Zeitschrift: Helvetica Physica Acta

Band: 10 (1937)

Heft: V

Artikel: Experimentelle Beiträge zum Problem der Luftäquivalenz bei der Gammastrahlenmessung

Autor: Schulze, R. / Minder, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-110752

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Experimentelle Beiträge zum Problem der Luftäquivalenz bei der Gammastrahlenmessung[1])

von **R. Schulze**, Berlin und **W. Minder**, Bern (Radiuminstitut).

(2. VIII. 37.)

1. Allgemeines.

Der absoluten Messung von Röntgen- und Gammastrahlenmengen kommt eine hohe praktische Bedeutung zu. Insbesondere ist es die medizinische Dosimetrie dieser Strahlungen, welche an die Wahl des Messverfahrens und der Einheit besondere Anforderungen stellt:

1. sollte zur Messung von den verschiedenen Wirkungen der Strahlung die Ionisation verwendet werden, da sie der biologischen Wirkung am nächsten steht und relativ einfach gemessen werden kann,
2. musste eine Einheit geschaffen werden, die von einem bestimmten Messverfahren unabhängig war,
3. sollte diese Einheit von der Frequenz der gemessenen Strahlung unabhängig sein, und wenn möglich
4. auf Einheiten des absoluten Massystems zurückgeführt werden können.

Als Einheit der Röntgenstrahlenmenge wurde deshalb das int. Röntgen aufgestellt „als diejenige Strahlenmenge, die bei voller Ausnützung der Sekundärelektronen und unter Vermeidung der Wandwirkungen in der Ionisationskammer in 1 cm^3 atmosphärischer Luft von 0^0 C und 76 cm Hg Druck eine solche Leitfähigkeit bewirkt, dass eine Ladung von 1 elektrostatischen Einheit bei Sättigungsstrom gemessen wird".

Bei Bestrahlung einer geschlossenen Ionisationskammer setzt sich aber der gemessene Strom, wenn deren Wandstärke so gewählt wird, dass von aussen keine Sekundärelektronen ins Innere der Kammer gelangen können, aus zwei Anteilen zusammen, nämlich aus dem Stromanteil, hervorgerufen durch Ionisation von seiten der Sekundärelektronen der Kammerwandung und aus dem Stromanteil, bewirkt durch die Sekundärelektronen der zur Messung verwendeten Luft.

---

[1]) Aus dem Institut für Strahlenforschung der Universität Berlin. Direktor Prof. Dr. W. Friedrich.

*

Nach der qualitativen Theorie von K. W. F. Kohlrausch[1]) ist der erstere Anteil W proportional der Absorption der sekundären Wandelektronen in der Luft der Messkammer:

$$W \sim J \frac{\mu_1}{\mu_1'} (1 - e^{-\mu_2' D})$$

worin J die Strahlung vor dem Durchgang durch die Kammerwand mit dem Absorptionskoeffizienten für die Gammastrahlung μ_1 und demjenigen der durch Streuung entstandenen Elektronenstrahlung μ_1' bedeutet, und μ_2' den Absorptionskoeffizienten der Wandelektronen in der Luft mit der Dicke D darstellt.

Der Ionisationsanteil der in der Luft entstehenden Elektronen L ergibt sich in ähnlicher Weise zu

$$L \sim \mu_2 J D - \frac{\mu_2}{\mu_2''} J (1 - e^{-\mu_2'' D})$$

wobei μ_2 den Absorptionskoeffizienten der Gammastrahlung in Luft darstellt und μ_2'' denjenigen der Luftelektronen in Luft bedeutet, und die Strecke D den Weg darstellt, den die Luftelektronen in der Kammer maximal durchlaufen können.

Die gemessene Gesamtionisation ist proportional der Summe der beiden, wie besonders durch die zahlreichen experimentellen Arbeiten von W. Bragg[2]) und R. T. Beatty[3]) dargetan werden konnte.

Der erstere Stromanteil steigt mit zunehmendem Kammervolumen (D) rasch an bis zu einem konstanten Grenzwert, welcher erreicht wird, wenn die Distanzen der Messkammer nach allen Richtungen grösser sind als die Reichweite der sekundären Wandelektronen (zweites Glied des Klammerausdruckes = 0).

Der zweite Anteil dagegen wird unterhalb der Reichweite der sekundären Luftelektronen langsam ansteigen, um oberhalb der kritischen Dimension der Messkammer (zweites Glied des Klammerausdruckes = 0) mit steigendem Volumen derselben (steigendem D) linear zu wachsen.

Die Definition der Röntgeneinheit („r") schliesst nun den erstern Anteil vollständig aus. Die Messanordnung muss also so gebaut sein, dass nur die Ionisation der Sekundärelektronen der Luft gemessen wird. Diese Bedingung ist für Röntgenstrahlen in

[1]) Probleme der Gammastrahlung. Vieweg 87/88.
[2]) Phil. Mag. **20**, 385, 1910.
[3]) Proc. Soc. Roy. **85**, 230, 1911.

relativ einfacher Weise zu realisieren dadurch, dass an einem ausgeblendeten Strahlenbündel gemessen wird, welches durch eine offene Blende in eine Kammer eintritt, deren Dimensionen grösser sind als die Reichweite der Sekundärelektronen der Luft. Diese betragen beispielsweise für Röntgenstrahlen von 70 kV Spannung 5,4 cm, für solche von 150 kV 14 cm (vide z. B. H. HOLTHUSEN[1])).

Im Hinblick auf die Frequenzunabhängigkeit der „r"-Definition und mit Rücksicht auf die Anwendung der Gammastrahlung in der Therapie war es naheliegend, zu deren Messung dieselbe Einheit zu verwenden wie für die Röntgenstrahlen. Bei der harten Gammastrahlung des Ra B + Ra C steigt nun aber die Reichweite der Sekundärelektronen der Luft auf einige Meter an, und so wurde eine Absolutmessung im Sinne der Einheit mit der Fasskammer fraglich. Eine solche Kammer müsste einen Durchmesser von ca. 10 m aufweisen. Dazu müsste die Messung an einem ausgeblendeten Strahlenbündel vorgenommen werden, eine Bedingung, die schon an sich nicht leicht einwandfrei zu realisieren ist. Und da schliesslich zur Absolutmessung ein homogen durchstrahlter Raum erforderlich ist, so müssten zu einer Messung mit der Fasskammer wegen der notwendig grossen Distanz ausserordentlich grosse Radiummengen zur Verfügung stehen. Ferner wären zur Ausblendung des Strahlenbündels Hg- oder Pb-Mengen von mehreren Zentnern erforderlich.

Trotz diesen Schwierigkeiten fehlt es nicht an Versuchen, die Gammastrahlung mit Hilfe von Fasskammern oder Freiluftkammern zu messen (vgl. K. G. ZIMMER[2]). Diese haben aber bisher sehr verschiedene Resultate ergeben. Auch die neuesten derartigen Messungen von G. W. C. KAYE und W. BINKS[3]) haben nicht sehr befriedigende Werte gezeigt. Auf eine Besprechung der Fehlermöglichkeiten dieser Messungen wird später noch näher eingegangen werden.

Die Verhältnisse der Elektronenerzeugung, wie sie durch die Arbeiten von K. W. F. KOHLRAUSCH, R. T. BEATTY und W. BRAGG (l. c.) näher untersucht worden sind, lassen aber noch eine weitere Möglichkeit der Absolutmessung zu, worauf schon von diesen Autoren teilweise aufmerksam gemacht worden ist.

Wählt man nämlich bei der Konstruktion der Ionisationskammer für das Wandmaterial und das Gas Stoffe, die denselben

---

[1]) Grundlagen und Praxis der Röntgenstrahlendosierung.
[2]) Radiumdosimetrie, Georg Thieme, 1936.
[3]) Strahlenth. **56**, 608, 1936.

Massenabsorptionskoeffizienten haben, also in den Gleichungen auf S. 404

$$\frac{\mu_1}{\varrho_1} = \frac{\mu_2}{\varrho_2}\,; \qquad \frac{\mu_1'}{\varrho_1} = \frac{\mu_2'}{\varrho_2}\,; \qquad \mu_2' = \mu_2''$$

wobei ϱ_1 die Dichte des Wandmaterials und ϱ_2 diejenige der Luft darstellen soll, so nimmt die Gesamtgleichung (Summe beider Anteile) die einfache Form an:

$$I \sim J\,\frac{\mu_1\,\mu_2'}{\mu_1'}\,D \sim J\,\frac{\mu_1}{\varrho_1}\,\varrho_2 D \sim C_1\varrho_2 \sim C_2 D$$

d. h. in einer derartigen Kammer ist die Ionisation I bei konstantem Kammervolumen (D) proportional dem Gasdruck, oder aber bei konstantem Druck (ϱ_2) proportional dem Kammervolumen. Ein solches Material emittiert also bei Bestrahlung mit Gammastrahlen pro Masseneinheit dieselbe Anzahl von Sekundärelektronen derselben Reichweite wie die Luft. Man nennt ein derartiges Material in bezug auf die zu messende Strahlung *luftäquivalent* (vgl. z. B. E. Albrecht[1])). Am besten eignet sich als luftäquivalentes Material ein Gemisch von 97% Graphit + 3% Si mit der effektiven Ordnungszahl von 7,3. Für die Messung der Gammastrahlen ist im Gegensatz zu den Röntgenstrahlen die Wahl des Luftwändematerials weniger wesentlich, da die Comptonstreuung die Absorption bei weitem übersteigt, und deshalb alle leichtatomigen Stoffe bis etwa zu Al dieselben Massenabsorptionskoeffizienten aufweisen.

Zur Anwendung der Luftäquivalenzbedingung auf die Absolutmessung müsste noch die Bedingung eingehalten werden, dass das Luftwändematerial den streuenden Luftraum voll ersetzt, d. h. die Dicke dieses Materials muss so gewählt werden, dass sie der Reichweite der Sekundärelektronen in Luft äquivalent ist. Dann müsste eine derartige Kammer denselben Strom messen, wie wenn das von ihr umschlossene Messvolumen allseitig mit freier Luft umgeben wäre. Eine luftäquivalente Kammer mit genügender Wanddicke misst also im Sinne der Definition.

Die Luftäquivalenz ist eine für Röntgenstrahlen experimentell festgelegte Tatsache. Abgesehen von den Angaben von K. W. F. Kohlrausch (l. c.) gibt es darüber keine quantitative Theorie[2]). Dagegen konnte an Hand von sehr zahlreichen Ver-

[1]) Strahlenth. **45**, 365, 1932. — G. C. Laurence, Radiol. **25**, 166, 1935.

[2]) Ansätze bei E. Albrecht (l. c.), J. Murdoch und E. Stahel, Strahlenth. **53**, 102, 1935.

suchen von R. T. BEATTY (l. c.), H. FRICKE und O. GLASSER[1]), R. GLOCKER[2]), R. BRAUN und H. KÜSTNER[3]), W. FRIEDRICH[4]), H. BENKEN und J. JÄGER[5]) und E. MIEHLNICKEL und B. RAJEWSKY[6]) bewiesen werden, dass eine Kammer aus luftäquivalentem Material auch tatsächlich denselben Strom misst, wie wenn die Kammer von wirklichen Luftwänden umgeben wäre. Diese Kontrolle war für Röntgenstrahlen verhältnismässig einfach durchzuführen, weil es möglich war, die mit der luftäquivalenten Kammer gemessenen Strahlenmengen mit der Fasskammer zu kontrollieren.

Die absolute Messung der Gammastrahlung mit Hilfe der luftäquivalenten Kammer wurde versucht von W. FRIEDRICH und K. ZIMMER[7]), weiter in einer grossen Versuchsreihe von W. FRIEDRICH und R. SCHULZE[8]), neuerdings von J. MURDOCH und H. STAHEL[9]), G. W. C. KAYE und W. BINKS (l. c.), H. SMEREKER[10]), W. V. MAYNEORD und J. E. ROBERTS[11]), und W. MINDER[12]). Die Bestimmung der sog. Imc-Einheit nach R. SIEVERT[13]) in „*r*"-Einheiten ergab für eine Filterung von 0,5 mm Pt im Mittel den Wert von 8 *r*/Stunde. Die einzelnen Bestimmungen weichen teilweise noch merklich voneinander ab. Für die medizinische Dosimetrie der Gammastrahlung ist aber die genaue Kenntnis dieser „Dosenkonstanten" von grundlegender Bedeutung. Es musste deshalb als eine der Hauptaufgaben der Strahlenmessung angesehen werden, die durch die Messung mit luftäquivalenten Kammern gewonnenen Absolutwerte der Gammastrahlung und damit der Dosenkonstanten mit Hilfe einer der Definition entsprechenden Messanordnung sicherzustellen.

2. Versuche mit „wandlosen" Kammern.

Die Aufgabe unserer Versuche war, ähnlich wie dies früher für Röntgenstrahlen bewiesen werden konnte, festzustellen, ob die Messungen der Gammastrahlung mit Hilfe luftäquivalenter Kammern auch tatsächlich den Forderungen der Definition der Absolutmessung gerecht werden. Diese Frage kann grundsätzlich auf drei verschiedene Arten entschieden werden:

1. Durch Konstruktion einer Fasskammer, deren Grösse der Reichweite der Sekundarelektronen der Gammastrahlung in Luft

---

[1]) Amer. J. Rönt. **13**, 453, 1925.
[2]) Z. Phys. **77**, 653, 1932.
[3]) Strahlenth. **33**, 273, 1929.
[4]) Strahlenth. **11**, 20, 1920.
[5]) Z. tech. Phys. **7**, 563, 1926.
[6]) Strahlenth. **50**, 499, 1934.
[7]) Strahlenth. **51**, 26, 1934.
[8]) Strahlenth. **54**, 553, 1935.
[9]) Strahlenth. **53**, 102, 1935.
[10]) Strahlenth. **58**, 267, 1937.
[11]) Br. J. Rad. X, 365, 1937.
[12]) Acta Rad., XVIII, 1937.
[13]) Acta Rad. Suppl. XIV, 1932.

angepasst ist, und Messung mit derselben an einem ausgeblendeten Strahlenbündel.

2. Durch Kompression der Luft bis zu einem Grenzwert, bei dem die Dichte der Luft derjenigen des luftäquivalenten Materials vergleichbar wird.

3. Durch Messung der Ionisation in einer praktisch „wandlosen" Kammer, die allseitig mit einem so grossen Luftmantel umgeben ist, dass der Bildung der Sekundärelektronen in Luft und deren Reichweite Rechnung getragen wird.

Der erste Weg wurde schon verschiedentlich beschritten. Auf die dabei auftretenden Schwierigkeiten ist bereits verwiesen worden. Wie die Messungen von A. Bruzau[1]), G. Failla und P. S. Henshaw[2]) und W. V. Mayneord[3]) gezeigt haben, ist es nicht gelungen, einigermassen übereinstimmende Ergebnisse zu erzielen. Auch die neuesten Messungen von G. W. C. Kaye und W. Binks (l. c.) mit Hilfe von sog. Freiluftkammern haben keine sichern Werte ergeben.

Auch das Verfahren mit Hilfe der Verdichtung der Luft ist schon mehrfach angewendet worden. Da sich aber die Dichten der Grössenordnung nach ca. wie 1 : 1000 verhalten, so war es bisher nicht möglich, den Anschluss an das luftäquivalente Material wirklich herzustellen. Ferner ist es bei den Versuchen mit Gammastrahlen von T. H. Laby und G. W. C. Kaye[4]), W. Wilson[5]) und D. C. H. Florence[6]) im Gegensatz zu zahlreichen Versuchen mit Röntgenstrahlen (l.c.) nicht gelungen, eine lineare Zunahme der Ionisation mit steigendem Druck zu finden.

Wir entschlossen uns zum dritten Verfahren. Schon A. S. Eve[7]) konnte zeigen, dass für dünnwandige Kammern aus leichten Substanzen (Al, Papier) der gemessene Strom nicht merklich grösser war als in freier Luft, wogegen Kammern aus schwererem Material (Fe) wesentlich höhere Stromwerte ergaben.

Wie die neueren Untersuchungen von W. Friedrich und R. Schulze (l. c.), K. Zimmer und H. Griffith[8]), E. Albrecht[9]), A. Z. Reitz[10]) und neuerdings von G. W. C. Kaye und W. Binks (l. c.), W. V. Mayneord (l. c.) und H. Smereker (l. c.) übereinstimmend ergeben haben, nimmt der Ionisationsstrom einer Kammer bestimmter Grösse aus luftäquivalentem Material mit zunehmender Dicke der Kammerwand für reine Gammastrahlung

---

[1]) Ann. Phys. **11**, 1, 1929.
[2]) Radiology **17**, 1, 1931.
[3]) Proc. Roy. Soc. **146**, 867, 1934.
[4]) Phil. Mag. **16**, 879, 1908.
[5]) Phil. Mag. **17**, 216, 1909.
[6]) Phil. Mag. **25**, 172, 1913.
[7]) Phil. Mag. **24**, 432, 1912.
[8]) Strahlenth. **52**, 671, 1935.
[9]) Strahlenth. **42**, 328, 1931.
[10]) Z. Phys. **69**, 259, 1931.

zunächst zu bis zu einem Grenzwert, der bei ca. 3 mm Graphitäquivalent erreicht wird. Von ca. 6 mm an beginnt die Stromkurve mit steigender Kammerwanddicke infolge der Absorption der Gammastrahlung wieder abzusinken. Dieses Ergebnis wurde übereinstimmend dahin interpretiert, dass die Reichweite der Sekundärelektronen in luftäquivalentem Material (Graphit) 3 bis 4 mm betrage, und somit eine Kammer mit dieser Wandstärke definitionsgemäss messe. Die gute Übereinstimmung der Resultate rechtfertigte diese Interpretation. Der Wert von 3—6 mm luftäquivalentem Material (Graphit) steht auch in guter Übereinstimmung mit der angenommenen Reichweite der Sekundärelektronen in Luft von ca. 4 m (Dichteverhältnis Luft : Graphit = 1 : 1380).

Der experimentelle Beweis der „Luftäquivalenz" kann nach den obigen Ausführungen also in der Weise erbracht werden, dass die Ionisationsströme einer „wandlosen" Kammer mit denjenigen einer „luftäquivalenten" Kammer derselben Grösse verglichen werden. Bei Distanzen zwischen Kammer und Präparat, die ausserhalb der Reichweite der Sekundärelektronen in Luft liegen, müssten, wenn die Überlegungen über die Luftäquivalenz richtig sind, beide Kammern denselben Ionisationsstrom messen.

Bei der Aufstellung eines allseitig strahlenden Radiumpräparates genügender Stärke und einer „wandlosen" Ionisationskammer setzt sich der in der Kammer gemessene Strom aus den folgenden Anteilen zusammen:

1. Ionisation der Sekundärelektronen in Luft, erzeugt in der Kammer selbst.

2. Ionisation der Sekundärelektronen, die in Luft ausserhalb der Kammer erzeugt werden, und die innerhalb ihrer Reichweite die Kammer ganz oder teilweise durchlaufen.

3. Ionisation der primären Gammastrahlung. Dieser Anteil ist sehr gering.

4. Ionisation durch sekundäre Elektronen, die im Präparat und dessen Umhüllung entstehen, und die auf ihren Weg in die Kammer gelangen.

5. Da die Kammer ein Minimum an Material notwendig macht, so kommt noch hinzu die Ionisation durch Sekundärelektronen, die im Material der Kammer gebildet werden.

Als sekundäre Effekte werden ferner mitgemessen:

6. Die Ionisation der von den Raumwänden produzierten Sekundärelektronen, die in die Kammer gelangen.

7. Sekundäre Ionisation durch Elektronen nach 1—6 hervorgerufen durch gestreute Gammastrahlung je nach den vorliegenden Raumverhältnissen.

Da definitionsgemäss nur die Ionisation der Anteile 1 bis 3 gemessen werden soll, so müssen zur Unterdrückung resp. möglichsten Einschränkung der Anteile 4 bis 7 die notwendigen Vorsichtsmassregeln getroffen werden. Zweifellos sind die Unstimmigkeiten der Versuche, die auf der obigen Grundlage ausgeführt wurden und der Messungen mit der Fasskammer und der Freiluftkammer grossenteils darin erblicken, dass all diesen Komplikationen nicht die genügende Beachtung geschenkt worden ist.

a) Die Messvorrichtung:

Um die Störungseffekte in der Messapparatur auf ein Minimum zu reduzieren, wurde für die Messungen die einfachste Form des Elektrometers gewählt. Dieses bestand (Fig. 1) aus einer

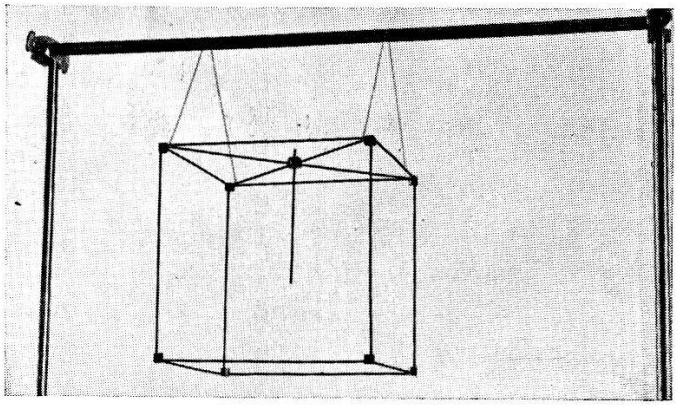

Fig. 1.
Rahmen und Innenelektrode des verwendeten Elektrometers.

würfelförmigen Ionisationskammer von 20 cm Kantenlänge mit Wänden aus dünnstem Seidenpapier (7 μ). Das Seidenpapier wurde auf der Innenseite mit einem weichen Zeichenstift graphitiert und die Leitfähigkeit mit einem Milliampèremeter kontrolliert. Der Rahmen des Elektrometers bestand aus Graphitstäben von 2 mm Durchmesser. Als Messystem wurde eine Graphitinnenelektrode von 2 mm Durchmesser verwendet, an der ein Al-Blättchen von 2 μ Dicke befestigt war. Die Aufladung geschah von aussen. Beobachtet wurde mit Hilfe eines Fernrohres, wobei zur Vermeidung der Parallaxe zwei Einstellmarken auf dem vorderen und hinteren Zellophanfenster der Kammer zu Deckung gebracht werden konnten. Ausser dem Al-Blättchen, das für Gammastrahlen praktisch ebenfalls luftäquivalent ist, wurde zum Kammerbau nur luftäquivalentes Material verwendet.

Die Kammer konnte sehr leicht allseitig mit 4 mm luftäquivalentem Material (Graphit, Pertinax) umgeben werden, ohne dass an den Messbedingungen dadurch etwas geändert werden musste. Ferner gestattete die Apparatur auch, nur 5 Wände mit luftäquivalentem Material zu bedecken und die Vorderwand frei zu lassen

b) Vorversuche:

Die Messanordnung wurde erstmals in einem Raum von $5 \times 5 \times 4$ m aufgestellt. Damit wurden die Ionisationsverhältnisse für verschiedene Kammerwanddicken von 0—5 mm für verschiedene Abstände zwischen Kammer und Präparat von 1, 2 und 4 m aufgenommen. Es zeigte sich, dass die Kurve bei 1 m Abstand für 0 bis 3 mm luftäquivalentes Material um 18% abfiel, während bei einem Abstand von 2 m der Abfall noch 12%, bei 4 m noch immer 8% betrug. Dieses Ergebnis stand im Widerspruch zu den Messungen von A. Reitz (l. c.), R. Schulze (l. c.) und andern und wurde vorerst mit dem Effekt der Sekundärelektronen des Präparatfilters erklärt. Ein Magnetfeld von 1000 Gauss am Präparat änderte dieses Ergebnis aber nicht in messbarem Masse, so dass für den Effekt nur die Wirkungen des Versuchsraumes in Frage kommen konnten. Der Raum war für die Messungen also viel zu klein.

c) Versuche in der Hochschule für Leibesübungen:

Von der Verwaltung der Hochschule für Leibesübungen wurde uns für unsere Versuche eine Turnhalle mit den Abmessungen $24 \times 14 \times 8$ m zur Verfügung gestellt.

Die Kammer wurde an Seidenfäden in der Mitte des Raumes aufgehängt und nach den Seiten und nach unten verspannt. Die Aufladung geschah mit Hilfe einer fahrbaren Leiter. Der Sitz des Beobachters befand sich seitlich an der Wand in 4 m Höhe in 7 m Entfernung von der Kammer.

Das Präparat von 670 mg[1]) war mit einem Seidenfaden an der Decke aufgehängt und mit einem Gewicht nach unten verspannt. Es konnte leicht auf verschiedene Abstände verschoben werden.

Die Aufnahme der Stromkurven für verschiedene Abstände zeigte hier mit veränderlicher Wandstärke der Kammer ein ganz anderes Ergebnis. So stieg bei einem Abstand zwischen Kammer und Präparat von 80 cm der Ionisationsstrom mit zunehmender

[1]) In verdankenswerter Weise von der Auergesellschaft, Berlin, zur Verfügung gestellt.

Kammerwand um 14% an, um von 3 mm Wandstärke an konstant zu verlaufen. Bei ca. 3 m Entfernung zwischen Kammer und Präparat sank die Ionisation mit zunehmender Wanddicke um 4% und bei ca. 6 m sogar um 7% ab. (Fig. 2.) Diese Verhältnisse waren beliebig reproduzierbar. Das Ergebnis war zunächst nicht ohne weiteres zu verstehen, da die Absorption zur Erklärung dieses Effektes allein bei weitem nicht ausreichte. Man hatte erwartet, dass die Stromzunahme bei steigender Kammerwanddicke mit wachsendem Abstand geringer werden müsse.

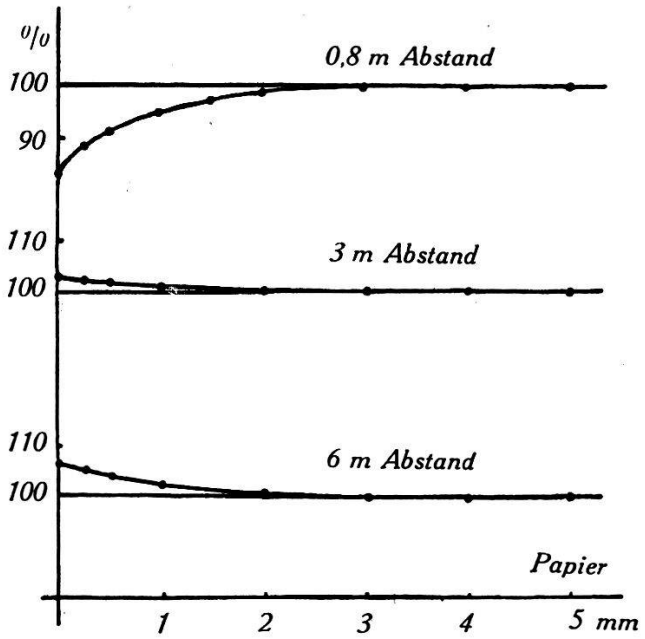

Fig. 2.
Änderung des Ionisationsstromes mit variabler Kammerwanddicke für verschiedene Abstände zwischen Kammer und Präparat. Filter 7 mm Pb. Hochschule für Leibesübungen.

Es wurde nun eine grössere Versuchsreihe angestellt, bei der die Verhältnisse der Ionisationsströme der nackten Kammer zu der luftäquivalenten Kammer für verschiedene Abstände aufgenommen wurden. Als Präparate wurden verwendet 10 mg, 60 mg, 350 mg, 410 mg und 670 mg[1]), als Präparatfilter 1,0 mm Pt und 7 mm Pb. Die Messungen wurden abwechselnd ohne, mit 5 und mit 6 luftäquivalenten Wänden vorgenommen. Die Fehlergrenze der Einzelmessung für einen bestimmten Abstand konnte unter $\pm 2\%$ gehalten werden. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen sind in Fig. 3 und 4 dargestellt und zwar als Verhältnis $I_S/I_{\text{Äqu.}}$ (Ionisationsstrom bei Seidenpapierumhüllung/Ionisationsstrom bei luftäquivalenter Umhüllung). Das mit 5 Wänden gewonnene Er-

[1]) In dankenswerter Weise von der Auergesellschaft, Berlin, zur Verfügung gestellt.

gebnis ist in Fig. 3 als Verhältnis I_5/I_6 gestrichelt eingezeichnet. Tabelle 1 zeigt eine derartige Messreihe. Man erkennt aus ihr auch, dass der mit luftäquivalentem Material gemessene Ionisationsstrom dem r^2-Gesetz innerhalb $\pm$ 1,4% gehorcht.

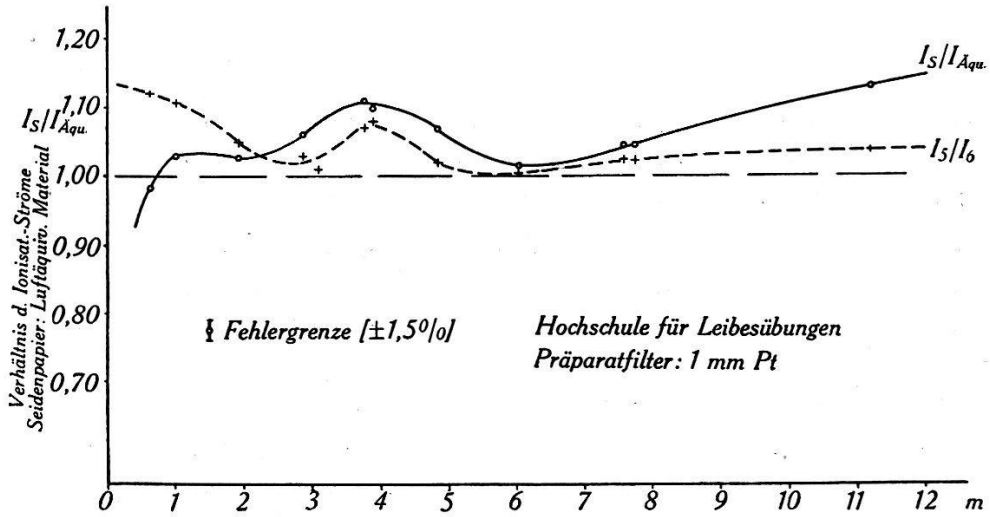

Fig. 3.

Verhältnis des Ionisationsstromes der Seidenpapierkammer zu dem der luftäquivalenten Kammer ($I_S/I_{Äqu.}$) für eine Präparatfilterung von 1 mm Pt. Das Verhältnis der mit fünf Wänden (Vorderwand frei) umkleideten Kammer zu der mit 6 Wänden (I_5/I_6) ist gestrichelt eingezeichnet. Hochschule für Leibesübungen.

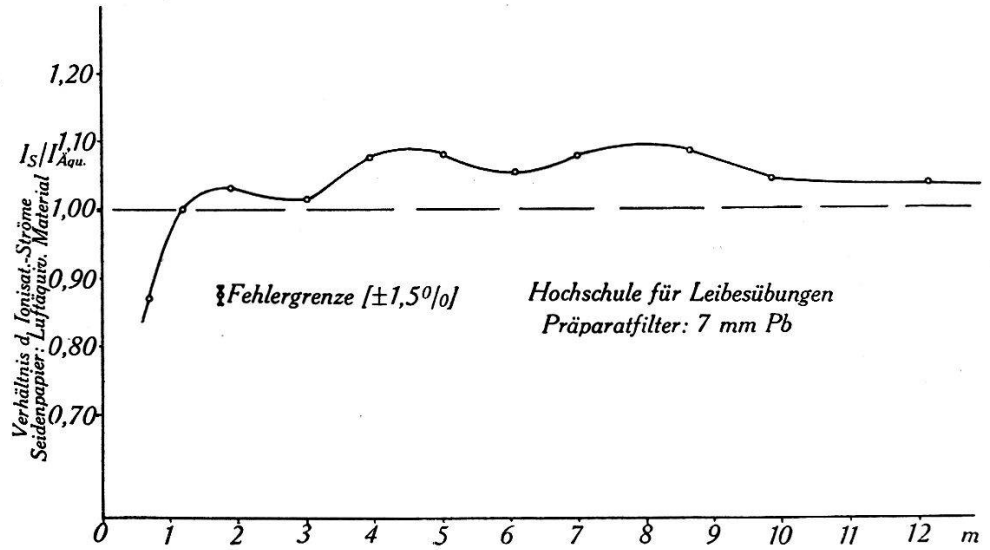

Fig. 4.

Verhältnis des Ionisationsstromes der Seidenpapierkammer zu dem der luftäquivalenten Kammer ($I_S/I_{Äqu.}$) für eine Präparatfilterung von 7 mm Pb. Hochschule für Leibesübungen.

Der Verlauf des Ionisationsstromes der Seidenpapierkammer, verglichen mit dem der luftäquivalenten Kammer, zeigt bei relativ schwacher Filterung der Gammastrahlung folgendes: Der Strom der Seidenpapierkammer ist bis zu Abständen von ca. 1 m zwi-

Tabelle 1.

Menge mg	Abstand m	Strom = $1/t$ 0 Wände	Strom = $1/t$ 6 Wände	$J \cdot r^2$ 0 Wände	$J \cdot r^2$ 6 Wände	I_0/I_6
10	0,70	8,05	9,25	3,94	4,53	87,2
60	1,20	30,1	30,1	43,4	43,4	100,0
350	1,91	42,4	41,5	154,5	151,4	102,0
350	3,04	16,4	16,2	151,7	149,6	101,3
350	3,96	10,13	9,45	158,9	148,2	107,2
670	5,03	12,07	11,2	30,5	28,3	107,8
670	6,08	8,18	7,75	30,2	28,6	105,5
670	6,99	6,24	5,78	30,5	28,2	108,0
670	8,65	4,06	3,74	30,4	28,0	108,6
670	9,87	3,08	2,94	30,0	28,6	104,7
670	12,12	1,98	1,90	29,1	27,9	104,2

schen Kammer und Präparat zunächst kleiner als der der luftäquivalenten Kammer, eine Tatsache, die schon bei früheren Versuchen mehrmals beobachtet worden ist. Zwischen 1 und 2 m besitzt die Kurve ein angedeutetes kleines Maximum. Ein weiteres Maximum liegt bei ca. 4 m. Bei 6 m Abstand zwischen Kammer und Präparat hat sich die Grösse des Stromes der nackten Kammer derjenigen der luftäquivalenten Kammer bis auf 1,5% genähert. Von hier an steigt die Differenz der beiden fast linear an bis auf ca. 11 m, wo sie ca. 12% beträgt.

Bei relativ sehr starker Filterung (7 mm Pb, nur noch die Gammastrahlung des Ra C) hat die Kurve einen etwas andern Verlauf. Die Maxima zwischen 1 und 2 und 3 und 5 m sind ebenfalls vorhanden. Ebenso das Minimum bei 6 m. Dann steigt die Kurve wieder auf 8% Differenz zwischen 7 und 9 m, um dann bei noch grösseren Distanzen auf ca. 4% Differenz abzusinken.

Die endgültige Diskussion der Messresultate soll erst am Schluss der Arbeit erfolgen. Hier soll nur erwähnt werden, dass sich die Erwartung, dass die beiden Kurven bei grösseren Abständen zusammenlaufen würden, bei diesen Versuchen nicht erfüllte. Der Beweis der „Luftäquivalenz" war somit nicht erbracht. Das Minimum aller aufgenommenen Kurven bei ca. 6 m deutete jedoch ein solches Zusammenlaufen an, und das spätere Ansteigen wurde mit Streueffekten des Versuchsraumes zu verstehen gesucht. Auch dieser Raum von 24 × 14 × 8 m erwies sich für die Untersuchungen bei grösseren Distanzen als zu klein.

d) Versuche in der Deutschlandhalle:

Einer der grössten geschlossenen Räume, die auf dem Kontinent zur Verfügung stehen, ist die Deutschlandhalle in Berlin. Sie wurde uns über die Neujahrstage 1936/37 in zuvorkommender Weise von der Direktion (Ortmann) zur Verfügung gestellt.

Der Arenaraum der Deutschlandhalle hat angenähert folgende Dimensionen: 100 × 60 × 25 m.

Das Präparat. Es konnte aus den Angeboten der Industrie (Degea, Berlin) und verschiedener Radiumstationen von Berlin eine Menge von ca. 2,2 g Radiumelement zusammengestellt werden. Dieselbe bestand aus ca. 100 verschiedenen Präparaten, die teilweise gefiltert waren, teilweise aber nur in Glasgefässe gefasst vorlagen. Die gesamte Radiummenge wurde in ein Holzgefäss von 20 × 20 × 10 cm, welches mit Watte ausgekleidet war, verschlossen und das Holzgefäss mit einem Mantel von allseitig 5 mm Pb umgeben. Dadurch wurde eine Gesamtfilterung von 7 mm Pb erreicht und die durch die verschiedene Filterung resultierenden Strahlengemische ausgeglichen. Das Holzgefäss wurde an zwei Drahtseilen seitlich an der obersten Ballustrade der Halle aufgehängt und mit einem Bleigewicht an einem Seil nach dem Boden hin belastet. Für die grossen Abstände von 6—40 m konnte das Präparat als „punktförmig" angesehen werden.

Die Messapparatur. Entsprechend den sehr viel grösseren Abständen musste für die Versuche in der Deutschlandhalle eine neue Messapparatur gebaut werden. Das Prinzip der Seidenpapierkammer mit luftäquivalentem Rahmen wurde beibehalten. Als Wandbelag eignete sich wegen seiner ausserordentlich hohen Zerreissfestigkeit in besonderem Masse japanisches Seidenpapier. Die Kammer hatte eine Grösse von 40 × 40 × 40 cm. Sie wurde an Seidenschnüren an einem Rahmen an der Decke der Halle aufgehängt und nach unten und nach den Seiten mit Seidenfäden verspannt.

Als luftäquivalenter Mantel wurde eine Kammer von 50 × 50 × 50 cm aus 6 mm starker Pappe gebaut, welche an einem Seilzug von unten über die Seidenpapierkammer hochgezogen werden konnte.

Die Spannungsquelle bestand aus einem Transformator mit Ventil und Kondensator für 3000 Volt. Die Zuführung der Spannung geschah nach Fig. 5 und konnte an einem Fadenzug vom Boden aus leicht betätigt werden.

Beobachtet wurde in 30 m Abstand von der Kammer von der seitlichen Sitzreihe der Halle mit einem 42-fachen Fernrohr[1]). Der Ablauf wurde wie früher an einer parallaxefreien Skala auf den Zellophanfenstern der Kammer gemessen.

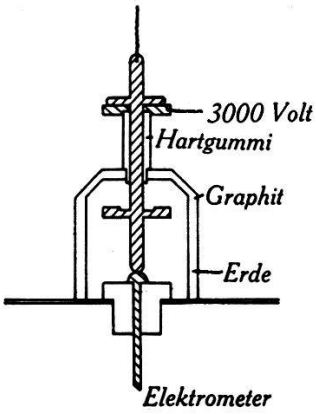

Fig. 5.
Spannungszuführung an das Elektrometer in der Deutschlandhalle.

Die Messung. Da uns die Halle nach erfolgtem Aufbau der Apparatur nur kurze Zeit zur Verfügung stand, musste Tag und Nacht fortlaufend gemessen werden. Die Messungen erfolgten für jeden Punkt abwechselnd mehrere Male mit freier Kammer und mit luftäquivalenter Kammer. Die Resultate werden durch Tabelle 2 veranschaulicht:

Tabelle 2.

Abstand m	Strom $= 1/t$ 0 Wände	Strom $= 1/t$ 6 Wände	$J \cdot r^2$ 0 Wände	$J \cdot r^2$ 6 Wände	I_0/I_6
6,30	4,13	3,96	16,4	15,7	104,3
9,93	1,63	1,61	16,1	15,9	101,2
9,93	4,48	4,37	44,2	43,1	102,5
10,00	4,63	4,51	46,3	45,1	102,6
12,65	2,95	2,81	47,2	45,0	105,0
14,88	2,195	2,14	48,6	47,3	102,6
14,97	2,15	2,11	48,2	47,3	101,9
19,94	1,17	1,15	46,5	45,7	101,5
22,90	0,966	0,957	47,6	47,2	101,6
24,95	0,782	0,762	48,7	47,4	102,6
29,56	0,533	0,527	46,5	46,0	101,1
39,86	0,327	0,323	52,0	51,3	101,2

[1]) Von der Firma Zeiss, Jena, in dankenswerter Weise zur Verfügung gestellt.

Der Fehler der Mittelwerte für die einzelnen Messpunkte konnte in allen Fällen unter $\pm 2\%$ gehalten werden. Die höchste Abweichung zwischen den Strömen der freien Kammer und der luftäquivalenten Kammer liegt bei 12 m Abstand zwischen Kammer und Präparat. Sie beträgt hier 5%. Die Differenz sinkt mit steigendem Abstand bis auf 1% bei 20 m.

Die Abweichungen der Produkte $J.\,r^2$ betragen bei 6 luftäquivalenten Wänden zwischen Abständen von 6—30 m $\pm 3\%$ vom Mittelwert. Bei 40 m Abstand ist das Produkt ca. 10% höher, eine Tatsache, die wohl mit der bei diesem Abstand schon merklich wirksamen Gammastreustrahlung erklärt werden kann, um so mehr als die Produkte ganz allgemein ein geringes Ansteigen mit steigendem Abstand zwischen Kammer und Präparat zu zeigen scheinen, und bei der extrem grossen Entfernung von 40 m die Weglängen der Streustrahlung von Rückwand und Decke schon nicht mehr wesentlich grösser waren als der Weg der direkten Strahlung.

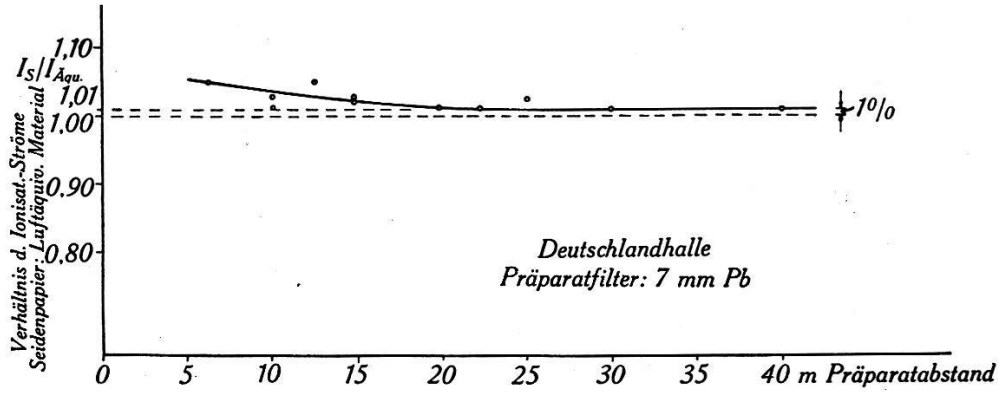

Fig. 6.

Verhältnis des Ionisationsstromes der Seidenpapierkammer zu dem der luftäquivalenten Kammer ($I_S/I_{Äqu.}$) für eine Präparatfilterung von 7 mm Pb. Deutschlandhalle.

Die Kurve des Verhältnisses der beiden Ionisationsströme (Fig. 6) ist eine Mittelwertslinie; bei exakter Verbindung der einzelnen Punkte würde sie von 1,04 bei 6 m auf 1,02 bei 10 m sinken, um dann wieder auf 1,05 bei 12 m anzusteigen, was sicher nicht als reell angesehen werden darf. Ab 15 m sinkt die Kurve dann wieder auf 1,01 ab, zu einem Wert also, der eine praktische Übereinstimmung der beiden Ionisationsströme darstellt.

3. Diskussion der Messresultate.

Vergleicht man die Stromverhältnisse der nackten Seidenpapierkammer und der luftäquivalenten Kammer für verschiedene Abstände (Fig. 3, 4, 6), so zeigt sich folgendes: Für alle Mess-

punkte zwischen 0,6 und 40 m Abstand liegen die Verhältnisse innerhalb einer Variation von $\pm 15\%$. Die Minima der Kurven befinden sich bei geringen Distanzen unterhalb 1 m, die Maxima bei etwa 4 m. Die beiden Kurven der Messungen aus der Turnhalle haben ein deutliches Minimum bei etwa 6 m Distanz, dann steigen sie wieder an. Die Kurve der Messungen in der Deutschlandhalle liegt von ca. 8 m an unter den Kurven der Messungen aus der Turnhalle. Von 15 m an ist sie unter 2% Differenz gesunken.

Die Konstruktion einer wahrscheinlichsten Mittelwertskurve des Stromverhältnisses, die nirgends mehr als die Fehlergrenze von $\pm 2\%$ von wirklich gemessenen Punkten abweicht, beginnt für die nackte Seidenpapierkammer bei 0,5 m bei ca. 0,94 des Stromes der luftäquivalenten Kammer, erreicht bei 1 m Abstand 1,00, hat bei 2 m und 1,025 einen Wendepunkt, steigt weiter auf 1,08 bei ungefähr 4 m und sinkt von 6 m an fast stetig von 1,04 auf 1,01 zwischen 20 und 40 m. Unter 1,00 sinkt die Kurve bei grösseren Abständen nirgends (Fig. 7).

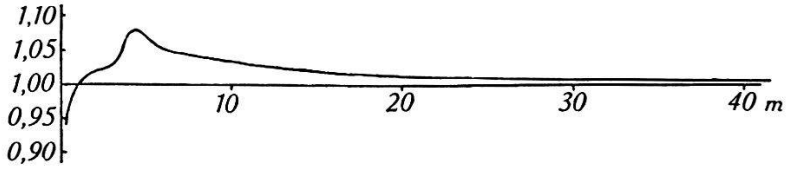

Fig. 7.
Wahrscheinlichster Verlauf des Stromverhältnisses einer sehr dünnwandigen Ionisationskammer zu einer luftäquivalenten Kammer für verschiedene Abstände bis zu 40 m.

Am Ionisationsstrom der luftäquivalenten Kammer ist definitionsgemäss nur die Ionisation der Sekundärelektronen der Kammerwandung und die Ionisation der Sekundärelektronen der Luft innerhalb der Kammer beteiligt. Die luftäquivalenten Wände sollen den streuenden Luftraum um die Kammer nach allen Richtungen voll ersetzen. Das ist die Luftäquivalenzbedingung.

Wie früher (auf Seite 409/410) dargetan worden ist, setzt sich der mit der nackten Seidenpapierkammer gemessene Ionisationsstrom aus mehrern Anteilen zusammen. Davon sind nur drei, nämlich die Ionisation durch Sekundärelektronen der Luft im Innern der Kammer und die Ionisation der Sekundärelektronen ausserhalb der Kammer, die auf ihrem Weg in die Kammer gelangen, sowie der sehr geringe Ionisationsanteil der primären Gammastrahlung mit der Definition der absoluten Messung verträglich.

Die Richtigkeit der Vorstellung über die Luftäquivalenz kann dann als erwiesen gelten, wenn der Ionisationsstrom der luftäquivalenten Kammer und derjenige der „wandlosen" Kammer denselben Wert aufweisen. Dies ist wieder nur der Fall, wenn in dem die nackte Kammer umgebenden Luftraum die volle Reichweite der Sekundärelektronen der Luft zur Ionisation ausgenützt werden kann. Die Distanz Kammer—Präparat muss deshalb mindestens so gross sein wie die Reichweite der Sekundärelektronen in Luft.

Es ist ferner notwendig wegen der Effekte 4 und 6 (Seite 409), die Kammer um mehr als diese Reichweite von allen streuenden Medien zu distanzieren. Um ferner auch die störenden Effekte 7 (Seite 410) auf ein Minimum zu reduzieren, müssen, da die Gammastreuung an den Wänden des Raumes einen messbaren Prozentsatz der eingestrahlten Energie darstellt, die Abstände Präparat—Wand—Kammer ein Mehrfaches des Abstandes Präparat—Kammer betragen. Eine Mitmessung einer geringen Zusatzionisation durch gestreute Gammastrahlung dürfte in geschlossenen Räumen kaum absolut auszuschalten sein. Dazu wären Lufträume von allseitig über 100 m notwendig.

Die Mittelwertskurve unserer gesamten Messungen (Fig. 7) kann wie folgt gedeutet werden:

Unterhalb von Distanzen von ca. 1 m zwischen Kammer und Präparat sind an der Grösse der Ionisation der „wandlosen" Kammer wesentlich zwei Faktoren beteiligt. Der Luftraum zwischen Kammer und Präparat ist zur vollständigen Ausnützung der Reichweite der Sekundärelektronen der Luft zu gering. Daher misst die Kammer einen zu kleinen Ionisationsstrom. Aufgehoben wird dieses Defizit teilweise durch die Bildung von Sekundärelektronen im Präparat, die auf kurze Distanzen in die Kammer gelangen können. Bei ca. 1 m heben sich beide Effekte gegenseitig vollständig auf. Hier misst die Kammer 1,00.

Über die Grössenordnung des Anteils der Sekundärelektronen des Präparates (oder dessen Filterung) orientiert Fig. 3, wo der hohe Wert (gestrichelte Kurve) unterhalb 1 m Abstand vollständig auf diesem Effekt beruht.

Mit wachsendem Luftraum nimmt die Ionisation zu. Sie wird verstärkt durch die direkten Elektronen aus der Umhüllung des Präparates und erreicht bei ca. 2 m Distanz ein erstes Maximum von 1,025.

Bei ungefähr 3 m Abstand wäre die Wirkung der Elektronenemission des Präparatfilters praktisch auf 0 gefallen (siehe Fig. 3).

*

dagegen hat der streuende Luftraum zugenommen. Bei ungefähr 4 m ist die volle Reichweite der Sekundärelektronen der Luft erreicht. Hier müsste also die nackte Kammer denselben Strom messen wie die luftäquivalente Kammer. Da jedoch der Raum zwischen Kammer und Präparat nicht homogen durchstrahlt wird, sondern in der Nähe des Präparates eine wesentlich höhere Strahlungsdichte herrscht als z. B. an der Kammerwand, und da weiter die Richtung der Comptonelektronen nicht eine beliebige ist, sondern die Richtung nach der Kammer hin stark bevorzugt ist, so misst die Kammer hier einen höheren Strom, als wenn die Comptonelektronen nur in der luftäquivalenten Kammerwand ausgelöst werden, in der die primäre Gammastrahlendichte geringer ist, als ausserhalb der Kammer, wo die Luftelektronen zur Ionisation der nackten Kammer teilweise gebildet werden. Dieser Effekt macht nicht ganz 10% der Gesamtionisation aus und findet sich in allen Messungen wieder.

Mit weiter zunehmender Distanz sinkt das Stromverhältnis ab, um bei Distanzen von 7—12 m bei geringer Filterung und kleinem Raum (Turnhalle) wieder anzusteigen, bei starker Filterung abzufallen.

Das Stromverhältnis sinkt mit zunehmender Distanz weiter ab (Deutschlandhalle), erreicht bei 15 m 1,02 und bei 20 m 1,01. Dieser Wert wird für grössere Distanzen ausserhalb der Fehlergrenze nicht mehr überschritten.

4. Schlussfolgerungen.

Innerhalb eines Fehlers von 1% darf die sog. „Luftäquivalenz" für die Gammastrahlenmessung durch unsere Untersuchungen als experimentell bewiesen angesehen werden.

Auf kurze Distanzen unterhalb ca. 10 m messen dünnwandige Ionisationskammern, deren Wanddicke nicht ausreicht, um ca. 4 m Luft voll zu ersetzen, die Gammastrahlung mit merklichen Abweichungen unrichtig und zwar ist die gemessene Ionisation bei kleinen Abständen unterhalb ungefähr 1 m zu klein, bei grössern Abständen zwischen etwa 1 und 10 m zu gross. Die so gemessenen Abweichungen können grösser sein als $\pm$ 10%.

In der Nähe des Präparates bis auf ca. 2 m Distanz werden durch dünnwandige Kammern merkliche Mengen der im Präparat oder dessen Fassung erzeugten sekundären Betastrahlung mitberücksichtigt. Die Reichweite der Sekundärelektronen der Luft beträgt in Luft im Mittel ca. 4 m. Bei diesen Abständen misst eine zu dünnwandige Kammer wegen der Richtungsabhängigkeit der

Sekundärelektronen (im wesentlichen nur Comptonstreuung) einen um ca. 10% zu hohen Ionisationsstrom.

Versuche mit grossen Fass- oder Freiluftkammern sind nur dann erfolgversprechend, wenn die Kammer einen allseitigen Radius von mindestens 4 m aufweist, und von allen Raumwänden und sonstigen streuenden Medien ein Mehrfaches dieser Distanz entfernt ist. Daher ist es vorläufig nur möglich, Absolutmessungen mit luftäquivalenten Kammern auszuführen. Alle andern Methoden enthalten kaum auszuschliessende Fehlerquellen.

Luftäquivalente Kammern messen die Gammastrahlung definitionsgemäss richtig, wenn die Wandstärke des luftäquivalenten Materials einen Luftmantel von allseitig 4 m voll ersetzt (Graphit mindestens 3 mm und höchstens 5 mm). Sie sind für Messungen in kleinen Räumen und auf kurze Distanzen das einzig brauchbare Messgerät. Das gilt ganz besonders für die medizinische Dosimetrie.

Als luftäquivalente Materialien sind alle Stoffe zu verwenden, deren Massenabsorptionskoeffizienten von denjenigen der Luft nicht verschieden sind.

Es sei uns gestattet, den Direktionen der Hochschule für Leibesübungen und der Deutschlandhalle für die freundliche Überlassung ihrer Räume, der Auergesellschaft (Degea, Berlin) sowie den verschiedenen Kliniken in Berlin, die uns Radium für unsere Versuche überlassen haben, bestens zu danken. Unser besonderer Dank gebührt dem Direktor des Institutes für Strahlenforschung der Universität Berlin, Herrn Prof. Dr. W. Friedrich, sowie sämtlichen Mitarbeitern des Institutes[1]) für die tatkräftige Unterstützung bei den Arbeiten, ohne die die Versuche nicht in diesem Ausmass hätten durchgeführt werden können.

---

[1]) Im besonderen haben sich die Herren Dipl.-Ing. G. Voigt, Referent im Reichsgesundheitsamt und Dr. U. Henschke um die Arbeiten in der Deutschlandhalle verdient gemacht.