen Ganzkörperzählern spielt die Höhe des Nulleffekts der Anlage eine wesentliche Rolle. Damit die Zählrate, die durch die Untergrundaktivität des menschlichen Körpers – im wesentlichen ^{40}K und ^{137}Cs – verursacht wird, sich von der Nulleffektsrate meßbar abhebt, müssen umfangreiche Abschirmmaßnahmen getroffen werden, deren Kosten meist mit den Kosten der ganzen übrigen Anlage vergleichbar sind.

Die Karlsruher Anlage

Zielsetzung:

Der Zweck des Karlsruher Ganzkörperzählers stand von vornherein eindeutig fest: er ist ausschließlich für Strahlenschutz Zwecke gebaut und dient auf der einen Seite der Strahlenmeßabteilung des Kernforschungszentrums Karlsruhe zur Überwachung der im Kernforschungszentrum Beschäftigten, die regelmäßig in dieser Anlage auf Inkorporation radioaktiver Isotope untersucht werden. Auf der anderen Seite steht er dem Landesinstitut für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin zur Verfügung, das u. a. die Aufgabe hat, alle in Baden-Württemberg mit radioaktiven Stoffen umgehenden Personen zu überwachen. Dementsprechend wurde Wert darauf gelegt, die Energieauflösung so hoch wie möglich zu treiben, da damit gerechnet werden muß, daß vielerlei gammastrahlende Isotope, die vorher keinesfalls bekannt sind, einzeln oder sogar als Gemisch auftreten können. Dabei ist es von Wichtigkeit, Angaben über die Art des jeweiligen Isotops machen zu können, einmal, um gezielte Gegen-

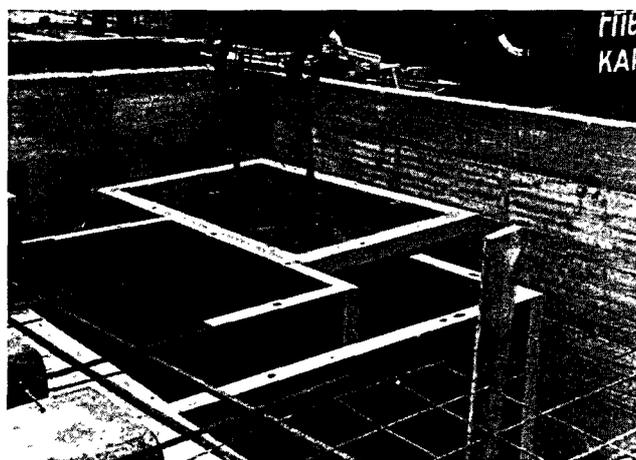


Abb. 2: Einbau der Stahlkammer. Die Deckplatte aus einem Stück und von etwa 10 t Gewicht wird gerade hochgehoben, um auf die Wandplatten aufgesetzt zu werden. Man erkennt den Labyrintheingang und an der Rückwand des Raumes die Öffnungen für die drei Umkleidekabinen.

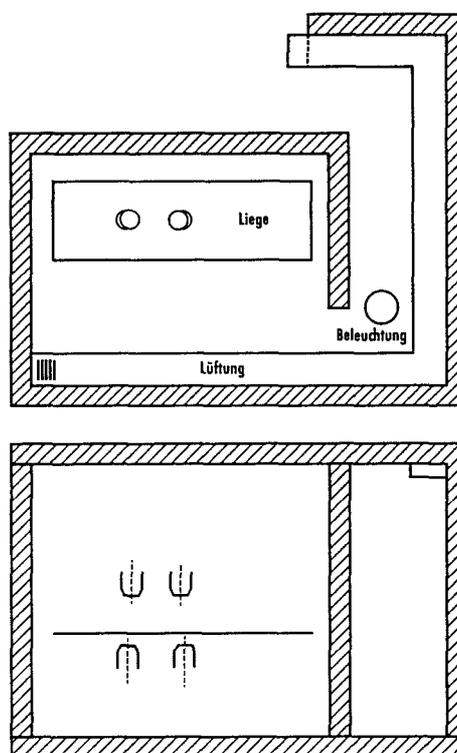


Abb. 3: Grund- und Aufriß der Stahlkammer mit eingezeichnete Normalposition der vier Meßköpfe. Die Beleuchtung ist so angebracht, daß kein Meßkopf von direkter Strahlung getroffen werden kann (Kaliumgehalt in Glas!). Der Belüftungsschacht besteht aus PVC.

maßnahmen einleiten zu können, zum anderen, um die Quelle der Inkorporation auffinden zu können. Trotzdem soll die Zeit für eine einzelne Messung einige Minuten nicht überschreiten. Dazu kommt der Wunsch, zumindest grob, eine Lokalisierung des Strahlers im Körper vornehmen zu können. Vom Organisatorischen her bestand schließlich die Aufgabe, eine größere Anzahl von Personen schnell, reibungslos und soweit wie möglich automatisiert zu untersuchen.

Vorbereitung zur Messung:

Die Person, deren Aktivität untersucht werden soll, kommt zunächst in einen Vorraum, in dem ihre Personalien und die notwendigen Angaben über Umgang mit Radioisotopen, aber auch bestimmte Ernährungsgewohnheiten, z. B. häufiger Milchgenuß oder vegetarische Lebensweise, festgestellt werden. Während dieser Zeit wird von einem fest eingebauten Monitor kontrolliert, ob keine größere äußere Verseuchung vorliegt. Im Meßraum selbst ist ja alles auf niederen Nulleffekt ausgelegt. Es wäre daher sehr unangenehm, wenn äußere Aktivität eingeschleppt würde. Aus diesem Grund, und auch deshalb, weil die Kleidung immer eine gewisse Menge Luft enthält, in der Radon und Radonfolgeprodukte vorhanden sind, geht die auszumessende Person als nächstes in eine der drei Umkleidekabinen. Sie legt dort ihre Kleidung ab und erhält dafür einen Papieranzug sowie Papierschuhe, die beide nach Gebrauch weggeworfen werden. Auf Abruf betritt die zu untersuchende Person den eigentlichen Meßraum und wird nach Feststellung von Größe und Gewicht von einer Assistentin in die Stahlkammer geführt (Abb. 1). Die Stahlkammer besteht zur Reduzierung des Nulleffekts aus 15 cm dicken Stahlplatten (Abb. 2), die von einem alten englischen Kriegsschiff stammen. Das war deshalb nötig, weil in den letzten Jahren gefertigter Stahl fast immer Eigenaktivität enthält, die auf der einen Seite von über den Rost eingeschleppten Kernspaltprodukten, auf der anderen Seite von Isotopen herrührt, die zur Kontrolle des Abbrands in Hochöfen verwendet werden und die ausreicht, um die Messung bereits erheblich zu beeinflussen. Der Stahl ist auf der Innenseite mit 3 mm dicker Folie aus gealtertem Blei ausgekleidet und schließlich mit einer abziehbaren Kunststofftapete versehen. Die Kammer hat einen Labyrintheingang (Abb. 3),

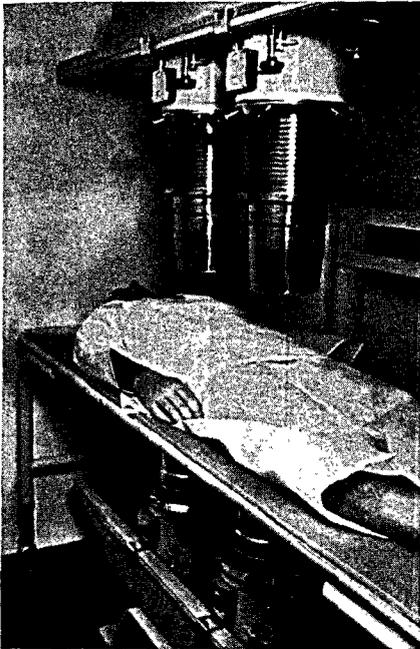


Abb. 4: Liege und Meßköpfe in der Stahlkammer. Die Position der Meßköpfe kann horizontal und vertikal in weiten Bereichen variiert werden, um auch für besondere Meßaufgaben optimal anpaßbar zu sein. Bei Bedarf können auch alle vier Meßköpfe oberhalb oder unterhalb der Liege angeordnet werden. Das Material des ganzen Apparats und vor allem der Meßkopfgehäuse ist besonders auf Freiheit von Radioaktivität hin ausgesucht. Die Versuchsperson trägt die im Text erwähnte Wegwerfkleidung.

um keine Angst vor dem Eingeschlossenensein aufkommen zu lassen. Vom Einbau einer Anlage für Musik oder Fernsehen, wie es im Ausland teilweise üblich ist, haben wir abgesehen. Inzwischen hat die Erfahrung auch bestätigt, daß die auszumessenden Personen dankbar sind, sich während der Meßzeit in völliger Ruhe entspannen zu können.

Wie der ganze Meßraum ist auch die Stahlkammer entlüftet und klimatisiert. Die Zuluft ist gefiltert, um die Radonfolgeprodukte zu entfernen. Der Luftwechsel im Raum ist so groß, daß die Nachbildung der Radonfolgeprodukte aus dem Radon während der Verweilzeit der Luft im Raum nicht allzu weit fortschreitet.

Meßvorgang:

In der Stahlkammer legt sich die auszumessende Person auf eine Liege, mit der sie zwischen vier Szintillationsdetektoren geschoben wird, von denen im Normalfall zwei oberhalb und zwei unterhalb des Körpers angebracht sind (Abb. 4). Diese Detektoren bestehen aus jeweils einem NaJ-Kristall von 4 1/2" Durchmesser und 3 1/2" Dicke. Als Photomultiplier werden 5" EMI-Multiplier verwendet. Die Halbwertsbreite der Cäsium-137-Photoabsorptionslinie liegt für jeden einzelnen Kristall bei etwa 9%. Die Gesamtauflösung aller vier Kristalle hängt natürlich davon ab, wie genau die Photomultiplier jeweils aufeinander abgeglichen werden. Man muß für jeden einzelnen Detektorkopf die Hochspannung so einregulieren, daß die elektrischen Impulse für gleiche einfallende Strahlungsenergie gleich hoch werden. Dieser Abgleich kann am besten mit Hilfe des Vielkanalanalysators durchgeführt werden und ergibt ein Gesamtauflösungsvermögen von weniger als 10%.

Um mit einem Meßvorgang möglichst viele Daten über die ausgemessene Aktivität zu erhalten, mußte die Elektronik entsprechend vielseitig und komplex ausgebildet werden (Abb. 5). Die Impulse werden auf zwei voneinander unabhängigen Wegen zu verschiedenen Datenverarbeitungen geleitet (Abb. 6). Zunächst gehen die Impulse jedes einzelnen Meßkopfs in je einen Verstärker, um anschließend in je einem Zähler angezeigt zu werden. Gleichzeitig werden die Impulse aller vier Detektoren summiert und über einen weiteren Verstärker ebenfalls von einem Zähler wiedergegeben. Die Anzeige dieses Summenzählers ist stets kleiner als die addierten Anzeigen der vier Einzelzähler, da kosmische

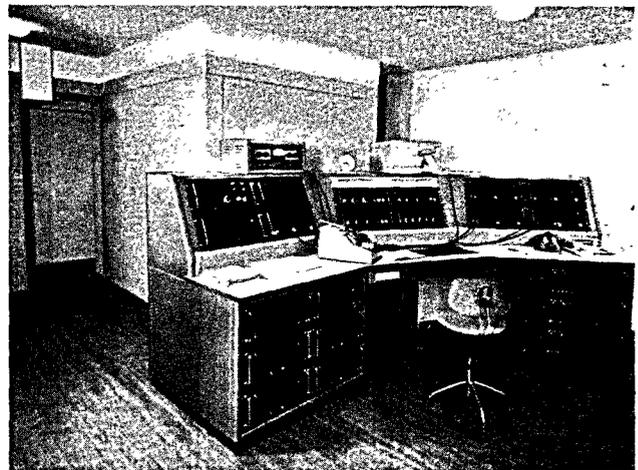


Abb. 5: Bedienungspult und Eingang zur Stahlkammer. In der linken oberen Ecke des Eingangs erkennt man die Zuführung des Belüftungssystems. Im Bedienungspult links oben die Hochspannungsvorsorgung mit dem Abgleichfeld für die einzelnen Meßköpfe; in der Mitte die Einkanal-diskriminatoren; rechts oben die Linearverstärker; links unten Stromversorgungseinheiten, Druckersteuerung und vier Zähleranschübe; rechts unten Zeitsteuerung mit weiteren vier Zähleranschüben. Der 256-Kanalanalysator ist in der Mitte hängend eingebaut. Weiter sind die beiden Drucker und ein Ratemeter zur Schnellanzeige sichtbar.

Strahlung koinzidente Impulse auslösen kann. Die summierten Impulse gehen weiterhin durch drei Einkanalanalysatoren, die beliebig einstellbar sind. In der Regel werden sie auf die Gammalinie des ¹³⁷Cs, des ⁴⁰K und auf ein beliebiges, der jeweiligen Untersuchungsreihe angepaßtes Isotop eingestellt. Die Ergebnisse aller acht Zähler werden zusammen mit einer laufenden Seriennummer nach Beendigung des Meßvorgangs von einem Drucker als Zahlenkolonnen ausgedruckt.

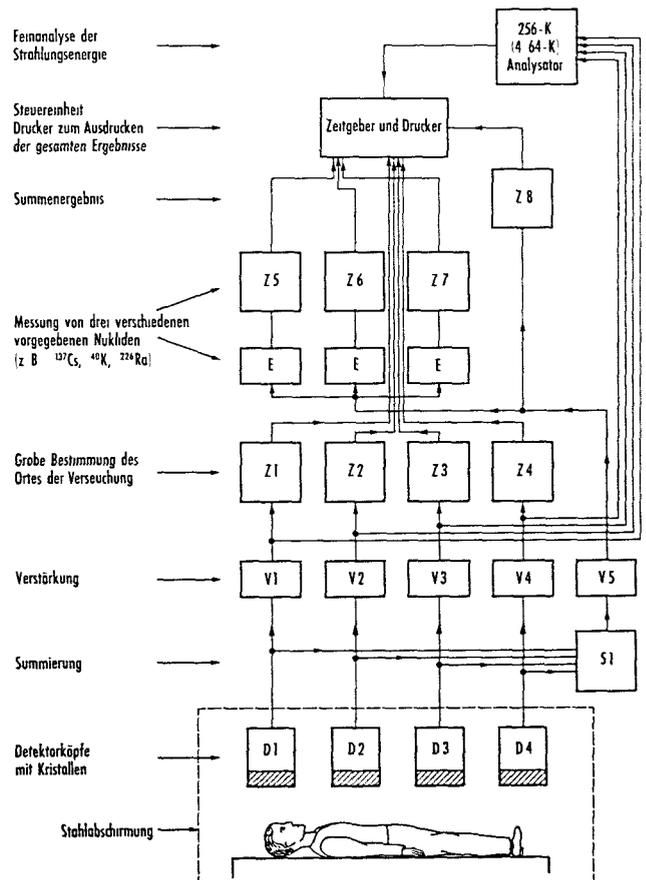


Abb. 6: Schema der elektronischen Impulsverarbeitung. D Detektor V Verstärker S Summierung Z Zähler E Einkanal-diskriminator

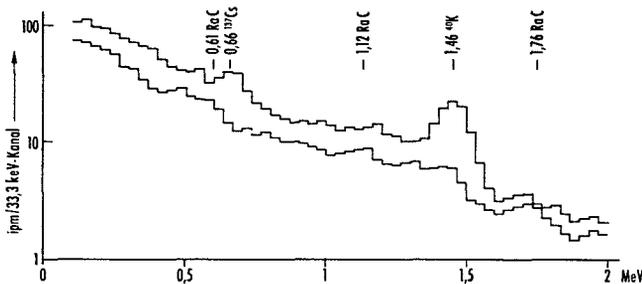


Abb. 7: Spektren für Nulleffekt und »Normalmensch« bei jeweils 10 min Meßzeit. Beide Spektren, bei deren Aufnahmen die Zuluft noch nicht gefiltert war, zeigen Spitzen, die von Radonfolgeprodukten herrühren. Das Spektrum des Normalmenschen läßt außer der ^{40}K -Spitze bei 1,46 MeV auch deutlich die ^{137}Cs -Spitze bei 0,66 MeV erkennen, die durch inkorporierten Kernbomben-Fallout verursacht wird und einer ^{137}Cs -Aktivität im Körper von etwa $1 \cdot 10^{-8}$ c entspricht.

Der zweite Weg für die Impulse führt in einen volltransistorisierten 256-Kanal-Analysator, der wahlweise so geschaltet werden kann, daß entweder alle Impulse summiert ein gemeinsames Spektrum ergeben, oder daß in jeweils einem Viertel des Speichers das Spektrum jedes einzelnen Kopfes getrennt aufgenommen wird. Das letztere ist zum Abgleich der vier Köpfe und zur schnellen Lokalisierung von irgend-einem Fehler in einem der Detektoren nützlich. Das Ergebnis der Vielkanal-Energieanalyse wird ebenfalls als Zahlenkolonne ausgedruckt. Man ersieht demnach aus den Zahlen des ersten Druckers mit einem Blick: die Gesamtaktivität, aus der Höhe der Impulsrate der einzelnen Köpfe die ungefähre Lage der Aktivität im Körper und aus den Angaben der drei Energiekanäle die Aktivität bestimmter Isotope. Die Feinanalyse der Strahlungsenergie erfolgt durch das Spektrum des 256-Kanal-Analysators.

Nach Beendigung der Meßzeit wird die auszumessende Person wieder von der Assistentin in der Stahlkammer ab-

geholt. Beim Verlassen des Meßraums bekommt sie ihre beiden Druckerstreifen mit den Ergebnissen mit und muß sie im Vorräum abgeben, wo sie direkt in die betreffende Karteikarte eingeklebt werden. Damit sind Verwechslungen weitgehend ausgeschlossen.

Nulleffekt und Nachweisempfindlichkeit:

Zum Abschluß sollen noch einige für diese Anlage spezifische Daten genannt werden. Der gesamte Nulleffekt für alle Kristalle beträgt im Energiebereich von 0,1–2 MeV 2000 Imp/min. Ohne die Stahlabschirmung wäre dieser Nulleffekt im gleichen Energiebereich 57 mal größer, d. h. 114000 Imp/min. Ein »Normalmensch«, also jemand, der nicht beruflich mit radioaktiven Isotopen zu tun hat, fügt diesem Nulleffekt etwa 1000 Imp/min hinzu. Das entspricht etwa 2% der aus dem menschlichen Körper austretenden Gammastrahlung. Daraus geht hervor, daß schon die natürliche Radioaktivität im Menschen in nur 1 Minute Meßzeit mit einem statistischen Fehler von einigen Prozent bestimmt werden kann. Für die Aufnahme des Energiespektrums sind im allgemeinen 10 Min. Meßzeit völlig ausreichend (Abb. 7).

Bibliographie

Sievert, R. M.: »Measurements of low-level radioactivity, particularly the gamma-radiation from living subjects.« Proc. Intern. Conf. Peaceful Uses Anderson, E. C.: »In vivo gamma measurements at very low levels with 4π liquid scintillation detectors.« IRE Trans. Nuclear Sci. NS-3, No. 4, Atomic Energy, Geneva, 1955, Paper 792, 187–195, 1955–1956 (Vol. 13), 96–102 (1956). — Miller, C. E., H. A. May, L. D. Marinelli: »The use of low level scintillation spectroscopy in the evaluation of radioactive contamination of the human body.« AECU-4156 (1958). — Rundo, J.: »Body radioactivity measurement as an aid in assessing contamination by radio-nuclides.« A/CONF. 15/P/1467 (1958). — Blanc, A., A. Lansiait, L. Jeanmaire: »Mesure du rayonnement gamma du corps humain. Mesure du rayonnement naturel — Détection et mesure de la contamination radioactive.« Bull. inform. sci. et techn. (Paris) No. 30, 23–34 (1959). — Burch, P. R. J.: »Body gamma-ray monitoring: some basic considerations.« Brit. J. Radiol. Supplement No. 7, Leeds Conference, April 1956, 20–26 (1957). — Bird, P. M., P. R. J. Burch: »The relative performance of large volume plastic and liquid scintillators.« Physics in Medicine and Biology 2, 217 to 228 (1958).
Wegen Platzmangel können hier nur einige genannt werden.