



Aus dem Universitätsinstitut für physikalische Grundlagen der Medizin
(Direktor: Prof. Dr. Friedrich Dessauer).

Die Tiefenwirkung der Röntgenstrahlen.

Von

F. Dessauer und F. Vierheller.

(Mit 32 Abbildungen.)

I.

Der Weg, welchen die Tiefentherapie mit Röntgenstrahlen macht, führt zu ihren Anfängen zurück. Die Prinzipien, welche in den grundlegenden Arbeiten des Jahres 1904/05¹⁾ und der folgenden Jahre dargelegt worden sind, gelten auch heute. Der Unterschied gegenüber der Vergangenheit besteht hauptsächlich darin, daß sie sich gegenwärtig, dank der fortgeschrittenen Technik, besser verwirklichen lassen, wie ehemals.

In der Tat hat die Zwischenzeit folgende Möglichkeiten gebracht:

Erstens und hauptsächlich die Erzeugung sehr harter Strahlung. Die beste praktisch auf längere Dauer erzielbare Strahlung entsprach damals etwa einer Abschwächung von 19% der eindringenden Intensität pro 1 cm Wasserschicht, während heute als normale Leistung der besten Apparate der Dauerbetrieb mit einer Strahlung gelten kann, welche nur ca. 13% Abschwächung in 1 cm Wasserschicht erleidet. Das bedeutet eine Vervielfältigung der Tiefenwirkung gemessen an der Beanspruchung der Oberfläche. Daß diese Verbesserung sehr bedeutend ist, weit größer als sie bei oberflächlicher Betrachtung der beiden Zahlen erscheint, kommt von der Eigenart der Absorptions- und Streugesetze.

¹⁾ Perthes: Versuche einer Bestimmung der Durchlässigkeit usw. F. d. Röntg. 1904, H. 1. — Dessauer, Beiträge zur Bestrahlung tiefliegender Prozesse. Med. Kl. 1905, Nr. 21. — Derselbe, Eine neue Anwendung der Röntgenstrahlen. Verhandl. d. Deutschen physik. Gesellschaft, 9. Jahrg., Nr. 3. — Derselbe, Die physik. u. techn. Grundlagen der Tiefenbestrahlung. Strahlentherapie 1, 1912, H. 3. — Dorn, Zur Tiefenbestrahlung mit Röntgenstrahlen. M. med. W. 1909, Nr. 14. — Veit, Zusatz zur Arbeit Prof. Dr. Dorns, über: Zur Tiefenbestrahlung mit Röntgenstrahlen. — Dessauer u. Krüger, Nachbehandlung operierter Karzinome mit homogener Bestrahlung. Berl. kl. W. 1908, Nr. 11. — Dessauer, Eine neue Anwendung der Röntgenstrahlen. M. med. W. 1908, H. 24/32. Vgl. auch die verschiedenen Auflagen von Wetterer, Handbuch der Röntgentherapie und zahlreiche andere Arbeiten.

Neuerdings¹⁾ ist in unserem Laboratorium eine Röntgenstrahlung von nur etwa 10% Abschwächung pro Zentimeter Gewebsschicht, die sich im Dauerbetrieb gewinnen läßt, gemessen worden, und es ist keine Frage, daß man über diese Strahlung in absehbarer Zeit in den Betrieben verfügen wird.

Die zweite Errungenschaft der Technik in der Zwischenzeit ist die erhöhte Strahlenausbeute. Man kann von dieser harten Strahlung immerhin Intensitäten erzeugen, die in erträglichen Zeiten die Behandlung eines Falles zulassen. In dieser Beziehung bleibt freilich noch manches zu wünschen übrig, und die Zukunft wird große Fortschritte bringen, d. h. sie wird die notwendige Bestrahlungszeit auf einen Bruchteil der jetzt notwendigen abkürzen.

Der dritte große Fortschritt der Technik besteht darin, daß man die Versuchsbedingungen konstant halten kann. Durch die Erfindung von Röhren und Apparaten, die bei kontrollierbaren gleichen Betriebsbedingungen dieselbe Strahlenart geben, und durch die spektrographische Ausmessung der verwendeten Strahlen nähert man sich einem einigermaßen bekannten Medikamente. Freilich sind dabei die vielen Dosimeter der Vergangenheit gefallen und auch die Frage nach dem Wesen der biologischen Wirkung und der Abhängigkeit dieser Wirkungen von Härte, Intensität und Absorption ist noch weit von der Klärung entfernt. Aber trotzdem kann man praktisch viel besser dosieren, als ehemals, weil sich zu der biologischen Erfahrung jetzt die Konstanz der Versuchsbedingungen bei dem modernen Instrumentarium gesellt.

Noch aber harret das größte, das für die Zukunft der Tiefentherapie entscheidende Problem seiner Lösung, die durch einige Versuche zwar vorbereitet, aber nicht gegeben ist. Das, was man wissen muß, um tiefliegende Krankheitsherde in dem gewollten Maße zu beeinflussen und normale Gewebe dabei zu verschonen, ist eine quantitative Kenntnis der Verteilung der Röntgenstrahlenenergie im menschlichen Körper. Wenn Röntgenstrahlen aus einer gegebenen Fokushautentfernung mit einer gegebenen Kegelöffnung oder Feldgröße durch die Hautoberfläche in den menschlichen Körper eintreten, und wenn dann außerdem noch durch die Kenntnis der Spannung, durch die Beseitigung des störenden Gasinhaltes der Röhre, durch Anwendung bestimmter Filter, am besten durch eine spektrographische Kontrolle die Strahlenqualität bekannt ist, und wenn endlich die Intensität der Einstrahlung auf der Hautoberfläche in irgendeinem Maße gegeben ist — und dazu genügt

¹⁾ Dessauer u. Back, Über Röntgenstrahlerregungen mit sehr hohen Spannungen. Verhandl. d. Deutschen phys. Gesellschaft 21, 1919, 1 u. 10.

in der Praxis bei konstanten Apparaten die gleiche Milliampèrezahl in der Röhre — so weiß der Arzt doch noch nicht, was er eigentlich und hauptsächlich wissen muß: wieviel von der auf die Haut aufstrahlenden Intensität kommt in jeder beliebigen Erstreckung des Kegels im Körperinnern zur Geltung. Das bedeutet nicht nur die Kenntnis der Intensitätsabnahme im zentralen Strahl, sondern in jeder beliebigen tiefen und seitlichen Erstreckung und auch die Kenntnis der Strahlung, die aus dem Kegel in die Umgebung herausgestreut wird.

Diese Kenntnis ist um so mehr Voraussetzung der richtigen Anwendung der Strahlen, je weniger sensibel auf Strahleneinwirkung die pathologische Zellenform ist, welche man bekämpft. Wenn es sich um die sensiblen Zellen der Fortpflanzungsorgane handelt, wo selbst eine 100proz. Überschreitung der notwendigen Einwirkung vielleicht noch keinen schweren Schaden bringt, kann man sich mit rohen Annäherungen begnügen. Wenn es sich aber darum handelt, Zellenformen, wie Karzinom, entscheidend zu schädigen, deren Empfindlichkeit nach den Feststellungen verschiedener Autoren (wenn auch vielleicht mit Schwankungen) doch nicht allzufern von der Empfindlichkeit lebenswichtiger Organe entfernt liegt, dann ist es überaus schwer, und gegenwärtig mit einiger Sicherheit überhaupt nicht möglich, zwischen der Scylla einer unzureichenden Bestrahlung und der Charybdis einer schweren Schädigung normaler Gewebe hindurchzusteuern, d. h. in der vollen Ausdehnung eines pathologischen Gebietes in der Tiefe mit seinen Drüsen überall das hinreichende Maß von Strahleneinwirkung herzustellen und doch nirgends in der Tiefe oder Oberfläche jenes nur um wenige Prozent höhere Maß, welches schon zur schweren Schädigung der normalen Gewebe führt, zu erreichen. Solange kein Mensch weiß, wie sich die Röntgenenergie in der Tiefe ausbreitet und verteilt, und wie sie das in verschiedener Weise tut in Abhängigkeit von der Zusammensetzung und der Härte des eindringenden Strahlengemisches, der Form des Strahlenkegels und den Eigenschaften des Mediums, so lange ist die physikalische Grundlage der Tiefentherapie für ihre wichtigsten und schwersten Probleme nicht entscheidend geklärt.

Deswegen haben seit nunmehr zwei Jahren dauernd Messungen bei uns dazu gedient, zur Klärung dieser Frage beizutragen. Bei diesen Versuchen, die gemeinschaftlich mit Herrn Warnekros begonnen wurden, und an denen anfangs auch Herr Bäck beteiligt war, ist eine Meßmethode durchgebildet worden und systematisch an tausenden von Messungen zur Verwendung gelangt, welche physikalisch am wenigsten Einwendungen begegnet. Dadurch wurde ein Teil des Problems soweit geklärt, daß wir diese Teilresultate nunmehr der Öffentlichkeit übergeben können. Weitere Resultate werden folgen. Es sei aber an dieser Stelle ausdrücklich her-

vorgehoben, daß auch andere Autoren einzelne Messungen über die Tiefenverteilung bereits gemacht und veröffentlicht haben. So z. B. hat Herr Wintz¹⁾ mit einer Ionenkammer hinter einem Wassergefäß die im zentralen Strahlengang von ihm vermessenen Intensitäten mitgeteilt. Insbesondere aber hat Herr Friedrich²⁾ Meßreihen veröffentlicht, welche bereits einen Überblick über die eigenartige Gesetzmäßigkeit der Intensitätsverteilung gaben.

II.

Folgende Gesetze bestimmen die Verteilung der Röntgenstrahlenenergie in der Tiefe eines Mediums.

a) Gesetze, welche von den Eigenschaften der Strahlen stammen:

Mit zunehmender Frequenz (Härte) der Röntgenstrahlen nimmt der Absorptionskoeffizient als Maß der Absorption etwa in der dritten Potenz ab. Der Streukoeffizient nimmt weit weniger ab, bleibt vielleicht sogar ungefähr konstant. Das hat zur Folge, daß mit wachsender Härte der Einfluß der Zerstreung der Strahlung gegenüber dem Einfluß der Absorption der Strahlung die Oberhand gewinnt und immer mehr die Verteilung der Energie beherrscht. Zu berücksichtigen bleibt, daß die Praxis immer mit Strahlungsgemischen arbeitet, daß jede Komponente dieses Gemisches eine andere Frequenz hat und damit nach einem anderen Maß der Absorption und der Zerstreung sich verteilt. Deswegen muß man seine Untersuchung auf möglichst genau bekannte Strahlungsgemische beziehen. Das ist heutzutage möglich, wenn man Röhren benutzt, welche von Störungen durch den Gasgehalt frei sind, und wenn man dieselben Antikathoden nimmt (Wolfram oder Platin), wenn man die Spannung bestimmt, wenn man geeignete Filter benutzt und diese dann beibehält; werden die Strahlen dann noch spektrographisch auf ihre Zusammensetzung kontrolliert, wie dies bei den vorliegenden Messungen stets geschah, dann kann man von einem hinreichend bekannt und immer wieder herstellbaren Strahlenbündel, d. h. Strahlungsgemisch ausgehen.

b) Gesetze des Mediums:

Die Absorption irgend einer bestimmten Strahlenhärte (gekennzeichnet durch die Frequenz der Wellen) in verschiedenen Medien wächst etwa mit der vierten Potenz der Ordnungszahl (oder des Atom-Gewichtes) des Mediums, während die Streuung nur etwa linear mit der Ordnungszahl

¹⁾ Seitz u. Wintz, Unsere Methoden der Röntgen-Tiefentherapie und ihre Erfolge. 1920.

²⁾ Friedrich: Krönig u. Friedrich, physik. u. biolog. Grundlagen der Strahlentherapie 1919. — Friedrich u. Körner, Exp. Untersuchungen über den Einfluß des Röhrenabstandes und der Feldgröße mit dem Dosenquotienten. Strahlentherapie 3, 1920: vgl. S. 5.

wächst. Aus diesem Grunde überwiegt bei einer gegebenen sehr harten Röntgenstrahlung der Einfluß der Zerstreuung gegenüber dem Einfluß der Absorption umso mehr, je geringer die Ordnungszahl der elementaren Bestandteile des Mediums sind. Nun hat Friedrich¹⁾ in seinen dankenswerten Untersuchungen bewiesen, daß die menschlichen Gewebe in ihrem physikalischen Verhalten gegenüber harten Röntgenstrahlen dem Wasser sehr nahe stehen²⁾. Infolgedessen konnte für die ersten quantitativen Ausmessungen die Vereinfachung gemacht werden, die Verteilung der Energie im menschlichen Körper derjenigen Verteilung gleichzusetzen, die unter gleichen Bedingungen in einem etwa gleichen Wasser-Volumen stattfindet. Späterer Ausbau dieser Untersuchungen wird diese Vereinfachung beseitigen und darauf Rücksicht nehmen, welche Veränderung stattfinden, insbesondere durch eingeschlossene Luftmengen. Vorläufig ist dieser Einfluß vernachlässigt.

c) Gesetze der räumlichen Anordnung.

Die Energieverteilung der Röntgenstrahlen hängt ab von dem Abstand des Röhrenfokus von der Haut oder genauer gesagt von dem Verhältnis der Tiefenerstreckung zu diesem Abstand. Es ist das vielfach genannte quadratische Abstandsgesetz, was hier wirkt. Aber dieses Gesetz ist nicht das einzige, sondern in ganz eminentem Maße hängt die Verteilung der Röntgenstrahlenenergie der Tiefe ab von der Form und insbesondere von der Größe des Strahlenkegels oder der Strahlenpyramide, deren Stumpf im Körperinnern verläuft.

Diese verschiedenen Abhängigkeiten gestatten nicht, die Intensität der Strahlung in irgend einem Punkte in der Tiefe auf einfache Weise vorauszuberechnen. Berechnungen solcher Art waren zulässig, solange man in der Vergangenheit mit Strahlen arbeitete, die gegenüber den jetzt angewendeten weich zu nennen waren und solange man dabei mit sehr kleinen Strahlungskegeln arbeitete. In solchen Fällen überwog die Absorption gegenüber der Zerstreuung der Strahlen und man konnte einigermaßen

¹⁾ Friedrich, Krönig und Friedrich, l. c., Friedrich und Opitz, die Freiburger Strahlenbehandlung des Uteruskrebses, M. med. W. 1910, Nr. 1.

²⁾ In letzter Zeit haben Pankow und Borell an frischen Leichen gefunden, daß unsere Versuche mit Wasser auch für die Verhältnisse im Körper gelten. Die von Wintz und von Hohlfelder geltend gemachten Bedenken, die Ergebnisse mit Wasserversuchen ließen keinen Schluß auf den Körper zu, führten vielmehr zur Überschätzung der seitlichen Intensität, treffen demnach nicht zu. Jedenfalls gilt folgendes: Arbeitet man auf Grund der hier veröffentlichten genauen Tiefenmessungen in Wasser, so weiß man wenigstens annähernd die Verteilung der Energie im Körper. Vernachlässigt man die Ergebnisse, so weiß man so gut wie gar nichts, also sicher sehr viel weniger über die Verteilung der Strahlenenergie im menschlichen Körper und tappt ganz im Dunkeln.

rechnen. Da man aber auf solche Weise niemals hinreichend Energie in die Tiefe bekommen kann, sondern dazu notgedrungen harte Strahlen und große Strahlungskegel braucht, so überwiegen jetzt die Einflüsse der Zerstreuung, und diese sind nicht übersichtlich genug, um einfache Rechnungen zuzulassen. Deswegen blieb keine andere Wahl, als in zahlreichen Serien mit möglichst genau bekannten Bedingungen die Verteilung der Energie messend zu bestätigen.

III.

Folgende Messungen der Energieverteilung in der Tiefe sind ausgeführt worden:

1. Für fünf verschiedene Spannungen an den Röhren und mit diesen Spannungen zugeordneten Filtern. Die Spannungen lassen sich mit geeigneten Apparaten reproduzieren. Die höchste an der Röhre liegende Spannung begrenzt die Härte der Strahlung nach oben und die Anwendung eines richtigen Filters begrenzt sie praktisch nach unten. Das übrigbleibende Gemisch wurde jedesmal spektrographisch geprüft. Im Zusammenhange mit Punkt 2 ergibt sich dann ein bekanntes und mit geeigneten Apparaten und Röhren immer wieder herstellbares Gemisch.

2. Mit gasfreien Röntgenröhren, mit Wolfram-Antikathode und Platin-Antikathode.

Gasfreie Röntgenröhren wurden deswegen benutzt, weil nur bei praktischer Freiheit von Gas konstante Bedingungen erzielbar sind. Wolfram und Platin sind die üblichen Antikathodenmetalle. Im Strahlungsgemisch einer schweren Kathode, welche mit hoher Spannung erregt wird, spielt die Eigenstrahlung der Antikathode selbst eine erhebliche Rolle. Man erwartet, daß die Strahlung des Wolframs mit der Ordnungszahl 74, auch bei Erregung mit der gleichen Spannung wegen der verschiedenen Lage der Linien merkbar weicher wäre als die Strahlung des Platins mit der Grundzahl 78. Die Intensitätsverteilungen im Wasser zeigen sich aber bei den hohen Spannungen als nicht wesentlich verschieden.

3. Mit vier verschiedenen Pyramidengrößen, von denen drei für den praktischen Betrieb in Frage kommen, während die vierte, kleinste eine mehr physikalische Bedeutung hatte. Die Begrenzung der Strahlung wurde rechteckig gewählt, weil sich das in der Tiefentherapie in den meisten Fällen besser bewährt als die kreisförmige oder quadratische Begrenzung. Die Einfallspforten, an der Oberfläche gemessen, hatten die rechteckige Begrenzung der Tabelle 1.

Gemessen wurde die ganze Intensitätsverteilung, von der Oberfläche ausgehend, nach der Tiefe hin im Wasser, also nicht etwa nur der zentrale Strahl, sondern das gesamte durchstrahlte Volumen und über dessen Rand hinaus, wo noch merkbare zerstreute Strahlung nachweisbar ist.

4. Endlich mußten diese sämtlichen Ausmessungen gemacht werden für verschiedene Fokushautabstände, also für 30, 40, 50, 60 und 70 cm. Doch wurden bei diesen veränderten Abständen die Einfallspforten so abgeändert, daß die durchstrahlten Volumina im Körper gleichblieben. Die rechteckigen Begrenzungen der Einfallfelder an der Wasseroberfläche sind bei den verschiedenen Fokusoberflächenabständen aus folgender Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1.

1. Größte Pyramide (Vol. = 1)		2. Mittlere Pyramide (Vol. = $\frac{1}{4}$)		3. Kleine Pyramide (Vol. = $\frac{1}{10}$)	
Fokus-Oberfl.-abstand	rechteckige Begrenzung a. d. Oberfläche	Fokus-Oberfl.-abstand	rechteckige Begrenzung a. d. Oberfläche	Fokus-Oberfl.-abstand	rechteckige Begrenzung a. d. Oberfläche
30 cm	18×24 cm ²	30 cm	9×12 cm ²	30 cm	5,7×7,6 cm ²
40 cm	19,3×25,7 cm ²	40 cm	9,7×12,9 cm ²	40 cm	6,1×8,1 cm ²
50 cm	20,1×26,8 cm ²	50 cm	10,1×13,4 cm ²	50 cm	6,3×8,5 cm ²
60 cm	20,7×27,6 cm ²	60 cm	10,4×13,8 cm ²	60 cm	6,5×8,7 cm ²
70 cm	21,1×28,2 cm ²	70 cm	10,6×14,1 cm ²	70 cm	6,7×8,9 cm ²

Demgemäß waren im ganzen folgende Variationen zu untersuchen: Wegen Punkt 1 (Spannungen) fünf, wegen Punkt 2 (Antikathodenmaterial) zwei, wegen Punkt 3 (Feldgröße) drei, wegen Punkt 4 (Fokusabstand) fünf, das sind aber im ganzen 150 Kombinationen, wobei fast jedesmal eine sehr große Anzahl von Messungen notwendig war.

Es hat sich aber herausgestellt, daß für die Abhängigkeit zwei und die Abhängigkeit vier einfache Gesetzmäßigkeiten gelten, so daß diese Meßreihen aus den anderen hervorgehen und nur durch Stichproben zu kontrollieren waren.

IV.

Die Methode dieser Messungen unterlag mancher Wandlung. Sie ist in physikalischen Zeitschriften¹⁾ eingehend besprochen worden, mag aber auch hier noch einmal kurz dargelegt werden. Es ist gemessen worden erstens mit Ionenkammern, zweitens mit Selen und drittens mit der Veränderung der photographischen Emulsion unter dem Einfluß von Strahlen. Die Selenmessungen waren für quantitative Ausmessungen ungenügend, Inkonstanz der Zelle, Temperatureinflüsse, auch Unsicherheiten in der Verbindung der Zelle mit dem Meßraum gestatten nie genügende Sicherheit. Auch die Ionenmessung mußten wir verwerfen. Bringt man nämlich eine Ionenkammer ins Wasser und leitet im Innern eines sorgfältig mit Blei umhüllten Schlauches die gut isolierte Verbindung der Elektrode der

¹⁾ Die Verfasser: Phys. Zt. 21, 1920, S. 171—512, „Versuche über Zerstreung von Röntgenstrahlen“. Zt. f. Phys. 1921, H. 1, „Über die Zerstreung von Röntgenstrahlen im Wasser“.

Kammer nach dem Elektrometer oder Galvanometer, so gibt es Fehlerquellen, die auf die Dauer unvermeidlich sind, und die jedenfalls die Vornahme von vielen hundert Messungen, die untereinander in enger Beziehung stehen, physikalisch einwandfrei nicht zulassen. Eine Ionenkammer hat eine nicht zu vernachlässigende Erstreckung, einen Luftraum, umgrenzt von irgend einem Festkörper. Die Größe des Luftraumes kann nicht vernachlässigt werden, denn in der Luft sind die Absorptionsverhältnisse und die Zerstreuungsverhältnisse sehr verschieden gegenüber der Umgebung und beeinflussen die Verteilung der Röntgenenergie in der Umgebung stark. Außerdem gehen alle Schwankungen der Erregung der Röntgenröhre, also die Schwankungen der Zentrale und zwar sowohl die Spannungs- wie die Stromstärkeänderung in der Röntgenröhre als Meßfehler ein. Der metallisch geschützte Schlauch ändert gleichfalls die Versuchsbedingungen. Der Schlauch kann sowohl scheinbar intensitätsvermehrend als auch abschwächend wirken, was bei den geringen Intensitäten, bei seitlichen tiefen Lagen, oder Lagen außerhalb der direkten Bestrahlungszonen von Einfluß ist. Aber beseitigt man alle Bedenken nach den vorzüglichen Anleitungen, die Friedrich¹⁾ gegeben hat, so bleibt doch das Bedenken gegen Messungen durch eine nicht zu vernachlässigende Luftkammer im Wasservolumen und die praktische Unmöglichkeit hunderte und aberhunderte Messungen unter ganz konstanten Bedingungen hinreichend genau vorzunehmen.

Wir benutzten deswegen eine eigene Meßmethode, die auf der Veränderung der photographischen Emulsion beruht. Es ist ganz selbstverständlich, daß die selektive Absorption des Broms und Silbers bei dieser Messung keine Rolle spielt, da alle Films gefilterte Strahlungen von sehr großer Härte und von der gleichen spektralen Zusammensetzung gleichzeitig unter ganz gleichen Meßbedingungen erhalten. Man kann nämlich gegen photographische Methoden sehr viele Einwände erheben. Einfluß der Temperatur, der Konzentration und Zusammensetzung des Entwicklers, die Entwicklungsdauer, die Gleichmäßigkeit der photographischen Emulsion selbst und den Gang der Schwärzung mit der Intensität. Alle diese Einwände müssen durch die Meßanordnung beseitigt werden und dies geschah in folgender Weise: Für die Ausbreitungsbeobachtungen diente ein Glasgefäß, in welchem eine Wasserschicht enthalten war von 64 cm Länge, 43 cm Breite und 20 cm Höhe, wie Abb. 1 es zeigt. Zur Sicherheit wurden vergleichende Messungen gemacht mit und ohne Umhüllung des Glases durch eine dicke Bleischicht, um etwa den Einfluß der im Außenraum stets vorhandenen zerstreuten Strahlung zu bestimmen. Es wurden

¹⁾ Friedrich und Glasser, Über die Dosenverhältnisse bei inkorporaler Radium- und Mesothorientherapie, Strahlentherapie, XI, 1, 1920.

auch Vergleichsversuche mit tieferen Wasserschichten gemacht. Die Dicke 20 cm wurde für die Hauptversuche¹⁾ gewählt, weil sie der durchschnittlichen Tiefenausdehnung des menschlichen Rumpfes entspricht. Gemessen wurde immer die Intensität an irgendeinem Punkte in der Tiefe, relativ zu der Intensität an der Oberfläche der Wasserschicht im zentralen Strahl. Zu diesem Zwecke wurden Films in dem Wasserbade an ein metallfreies Traggerüst aus Holz und Schnüren befestigt, in den durchstrahlten Pyramiden und jenseits von ihnen verteilt, so daß diese Filmstücke an jeder Stelle senkrecht von der eingestrahelten Röntgenenergie getroffen wurden. Die dünne Gelatineschicht verändert die Verhältnisse der Absorption und Zerstreuung nicht, denn Gelatine besteht aus Stoffen niederer Ordnungszahlen ebenso wie das Wasser und der menschliche Körper. Ebensowenig kommt ein Einfluß der sehr dünnen Emulsion in Frage, denn es gelingt, mehrere aufeinander liegende Films gleichzeitig zu belichten, die an Intensität der Schwärzung nicht oder kaum voneinander zu unterscheiden sind. Es ist aber notwendig, daß der Meßkörper von praktisch zu vernachlässigender Dicke ist und daß die Stoffe, aus denen er besteht, nahezu übereinstimmen mit dem Medium, dessen Gesetzmäßigkeit studiert werden soll. Um nun alle fremden Einflüsse auszuschließen — Temperatur, Strahlungsdauer, Entwicklungsdauer — wurden die Versuche in dunklem Raume ausgeführt, dem Wasser ein schwacher Entwicklerzusatz gegeben, die Flüssigkeit gut gemischt und bewegt.

Alle Meßstreifen wurden auf diese Weise bei demselben auffallenden Strahlenbündel gleichzeitig belichtet und entwickelt. So konnte jedesmal mit einem Versuch ein ganzer Kegel ausgemessen werden. Es blieb übrig, die Ergebnisse auszuwerten und bei dieser Auswertung unabhängig zu werden von den Eigentümlichkeiten der photographischen Schwärzung in ihrer Abhängigkeit von der auffallenden Intensität.

Das letzte Ziel jeder Messung für medizinische Zwecke ist das biologische Maß oder die applizierte Dosis. Aber kein Mensch weiß heute,

¹⁾ Es wurden auch Versuche bei 30 und 40 cm Wasserdicke vorgenommen, um den weiteren Verlauf der Intensitätskurven zu kontrollieren. Es ergab sich, daß die Intensitäten in größeren Tiefen sich innerhalb der zulässigen Fehlergrenzen von ca. 2—3% an die bei 20 cm Schichtdicke gewonnenen gut anschließen.

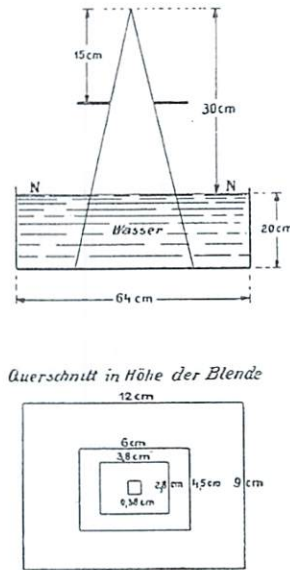


Abb. 1.

wie sich die biologische Reaktion vollzieht. Die Frage, ob die absorbierte Energie allein wirksam ist, und wenn ja, ob dieselben Faktoren der Energie (etwa die Strahlenhärte oder der der Zahl der entstehenden sekundären Kathodenstrahlen proportionale Faktor) dabei eine Rolle spielen,

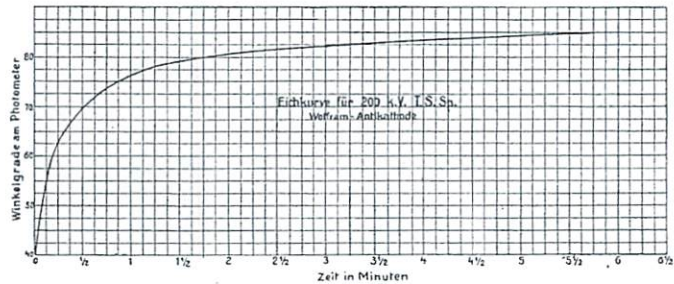


Abb. 2.

ist ungeklärt. Dennoch kann man ein jedem Einwand gewachsenes Maß festlegen, wie es schon vor langen Jahren von einem der Verfasser¹⁾ gesehen ist. Wenn nämlich die bekannte Strahlung in dem durchwanderten

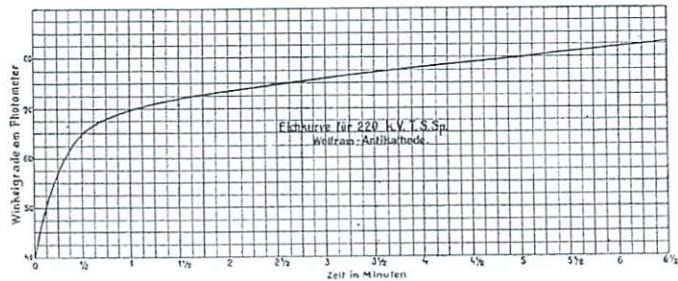


Abb. 3.

¹⁾ Vergleiche neben den bereits genannten Arbeiten insbesondere noch: Dessauer, Zur Frage der Homogenbestrahlung, Diskussion mit Frank-Schultz, D. med. W. Nr. 40, 1908,

ferner die Auseinandersetzung mit Christen in den F. d. Röntg., Bd. XXI, in der Strahlentherapie und a. a. O. Homogenität und Absorption.

ferner Grundlagen und Meßmethoden der Tiefentherapie mit Röntgenstrahlen (A. f. Gyn., Bd. 111, Heft 2).

Weitere Untersuchungen über das Gebiet der sehr harten Röntgenstrahlen und ihre Anwendung in der Tiefentherapie. (M. med. W. Nr. 37, 1918.)

Über Glühkathodenröhren und ihre Bedeutung in der Tiefentherapie. (M. med. W. Nr. 30, 1917.)

Dessauer und Warnekros, Wendepunkt in der Technik der Tiefentherapie. (Strahlentherapie, Bd. XI.)

Gebiet keine erhebliche Veränderung ihrer Zusammensetzung erleidet, dann muß die Dosis an einem Orte in erster Linie abhängig sein von der einstrahlenden Intensität an diesem Orte. Die einstrahlende Intensität können wir aber einwandfrei (z. B. durch die Zeit) variieren und durch sie auf einem photographischen Film Schwärzung hervorrufen. Dann handelt es sich nur darum, die erhaltenen Schwärzungen auszuwerten, denn wir haben ja irgend eine Schwärzung auf jedem Film, müssen aber nun herausbringen, was diese Schwärzung bedeutet. Das kann ebenfalls einwandfrei geschehen, z. B. dadurch, daß von demselben Filmguß ein Streifen derselben Strahlung eine Zeit lang der Strahlung ausgesetzt wird unter Wahrung aller Bedingungen, ein zweiter Streifen unter ganz gleichen Bedingungen die doppelte Zeit, ein dritter die dreifache Zeit usw. Solange die Einstrahlungsintensität die gleiche Struktur hat, ist die Schwärzung in bestimmten Grenzen der Zeit proportional. Ähnliche Versuche kann man mit Hilfe des quadratischen Abstandsgesetzes machen. Auf solche Weise wurde für jede Versuchsreihe eine empirische Schwärzungsskala hergestellt und durch Ausphotometrieren der Meßstreifen ist es dann möglich, die am beliebigen Orte wirksame wirkliche Intensität zu bestimmen, die in der Mitte an der Oberfläche vorhanden ist.

In den Abb. 2 und 3 sind zwei solche empirische Eichkurven wiedergegeben. Sie enthalten als Abszissen die der Intensität proportionale Zeit, als Ordinate die Winkel des Polarisationsphotometers. Gemessen wurde in dem annähernd geradlinigen Teil der Kurve.

Weitere Kontrollen sind gemacht worden über die Schwankungen in der Qualität der Emulsion eines und desselben Films über die Einwirkung der Zerstreuung, wenn der Film an der Oberfläche genetzt und nicht genetzt wird, über den Einfluß des Entwicklers, den Einfluß der begrenzenden Wände. Unter Berücksichtigung aller dieser Kontrollen folgen nun die Ergebnisse.

V.

Allgemeine Ergebnisse¹⁾.

Die allgemeinen Ergebnisse haben überwiegend physikalisches Interesse, und es sei darum auch auf die Arbeiten der Verfasser in der *Physikalischen Zeitschrift*²⁾ und der *Zeitschrift für Physik*³⁾ verwiesen. Doch seien in den Abb. 4–8 die folgenden Gesetzmäßigkeiten festgestellt:

1. Bei harten Strahlen und großen Kegeln empfangen tiefliegende zentral-liegende Punkte ein vielfaches der Röntgenstrahlenenergie durch zerstreute Strahlung gegenüber dem, was sie von geradliniger Strahlung empfangen.

¹⁾ Die Untersuchungen über die Abhängigkeit der Energieverteilung vom Abstand sind im Institut unter Beteiligung von Herrn Dr. Mukai und Herrn Dr. Karp gemacht worden.

²⁾ Dessauer und Vierheller, l. c.

³⁾ Dessauer und Vierheller, l. c. S. 138.

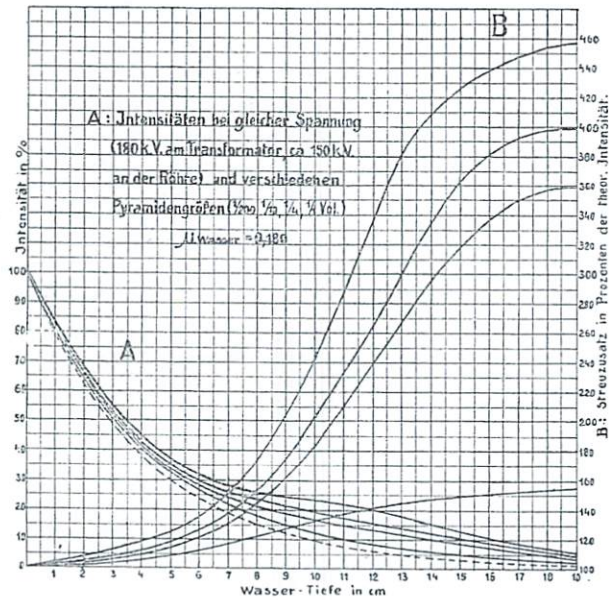


Abb. 4.

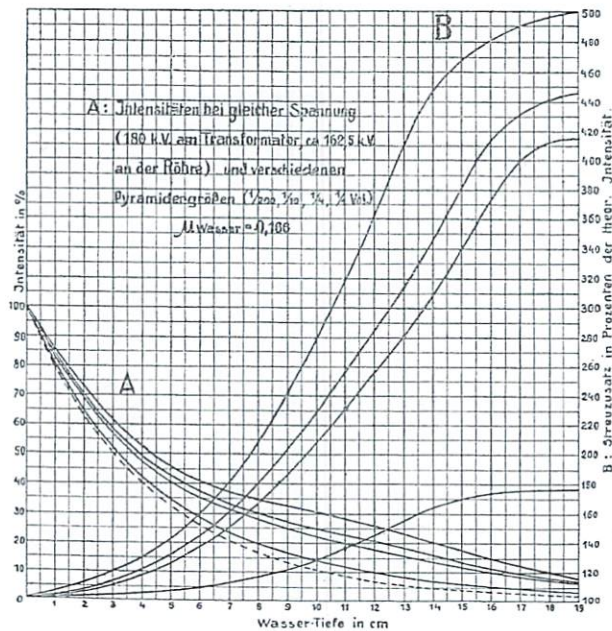


Abb. 5.

2. Während die geradlinige Intensität nach den bekannten Exponentialgesetzen mit der Tiefe abnimmt, ändert sich die Streuintensität nach viel komplizierterem Gesetz mit der Tiefe. Die relative Streuintensität, d. h. die Streustrahlung, ausgedrückt in Prozenten der geradlinig eingestrahlt vom Fokus kommenden Strahlung wächst

a) mit der Härte der Strahlung,

b) mit zunehmender Tiefe im durchstrahlten Medium mit Annäherung an eine Grenze,

c) mit seitlicher Annäherung an den Zentralstrahl,

d) mit der Größe des durchstrahlten Volumens (Kegelgröße oder Pyramidengröße)¹⁾. Doch ist auch dieser Zuwachs nicht unbegrenzt, sondern er nähert sich einem Maximum. Bei einer gegebenen Strahlenhärte wird in einer gewissen Tiefe unter

¹⁾ Die durchstrahlten Volumina haben die Gestalt abgestumpfter Pyramiden.

der Oberfläche in der Umgebung des Zentralstrahles ein praktisches Maximum der relativen Streuintensität erreicht. Diese Tiefe ist um so größer, je härter die Strahlung und je größer der Kegel ist.

3. Auch seitlich von dem direkt durchstrahlten Volumen sind noch erhebliche nur auf Streustrahlung beruhende Intensitäten vorhanden.

Da bei allen Versuchen mit einer praktisch homogenen Strahlung gearbeitet wurde, d. h. mit einer Strahlung, deren einzelne Komponenten

im Wasser nicht derart verschieden absorbiert werden, daß die Zusammensetzung des Gemisches sich erheblich ändert, diese sogen. praktisch homogene Strahlung aber immerhin physikalisch noch komplexer Natur ist, so wollten wir durch eine spektrographische Aufnahme uns Gewißheit darüber verschaffen, ob die Strahlung wirklich als praktisch homogen angesehen werden könnte. Zu diesem Zwecke wurden Spektrographenaufnahmen gemacht mit einem Seemannschen Scheiden-Spektrographen.

Die eine Hälfte des entstehenden Spektrums wurde so gefiltert wie es Homogenitätsuntersuchungen vorschreiben, also bei 180 Kilovolt Transformatorscheitelspannung (TSSp.)¹⁾ mit 0,5 mm Kupfer + 1 mm Aluminium, bei 200 Kilovolt TSSp. mit 0,8 mm Kupfer + 1 mm Aluminium, bei 220 Kilovolt TSSp. mit 1,3 mm Kupfer + 1 mm Aluminium.

Da sich das Wort „Strahlenpyramide“ in der Literatur nicht eingebürgert hat, so ist in der vorliegenden Arbeit das Wort Strahlenkegel gebraucht. Es sind aber immer die durch Tabelle 1 bestimmten Pyramiden gemeint.

¹⁾ Wir führen diese Abkürzung ein, weil der Ausdruck „Transformatorscheitelspannung“ des öfteren in dieser Arbeit vorkommt.

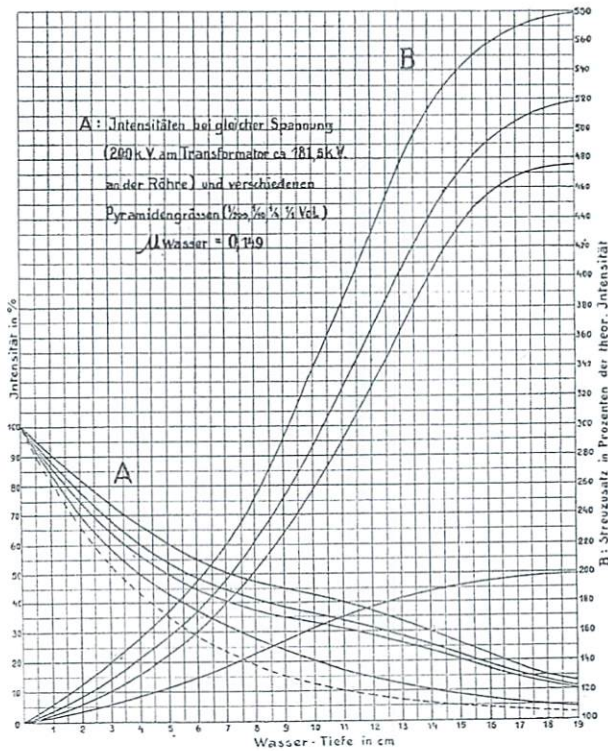


Abb. 6.

Die in den Abb. 8—12 dargestellten Spektrogramme zeigen, daß zunächst die Strahlensammensetzung für 180 Kilovolt T S Sp. in dem gefilterten Teil, praktisch nur noch sehr wenig Wellenlängen oberhalb der ersten Ordnung der K.-Serie des Wolframs enthält. Die Intensität erscheint im kurzwelligen Teile des Bremsspektrums, sowohl auf der Originalaufnahme als in der obigen Figur zu gering. Das entspricht nicht der Wirklichkeit und liegt

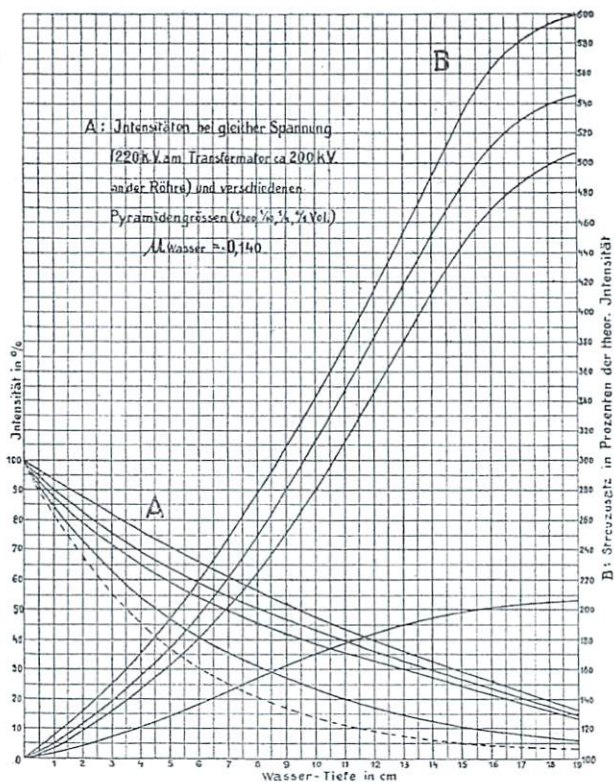


Abb. 7.

allen drei Strahlungsqualitäten erstreckt sich knapp über eine Oktave, so daß wir also wirklich von einer praktisch homogenen Strahlung reden können. In nennenswerter Intensität erstreckt sich die filtrierte Strahlung ca. von $\lambda = 0,07 \text{ \AA}$. bis $\lambda = 0,230 \text{ \AA}$.

Man ist in der Lage, durch Verwendung eines Fürstenau-Coolidge-Rohres, bei bestimmten Sekundärspannungen und Filterungen dieselben Strahlenqualitäten von praktischer Homogenität zu reproduzieren. Spektrale Untersuchungen an verschiedenen Apparateexemplaren bestätigen dies. Voraussetzung ist natürlich, daß man das gleiche Apparatesystem benutzt.

Die Aufnahme bei 200 Kilovolt T S Sp. zeigt wesentlich nur noch die K.-Serie und das Bremsspektrum nach dem kurzen Ende zu. Die Aufnahme bei 220 Kilovolt T S Sp. gibt ungefähr dasselbe Bild, nur ist das Bremsspektrum weiterhin nach kurzen Wellen verlängert. Der Wellenlängenbereich bei

darüber, daß von der Silberbandkante ab, wo die stärkste Empfindlichkeit der photographischen Platte liegt, die Empfindlichkeit immer mehr und mehr abnimmt. Die zweite Aufnahme bei 200 Kilovolt T S Sp. zeigt wesentlich nur noch die K.-Serie und das Bremsspektrum nach dem kurzen Ende zu. Die Aufnahme bei 220 Kilovolt T S Sp. gibt ungefähr dasselbe Bild, nur ist das Bremsspektrum weiterhin nach kurzen Wellen verlängert. Der Wellenlängenbereich bei

Wir verwendeten den Intensivreformapparat der Veifa-Werke. Weitere Versuche wurden auch gemacht mit einer wassergekühlten Röhre mit Platin-Iridium-Antikathoden. Die Abb. 11 und 12 zeigen die Spektrogramme der ungefilterten Strahlungen von Platinantikathoden bei 180 Kilovolt T S Sp. und Antrieb der Röhren mit und ohne Nadelschalter, sodaß beim Betrieb ohne Nadelschalter tatsächlich 180 Kilovolt maximaler Spannung an der Röhre lagen. Die Aufnahmen mit gefilterter Strahlung ergaben dieselben Erscheinungen wie die Abb. 8—10, nur ist die K-Serie selbst weiter nach den kurzen Enden des Spektrums verschoben.

VI.

Mit fünf verschiedenen Strahlungsqualitäten wurden Untersuchungen, zunächst bei 30 cm Fokushautabstand vorgenommen. Die Resultate gehen aus den folgenden Tabellen 2—21 und den Abb. 4, 5, 6, 7 und 8 hervor.

Diese Abbildungen zeigen die Abhängigkeit der Intensität von der Tiefe. Wir unterscheiden dabei zwei Kurvengruppen: A und B. Die unterste Kurve der A-Schar stellt die Abhängigkeit der Intensitätsverteilung von der Tiefe dar, wenn das gesamte Abschwächungsgesetz und das Gesetz von dem Quadrat der Entfernung zugrunde gelegt werden nach der Gleichung:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\mu d_x} \cdot \frac{r_0^2}{(r_0 + d_x)^2}$$

- A O-Punkt
- B K-Serie Wolfram 1. Ordn.
- C K-Serie Wolfram 2. Ordn.
- D K-Serie Wolfram 3. Ordn.
- E Silberbandkante
- F Brombandkante
- B' K-Serie Platin 1. Ordn.
- C' K-Serie Platin 2. Ordn.
- D' K-Serie Platin 3. Ordn.

Schematische Darstellung der Spektrogramme.

Fig. 8

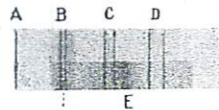


Fig. 9

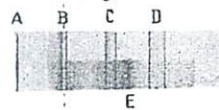


Fig. 10

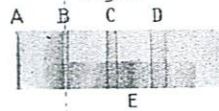


Fig. 11

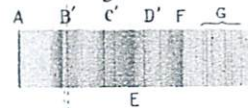
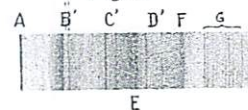


Fig. 12



Die über den einzelnen Kurven angegebenen Abschwächungskoeffizienten¹⁾ sind bestimmt mit Hilfe eines Winawerschen, durch Back verbessertes Elektroskop, das eine ganz enge Einfallspforte hatte und so die Streustrahlung, die in der Luft entsteht, auf ein zu vernachlässigendes Minimum herabdrückt. Bei jeder Angabe des Abschwächungskoeffizienten befindet sich

¹⁾ Diese Koeffizienten sind seit unserer Arbeit in der Zt. f. Phys. 1921, H. 1 nochmals mit besonderen Vorsichtsmaßregeln genauer bestimmt worden. Daher weichen die prozentualen Ergebnisse etwas ab.

die Angabe derjenigen Spannung, die an der Röhre und am Transformator liegen muß¹⁾, damit bei der gleichzeitig angegebenen Filterung eine Strahlung von praktischer Homogenität entsteht, deren Charakteristikum der Abschwächungskoeffizient ist.

Die auf die unterste A-Kurve folgenden Kurven zeigen die Intensitätsverteilung im Zentralstrahl wiederum in Abhängigkeit von der durchstrahlten Tiefe für verschieden groß durchstrahlte Volumina. Diese Volumina sind so gewählt, daß sie in dem Verhältnis $\frac{1}{10} : \frac{1}{4} : \frac{1}{1}$ stehen (vgl. Tabelle 1, Einfallfelder). Die unmittelbar auf die unterste Kurve folgende ist erhalten bei einem durchstrahlten Volumen, das nur $\frac{1}{200}$ von dem größtdurchstrahlten ($\frac{1}{1}$) beträgt. Grund für Versuche mit diesem engen Kegel, der für die praktische Medizin nicht in Frage kommt, war, die Annäherung der Intensitätsverteilung an die Abschwächungskurve festzustellen. Auch hier ist noch ein wesentlicher Einfluß der Streuintensität als positiver Komponente gegenüber den die Intensität vermindernenden Komponenten.

Tabelle 2.

$\frac{1}{1}$ Vol. TSSp.²⁾ = 220 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 200 kV.

$\mu = 0,140.$			
A ³⁾	B ²⁾	C ³⁾	D ²⁾
0	100	100	100
1	81,6	94	115
2	66,5	87,5	131
3	54,3	81,5	150
4	44,5	76,0	171
5	36,5	70,2	192
6	30,0	66,0	220
7	24,7	61,0	247
8	20,4	57,0	280
9	16,8	53,0	315
10	13,9	47,5	342
11	11,5	44,0	382
12	9,5	39,0	410
13	7,9	36,0	455
14	6,6	32,5	493
15	5,5	29,0	525
16	4,5	25,5	567
17	3,8	22,0	580
18	3,2	19,0	593
19	2,6	15,6	600

Tabelle 3.

$\frac{1}{4}$ Vol. TSSp. = 220 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 200 kV.

$\mu = 0,140.$			
A	B	C	D
0	100	100	100
1	81,6	90	110
2	66,5	82,5	124
3	54,3	75,0	138
4	44,5	69,5	156
5	36,5	63,5	174
6	30,0	59,0	196
7	24,7	55,0	222
8	20,4	51,0	250
9	16,8	47,0	280
10	13,9	43,5	312
11	11,5	39,8	347
12	9,5	36,3	382
13	7,9	33,0	416
14	6,6	29,7	450
15	5,5	26,6	483
16	4,5	23,0	510
17	3,8	20,1	528
18	3,2	17,3	540
19	2,6	14,2	546

¹⁾ Die Spannungsangaben an den Röhrenklemmen sind exakt. Die Angaben der Transformatorspannungen sind nur angenähert richtig, weil bei diesen letzteren Schwankungen durch die Nadelschalter und durch die Kapazität der Hochspannungsleitung eintreten.

²⁾ TSSp. = Transformatorscheitelspannung.

³⁾ A enthält die Tiefe in cm. B die errechneten Intensitäten nach der Gleichung Abschnitt VI. C die gemessenen Intensitäten. D die gemessenen in Prozenten der errechneten.

Alle auf die unterste Kurve folgenden sind erhalten auf Grund von Meßresultaten nach der oben beschriebenen Versuchsanordnung, und es ist ersichtlich, daß beim größten durchstrahlten Volumen in einer Tiefe von

Tabelle 4.

$\frac{1}{10}$ Vol. TSSp. = 220 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 200 kV.

$\mu = 0,140.$

A	B	C	D
0	100	100	100
1	81,6	87,2	107
2	66,5	79,0	119
3	54,3	71,3	131
4	44,5	65,0	146
5	36,5	59,5	163
6	30,0	54,0	180
7	24,7	49,4	200
8	20,4	45,8	225
9	16,8	42,0	250
10	13,9	39,0	280
11	11,5	36,0	312
12	9,5	32,6	344
13	7,9	30,0	380
14	6,6	27,4	414
15	5,5	24,4	444
16	4,5	21,2	470
17	3,8	18,5	486
18	3,2	16,0	500
19	2,6	13,1	506

Tabelle 5.

$\frac{1}{200}$ Vol. TSSp. = 220 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 200 kV.

$\mu = 0,140.$

A	B	C	D
0	100	100	100
1	81,6	85	104
2	66,5	72,5	109
3	54,3	62,5	115
4	44,5	54,3	122
5	36,5	47,0	129
6	30,0	40,8	136
7	24,7	35,6	144
8	20,4	31,6	155
9	16,8	27,5	164
10	13,9	23,9	172
11	11,5	20,6	179
12	9,5	17,6	185
13	7,9	15,0	190
14	6,6	12,8	194
15	5,5	10,9	198
16	4,5	9,1	201
17	3,8	7,8	204
18	3,2	6,6	205
19	2,6	5,4	206

Tabelle 6.

$\frac{1}{1}$ Vol. TSSp. = 200 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 181,5 kV.

$\mu = 0,149.$

A	B	C	D
0	100	100	100
1	80,7	90,5	112
2	65,3	81,5	124
3	52,9	74,8	142
4	42,9	66,5	155
5	34,9	60,0	172
6	28,4	55,0	194
7	23,2	51,0	220
8	19,3	47,5	245
9	15,5	45,0	290
10	12,7	43,0	339
11	10,4	40,0	385
12	8,5	36,6	430
13	7,0	33,0	470
14	5,8	30,0	515
15	4,8	26,0	540
16	3,9	21,6	555
17	3,2	18,2	570
18	2,7	15,5	575
19	2,2	12,8	580

Tabelle 7.

$\frac{1}{4}$ Vol. TSSp. = 200 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 181,5 kV.

$\mu = 0,149.$

A	B	C	D
0	100	100	100
1	80,7	86,2	107
2	65,3	76,0	116
3	52,9	68,8	130
4	42,9	61,5	143
5	34,9	54,8	157
6	28,4	50,0	176
7	23,2	46,0	198
8	19,3	43,2	224
9	15,5	39,3	254
10	12,7	36,5	288
11	10,4	33,5	322
12	8,5	30,9	364
13	7,0	28,2	402
14	5,8	25,5	440
15	4,8	22,5	470
16	3,9	19,1	490
17	3,2	16,2	504
18	2,7	13,9	514
19	2,2	11,4	520

ungefähr 20 cm bis zu 600% (s. Tab. 2) der errechneten Intensität vorhanden sind.

Tabelle 8.

$\frac{1}{10}$ Vol. TSSp. = 200 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 181,5 kV.
Filter: 0,8 Cu. + 1 Al.

$\mu = 0,149.$

A	B	C	D
0	100	100	100
1	80,7	84	104
2	65,3	73,4	112
3	52,9	63,5	120
4	42,9	57,0	133
5	34,9	50,2	144
6	28,4	45,4	160
7	23,2	41,8	180
8	19,3	39,3	204
9	15,5	35,1	226
10	12,7	33,0	260
11	10,4	30,2	290
12	8,5	27,8	326
13	7,0	25,5	364
14	5,8	23,2	400
15	4,8	20,8	432
16	3,9	17,8	450
17	3,2	14,9	466
18	2,7	12,8	474
19	2,2	10,6	480

Tabelle 9.

$\frac{1}{200}$ Vol. TSSp. = 200 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 181,5 kV.
Filter: 0,8 Cu. + 1 Al.

$\mu = 0,149.$

A	B	C	D
0	100	100	100
1	80,7	82,2	102
2	65,3	69,2	106
3	52,9	58,6	111
4	42,9	50,2	117
5	34,9	43,0	123
6	28,4	36,4	128
7	23,2	31,6	136
8	19,3	28,0	145
9	15,5	23,8	154
10	12,7	20,8	164
11	10,4	17,6	170
12	8,5	15,0	176
13	7,0	12,8	183
14	5,8	10,8	186
15	4,8	9,2	192
16	3,9	7,7	197
17	3,2	6,3	197
18	2,7	5,2	193
19	2,2	4,3	196

Tabelle 10.

$\frac{1}{1}$ Vol. TSSp. = 180 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 162,5 kV.
Filter: 0,5 Cu. + 1 Al.

$\mu = 0,166.$

A	B	C	D
0	100	100	100
1	79,3	85	107,4
2	63,1	73	116,0
3	50,3	61	121,2
4	40,1	52	130,0
5	32,1	45,4	140,2
6	25,7	40,8	159,0
7	20,6	37,5	182,4
8	16,5	34,5	209,0
9	13,3	32,3	243,0
10	10,7	30,0	280,0
11	8,7	27,9	321,0
12	7,0	25,3	362,0
13	5,6	22,5	410,0
14	4,6	20,7	448,0
15	3,7	17,3	469,0
16	3,0	14,5	482,0
17	2,4	11,8	490,0
18	2,0	9,9	495,0
19	1,6	8,0	500,0

Tabelle 11.

$\frac{1}{4}$ Vol. TSSp. = 180 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 162,5 kV.
Filter: 0,5 Cu. + 1 Al.

$\mu = 0,166.$

A	B	C	D
0	100	100	100
1	79,3	83	109
2	63,1	70	112
3	50,3	58	115
4	40,1	49	122
5	32,1	42	131
6	25,7	37,2	145
7	20,6	33,0	160
8	16,5	30,3	184
9	13,3	26,9	202
10	10,7	24,8	232
11	8,7	22,4	246
12	7,0	20,4	292
13	5,6	17,4	310
14	4,6	15,9	346
15	3,7	14,1	380
16	3,0	12,4	414
17	2,4	10,3	430
18	2,0	8,8	440
19	1,6	7,2	450

Tabelle 12.

$\frac{1}{10}$ Vol. TSSp. = 180 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 162,5 kV.
Filter: 0,5 Cu + 1 Al.

$$\mu = 0,166.$$

A	B	C	D
0	100	100	100
1	79,3	82	103
2	63,1	69	109
3	50,3	57	113
4	40,1	47,5	118
5	32,1	40,3	126
6	25,7	35,5	138
7	20,6	31,4	153
8	16,5	28,4	172
9	13,3	24,6	185
10	10,7	22,4	209
11	8,7	18,7	215
12	7,0	18,0	257
13	5,6	15,6	280
14	4,6	14,3	310
15	3,7	12,6	340
16	3,0	11,4	378
17	2,4	9,6	400
18	2,0	8,2	410
19	1,6	6,65	415

Tabelle 13.

$\frac{1}{200}$ Vol. TSSp. = 180 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen ca. 162,5 kV.
Filter: 0,5 Cu. + 1 Al.

$$\mu = 0,166.$$

A	B	C	D
0	100	100	100
1	79,3	80	101
2	63,1	64	101,5
3	50,3	51,3	102,0
4	40,1	41,7	104,0
5	32,1	34,2	106,5
6	25,7	28,0	109
7	20,6	23,3	113
8	16,5	19,2	116,5
9	13,3	16,4	123
10	10,7	13,8	129
11	8,7	11,8	136
12	7,0	10,1	144
13	5,6	8,8	157
14	4,6	7,6	165
15	3,7	6,3	170
16	3,0	5,2	173,5
17	2,4	4,7	174
18	2,0	3,5	175
19	1,6	2,8	175

Tabelle 14.

$\frac{1}{1}$ Vol. TSSp. = 180 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 150 kV.
Filter: 0,5 Cu + 1 Al.

$$\mu = 0,180.$$

A	B	C	D
0	100	100	100
1	78,3	82,5	105
2	61,4	68,0	111
3	78,2	55,0	114
4	37,9	45,0	119
5	29,9	37,0	124
6	23,6	32,0	136
7	18,7	28,0	150
8	14,8	26,0	176
9	11,8	24,0	204
10	9,3	23,0	247
11	7,4	21,5	290
12	5,9	20,0	339
13	4,7	17,9	380
14	3,8	15,6	410
15	3,0	12,8	426
16	2,4	10,5	439
17	1,9	8,6	448
18	1,5	6,8	454
19	1,2	5,5	458

Tabelle 15.

$\frac{1}{4}$ Vol. TSSp. = 180 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 150 kV.
Filter: 0,5 Cu. + 1 Al.

$$\mu = 0,180.$$

A	B	C	D
0	100	100	100
1	78,3	81,5	104
2	61,4	65,0	106
3	78,2	53,3	110
4	37,9	43,0	114
5	29,9	35,5	119
6	23,6	30,3	128
7	18,7	26,5	142
8	14,8	22,0	148
9	11,8	20,6	174
10	9,3	20,0	215
11	7,4	17,0	230
12	5,9	15,5	263
13	4,7	13,5	287
14	3,8	11,9	313
15	3,0	11,0	366
16	2,4	9,2	380
17	1,9	7,3	381
18	1,5	5,9	394
19	1,2	4,8	396

Tabelle 16.

$\frac{1}{10}$ Vol TSSp. = 180 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 150 kV.
Filter: 0,5 Cu. + 1 Al.

 $\mu = 0,180.$

A	B	C	D
0	100	100	100
1	78,3	81	103
2	61,4	64,5	105
3	48,2	53,0	110
4	37,9	42,7	113
5	29,9	35,0	117
6	23,6	29,6	126
7	18,7	25,3	135
8	14,8	21,3	144
9	11,8	18,9	160
10	9,3	17,2	185
11	7,4	15,6	210
12	5,9	14,2	240
13	4,7	12,6	268
14	3,8	11,2	295
15	3,0	9,6	320
16	2,4	8,0	334
17	1,9	6,7	352
18	1,5	5,4	358
19	1,2	4,3	359

Tabelle 17.

$\frac{1}{200}$ Vol. TSSp. = 180 kV. Spannung
an den Röhrenklemmen: ca. 150 kV.
Filter: 0,5 Cu. + 1 Al.

 $\mu = 0,180.$

A	B	C	D
0	100	100	100
1	78,3	79,5	101
2	61,4	62,6	102
3	48,2	50,1	104
4	37,9	40,1	106
5	29,9	32,3	108
6	23,6	26,5	112
7	18,7	22,1	118
8	14,8	18,1	122
9	11,8	15,1	128
10	9,3	12,2	132
11	7,4	9,9	134
12	5,9	8,3	140
13	4,7	6,95	148
14	3,8	5,6	148
15	3,0	4,5	150
16	2,4	3,7	153
17	1,9	2,9	154
18	1,5	2,3	156
19	1,2	1,9	158

Tabelle 18.

Abhängigkeit der Intensität im Zentralstrahl von dem Fokus-Oberflächenabstand bei 220 kV TSSp. und einem Abschwächungskoeffizienten $\mu = 0,140$, $\frac{1}{1}$ Vol. (vgl. Tab. 2 und Abb. 21) Wasser

Fokus-Oberflächenabstand	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
	%	%	%	%	%
0 cm Tiefe	100	100	100	100	100
5 cm Tiefe	70,2	75,1	78,6	81,5	83,0
10 cm Tiefe	47,5	54,2	59,0	62,3	64,6
15 cm Tiefe	29,0	34,8	39,2	41,5	45,0

Tabelle 19.

Abhängigkeit der Intensität im Zentralstrahl von dem Fokus-Oberflächenabstand bei 200 kV TSSp. und einem Abschwächungskoeffizienten $\mu = 0,149$, $\frac{1}{1}$ Vol. (vgl. Tab. 6 und Abb. 21) Wasser

Fokus-Oberflächenabstand	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
	%	%	%	%	%
0 cm Tiefe	100	100	100	100	100
5 cm Tiefe	60,0	64,3	67,2	69,7	71,0
10 cm Tiefe	43,0	49,0	53,3	56,5	58,5
15 cm Tiefe	26,0	31,2	35,1	37,2	40,3

Tabelle 20.

Abhängigkeit der Intensität im Zentralstrahl von dem Fokus-Oberflächenabstand bei 180 kv TSSp. und einem Abschwächungskoeffizienten $\mu = 0,166, \frac{1}{1}$ Vol. Wasser (vgl. Tab. 10 und Abb. 21).

Fokus-Oberflächenabstand	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
	%	%	%	%	%
0 cm Tiefe	100	100	100	100	100
5 cm Tiefe	45,4	48,6	50,8	52,7	53,7
10 cm Tiefe	30,0	34,2	37,2	39,3	40,7
15 cm Tiefe	17,3	20,8	23,4	24,8	26,8

Tabelle 21.

Abhängigkeit der Intensität im Zentralstrahl von dem Fokus-Oberflächenabstand bei 150 kv Klemmenspannung an der Röhre und einem Abschwächungskoeffizienten $\mu = 0,180, \frac{1}{1}$ Vol. Wasser (vgl. Tab. 14 und Abb. 21).

Fokus-Oberflächenabstand	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm
	%	%	%	%	%
0 cm Tiefe	100	100	100	100	100
5 cm Tiefe	37,0	39,5	41,4	42,9	43,6
10 cm Tiefe	23,0	26,2	28,5	30,1	31,3
15 cm Tiefe	12,8	15,3	17,2	18,3	19,8

Diese Kurven der A-Schar enthalten nur die Intensitäten im Zentralstrahl. Nun besteht aber eine starke Abhängigkeit der Intensitätsverteilung von der Seitenerstreckung der Pyramide. Da bei den Versuchen rechteckige Blenden verwandt wurden, so ist die Intensitätsabnahme wegen der um einen zentralen Punkt in einer gewissen Tiefe verschieden stark entstehenden Streustrahlung nicht rotationssymmetrisch, vielmehr nimmt von dem Zentralstrahl aus die Intensität in der Längsrichtung der Pyramiden weniger rasch ab als nach der Querrichtung. Diese Abhängigkeit ändert sich mit verschiedenen Tiefen. Die stärkste seitliche Intensitätsabnahme ist an der Oberfläche, bei einer Tiefe von ca. 15 cm an nähert sich dieser Gang einem Minimum. Die Abb. 13—16 stellen diese Abhängigkeit wieder für verschiedene Strahlenqualitäten dar. Es sei zu diesen Abbildungen noch bemerkt, daß hierbei im Gegensatz zu den Untersuchungen von Friedrich sich mit Hilfe unserer photographischen Methode mehrfach kein kontinuierlicher Übergang von dem direkt durchstrahlten Volumen zu dem nur Streustrahlen empfangenden ergab. Es mag dies daran liegen, daß es bei den Versuchen von Friedrich nicht möglich war, einzelne Punkte mit Hilfe der Ionisationskammer zu erfassen, und wenn dann an dem Rand der Pyramide gemessen wird, so hat er eben nicht nur den Rand allein, sondern auch noch dessen nächste Umgebung, die sowohl von direkten Strahlen und Streustrahlen von der einen Seite als auch von gestreuter Strahlung von der an-

deren Seite getroffen wird. Dieser Intensitätssprung am Rande des durchstrahlten Volumens vermindert sich mit zunehmender Tiefe und verschwindet von ungefähr 15 cm Tiefe an. Auf Grund dieser verschiedenen Resultate kann man sich einzelne Schnitte in verschiedenen Tiefen durch das durchstrahlte Volumen senkrecht zum Zentralstrahl gelegt denken (Grundrisse), von denen solche in 10 cm Tiefe bei den verschiedenen Strahlenqualitäten und einigen der verwandten Kegelgrößen dargestellt sind (vgl. Abb. 17—20).

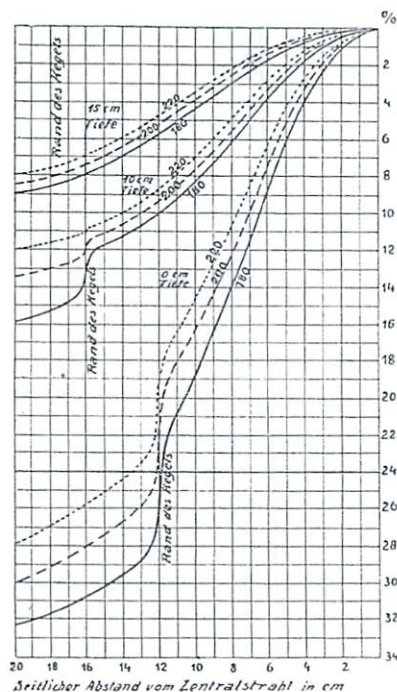


Abb. 13.

Abnahme der Intensitäten von der Mitte nach dem Rande (Längserstreckung) der Pyramide, $\frac{1}{4}$ Vol. bei drei verschiedenen Spannungen und in drei verschiedenen Tiefen.

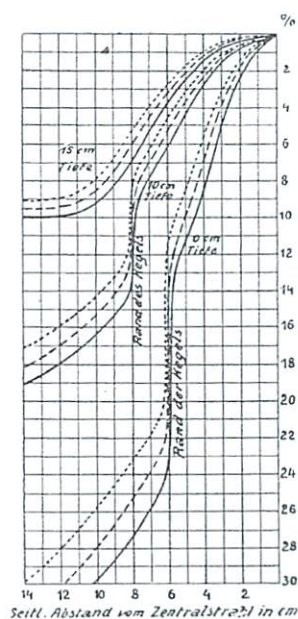
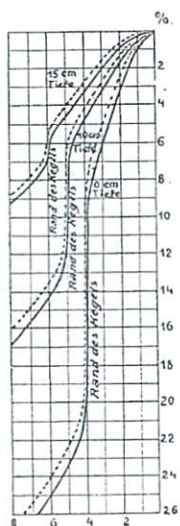


Abb. 14.

Abnahme der Intensitäten von der Mitte nach dem Rande (Längserstreckung) der Pyramide $\frac{1}{4}$ Vol. bei drei verschiedenen Spannungen und in drei verschiedenen Tiefen.

Das direkt in 10 cm Tiefe getroffene Gebiet ist mit den Buchstaben A, B, C, D bezeichnet, innerhalb dessen die Intensitäten nach den erhaltenen Meßergebnissen eingetragen sind. Verbindet man dann Punkte gleicher Intensität miteinander, so erhält man ellipsenähnliche Gebilde, die innerhalb des durchstrahlten Gebietes zu den Achsen symmetrisch verlaufen. In der Mitte sind die so entstehenden Kurven deswegen annähernd kreisförmig, weil die um den Zentralpunkt herumliegenden Punkte von allen Seiten

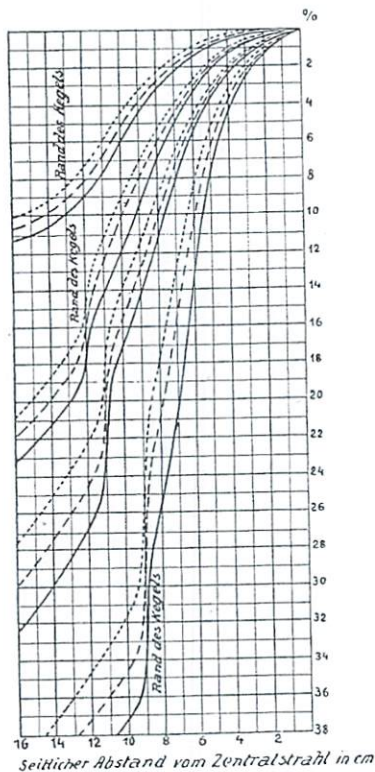
viel Streustrahlung erhalten. Je weiter man sich aber von dem Zentralpunkt entfernt, um so größer werden die Unterschiede in der hinzukommenden Streustrahlung, denn Punkte die in der Längserstreckung der Pyramide liegen — die also von einem verhältnismäßig größeren durchstrahlten Wasservolumen umgeben sind als Punkte in der Quererstreckung — erhalten mehr gestreute Intensität als solche in der Quererstreckung



Seitlicher Abstand vom Zentralstrahl in cm

Abb. 15.

Abnahme der Intensitäten von der Mitte nach dem Rande (Längserstreckung) der Pyramide $\frac{1}{10}$ Vol. bei drei verschiedenen Spannungen und in drei verschiedenen Tiefen.



Seitlicher Abstand vom Zentralstrahl in cm

Abb. 16.

Abnahme der Intensitäten von Mitte nach dem Rande (Quererstreckung) der Pyramide $\frac{1}{1}$ Vol. bei drei verschiedenen Spannungen und in vier verschiedenen Tiefen.

dem Rande der Pyramide naheliegende Punkte. Am Rande der durchstrahlten Pyramide zeigen die Figuren den Intensitätssprung, der zu erwarten ist, weil hier direkte Strahlung überhaupt nicht mehr eintrifft. In dem Gebiet, das nur von Streustrahlung getroffen wird, verlaufen die Linien geringerer Intensität außerhalb des durchstrahlten Gebietes ebenfalls symmetrisch.

Um für den Zentralstrahl eine übersichtliche Darstellung der Vermehrung der berechneten Intensität durch die Streukomponente zu erhalten, sind in den Abb. 4, 5, 6, 7 in der B-Schar die wirklichen gemessenen Intensitäten in Prozenten der errechneten Intensitäten aufgetragen. Aus diesen Kurven ist ersichtlich, daß die Streuintensität mit der Tiefe zunächst langsam zunimmt, dann aber in einer Tiefe von ca. 5 cm ab ziemlich rasch ansteigt, um sich dann in einer Tiefe von ca. 15 cm einer Gleichgewichtslage zu nähern.

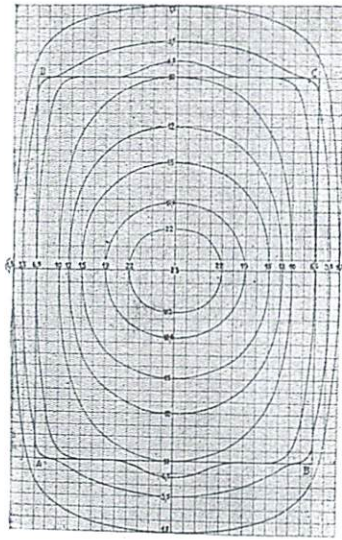


Abb. 17.

Querschnitt in 10 cm Tiefe durch große Pyramide; 30 cm Fokus-Haut; Einfallsfeld 18×24 cm; Spannung an der Röhre 150 kV, $\mu = 0,180$; Filter: 0,5 Cu. + $\text{Wasser}^{1,0}$ Al; Wolfram- oder Platin-Antikathode.

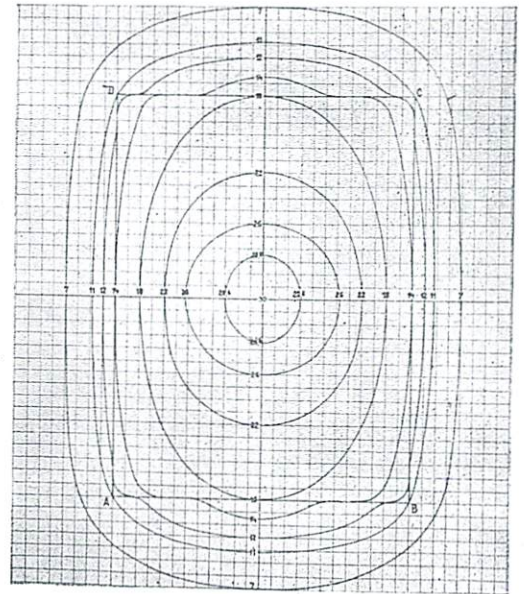


Abb. 18.

Querschnitt in 10 cm Tiefe durch große Pyramide; 30 cm Fokus-Haut; Einfallsfeld 18×24 cm; Spannung am Transformator 180 kV, an der Röhre 162,5 kV, $\mu = 0,166$; Filter: 0,5 Cu + 1 Al; $\text{Wasser}^{1,0}$ Wolfram- oder Platin-Antikathode.

Die zu den verschiedenen Abschwächungskoeffizienten gehörigen Intensitätsverteilungen ergeben also: zunächst innerhalb jeder Figur (durch die A-Schar) eine deutliche Zunahme der Gesamtintensitäten mit Vergrößerung des durchstrahlten Volumens, ferner (in der B-Schar) eine Zunahme der Streuintensität mit der durchstrahlten Tiefe des Mediums. Beide Zunahmen nähern sich einer Grenze. Schließlich geben die Abb. 4, 5, 6, 7 und 8, miteinander verglichen, einen deutlichen Gang mit der Strahlenqualität, das heißt mit abnehmendem Abschwächungskoeffizienten steigt die Streuintensität.

VI.

Die Abhängigkeit der Intensitätsverteilung bei gleicher Strahlenqualität und verschiedenen Fokushautabstand zeigen die Tabellen 18—21.

Man sieht, wie zu erwarten war, daß mit Vergrößerung des Fokushautabstandes die Intensität in jeder Tiefe bei sonst gleichen Bedingungen (gleicher Spannung, Filterung und gleichem durchstrahlten Volumen) regelmäßig vergrößert wird. Es lag nun nahe, die Intensitäten, die sich auf Grund der Vergrößerung des Fokushautabstandes ergaben, mit Hilfe des quadratischen Abstandsgesetzes zu errechnen. Die Ab-

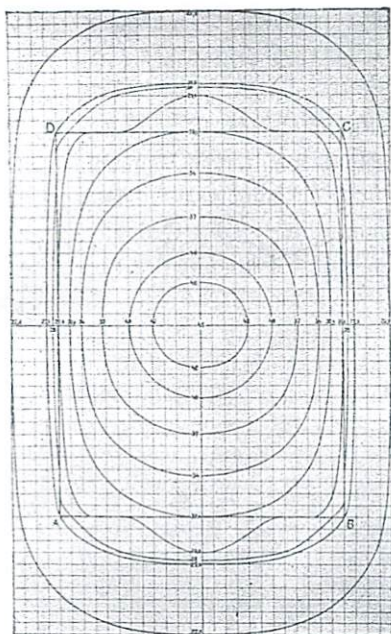


Abb. 19.

Querschnitt in 10 cm Tiefe durch große Pyramide; 30 cm Fokushaut; Einfallsfeld 18×24 cm; Spannung am Transformator 200 kV, an der Röhre 151,5 kV; $\mu = 0,149$; Filter: 0,8 Cu + 1 Al; Wasser; Wolfram- oder Platin-Antikathode.

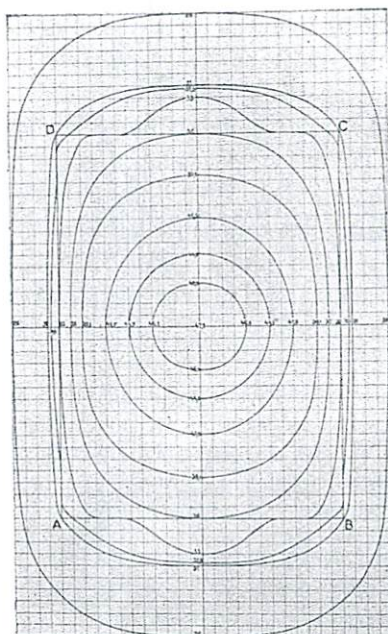


Abb. 20.

Querschnitt in 10 cm Tiefe durch große Pyramide; 30 cm Fokushaut; Einfallsfeld 18×24 cm; Spannung am Transformator 220 kV, an der Röhre 200 kV; $\mu = 0,140$; Filter: 1,3 Cu + 1,0 Al; Wasser; Wolfram- oder Platin-Antikathode.

hängigkeit von dem Quadratgesetz zeigte sich bei den verschiedenen Autoren¹⁾ nicht so klar, wie angenommen werden mußte. So meinten Opitz und Friedrich, daß bei Vergrößerung des Fokushautabstandes und kleineren Kegeln zunächst das Quadratgesetz nicht mehr gelte, wohl

¹⁾ Opitz und Friedrich, l. c. — Seitz und Wintz, l. c.

aber wieder bei großen Fokushautabständen und bei großen Kegeln. Opitz und Friedrich deuten richtig an, daß die Größe des Brennflecks der Antikathode von Wichtigkeit ist. Es ist klar, daß das Quadratgesetz nur streng gültig ist für eine Strahlenquelle, deren Größe im Verhältnis zum Abstand verschwindet.

Ein bedeutend mehr ins Gewicht fallender Grund scheint uns aber darin zu liegen, daß diese Autoren bei Vergrößerung des Fokushautabstandes die Größe der Einfallfelder beibehielten und so das durchstrahlte Volumen nicht konstant hielten. Darauf weist Friedrich in seiner letzten Arbeit¹⁾ ausdrücklich hin. Bei Vergrößerung des Fokushautabstandes unter Beibehaltung der Einfallspforte verkleinert sich das durchstrahlte Volumen, und es ist ohne weiteres einzusehen, daß zentral gelegene Punkte nicht mehr so viel Streuintensität erhalten. Unsere Versuche weichen daher von den genannten auch darin ab, daß wir die Änderung mit steigendem Abstande bei konstant gehaltenem Volumen prüften, d. h., wir haben für jeden Fokushautabstand dasjenige Einfallfeld gewählt, welches das durchstrahlte Volumen konstant ließ. Die Größen der Einfallspforten sind auf Tabelle 1 angegeben. Dabei kommt das quadratische Abstandsgesetz wieder zur Erscheinung, weil nur der Fehler durch veränderte Streueinflüsse seine Ungültigkeit vorgetäuscht hat.

Die für die Berechnung der Intensitäten bei verschiedenen Fokushautabständen notwendige Theorie möge hier kurz entwickelt werden. Es sei S_x die Intensität an einem zu messenden Punkt in der Tiefe. Diese Intensität setzt sich zusammen aus primär eingestrahelter Intensität und hereingestreuter Intensität. Wird die Intensität S_x in X cm Tiefe bei r cm Fokus-Oberflächen-Abstand genannt, so besteht die Gleichung

$$S_x = \frac{r_0^2}{(r_0 + x)^2} (A + B)$$

wobei A die Intensität ist, die auf Grund der gesamten Abschwächung an die Stelle X gelangt und B ein Glied ist, das sich als eine Funktion des Volumens (V) der Schichtdicke (X) und des Seitenabstandes (N) darstellt. Solange nun das durchstrahlte Volumen konstant bleibt, ändert sich das Glied A nicht und B nicht wesentlich. Es kann sich nur das Glied ändern, das durch das quadratische Abstandsgesetz in die Gleichung eingeht, also das Glied:

$$\frac{r_0^2}{(r_0 + x)^2}$$

Wird der Fokushautabstand um Δr vergrößert, dann vergrößert sich der Abstand des Punktes, an dem die Intensität S_x gemessen wird, ebenfalls um Δr . Es gilt nun die für die Veränderung q einfache Beziehung:

$$q = \frac{\frac{r_0^2}{(r_0 + \Delta r + x)^2}}{\frac{r_0^2}{(r_0 + x)^2}}$$

¹⁾ Friedrich und Körner, l. c.

Für den Zentralstrahl gilt diese Formel ohne weiteres, und wie die Versuchsergebnisse zeigten, auch noch für die nächste Umgebung um den Zentralstrahl. Die Faktoren q , mit denen die Intensitäten S_x zu multiplizieren sind und die sich einfach aus obiger Gleichung errechnen lassen, sind in der Tabelle 22 angegeben. Ausgegangen sind wir von den Messungen bei einem Fokushautabstand $r = 30$ cm. Δr bedeutet die Vergrößerung des Fokushautabstandes, ist also der Reihe nach 10, 20, 30, 40 cm. Die Punkte der Intensität S_x wurden in 5, 10, 15 und 20 cm Tiefe angenommen. Da es natürlich auch wünschenswert ist, zwischenliegende Werte zu erhalten, haben wir in der folgenden Kurve (Abb. 21) die Resultate veranschaulicht und es ist leicht, für jeden beliebigen Punkt bis 20 cm Tiefe den Umrechnungsfaktor, mit dem also die Intensität bei 30 cm Fokushautabstand zu multiplizieren ist, zu ersehen.

Tabelle 22.
(Zur Bezeichnung der Umrechnungsfaktoren q .)

$r + \Delta r$ in cm	$(r + \Delta r)^2$	$r + \Delta r + x$ in cm	$(r + \Delta r + x)^2$	$\frac{(r + \Delta r)^2}{(r + \Delta r + x)^2} = a$	$(r + x)^2$	$\frac{r^2}{(r + x)^2} = b$	$q = \frac{a}{b}$
40	1600	40	1600	1	900	1	1
		45	2025	0,781	1225	0,735	1,07
		50	2500	0,640	1600	0,562	1,14
		55	3025	0,525	2025	0,438	1,20
		60	3600	0,445	2500	0,35	1,27
50	2500	50	2500	1	900	1	1
		55	3025	0,82	1225	0,735	1,12
		60	3600	0,695	1600	0,562	1,24
		65	4225	0,592	2025	0,438	1,35
		70	4900	0,51	2500	0,35	1,45
60	3600	60	3600	1	900	1	1
		65	4225	0,85	1225	0,735	1,16
		70	4900	0,735	1600	0,562	1,31
		75	5625	0,64	2025	0,438	1,46
		80	6400	0,563	2500	0,35	1,61
70	4900	70	4900	1	900	1	1
		75	5625	0,87	1225	0,735	1,18
		80	6400	0,765	1600	0,562	1,36
		85	7225	0,68	2025	0,438	1,55
		90	8100	0,605	2500	0,35	1,73

In der Praxis werden nun nicht immer Einfallskegel von der von uns verwendeten Größe benutzt. Man kann aber auch leicht die Intensitäten für jedes durchstrahlte Volumen aus den Resultaten ableiten. Es zeigt sich nämlich, daß für verschieden groß durchstrahlte Volumina die Streuzusatzdosis mit der Vergrößerung des durchstrahlten Volumens wächst. Unsere Pyramidengrößen stehen in einem bestimmten Verhältnis, nämlich

in dem Verhältnis $1/200 : 1/10 : 1/4 : 1/1$. Die Streuzusatzdosis ergibt sich sehr einfach als die Differenz der gemessenen Gesamtintensität und der

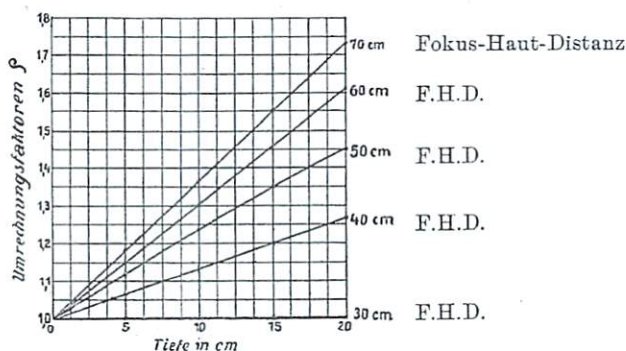


Abb. 21.

theoretisch berechneten Intensität. Trägt man in ein Koordinatensystem die Streuzusätze als Funktion der Kegelgrößen auf, so sieht man die in den Abb. 22—25 dargestellten Gesetzmäßigkeiten. Wird nun eine abweichende Einfallsfläche von z. B. 6×8 cm und damit

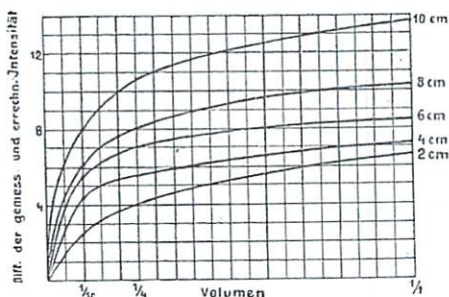


Abb. 22.

Zuwachs der Streuung in Abhängigkeit von der Größe der Strahlenpyramide ca. 150 kV an der Röhre. μ -Wasser = 0,180

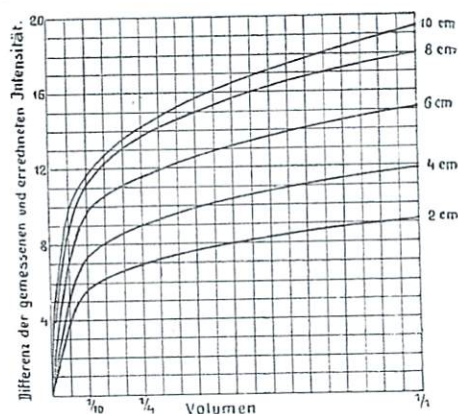


Abb. 23.

Zuwachs der Streuung in Abhängigkeit von der Größe der Strahlenpyramide ca. 162,5 kV an der Röhre. μ -Wasser = 0,166.

ein abweichendes Volumen bei einem bestimmten Fokus-Hautabstand verwendet, so läßt sich dieses durchstrahlte Volumen ohne weiteres errechnen. Den so erhaltenen Wert dividiert man in das von uns angegebene größte durchstrahlte Volumen ($\text{Vol.} = 1/1$) und sucht sich den so erhaltenen Quotienten auf der Abszisse der Abb. 22—25. Eine Parallele durch diesen Punkt zur Ordinatenachse schneidet dann die für verschieden tief gelegene

Punkte angegebenen Kurven und die Schnittpunkte bzw. die zugehörigen Ordinaten geben sofort den Streuzusatz. Ein Beispiel möge dies erläutern:

Wenn die Einfallspforte auf der Oberfläche 6×8 cm² beträgt, so ist das durchstrahlte Volumen bei einem Fokusoberflächenabstand von 30 cm, 1741,6 cm³. Das unseren Messungen zu Grunde gelegte größtdurchstrahlte Volumen ist 15680 cm³. Demnach ist das fragliche Volumen ca. $\frac{1}{9}$ des größten von uns verwendeten. Nehmen wir an, wir arbeiteten unter den oft genannten Bedingungen bei einer Spannung von 180 Kilovolt an der Röhre ($\mu = 0,149$), so nehmen wir diejenige Verteilungskurve zur Hand, die sich auf diese Spannung bezieht. In der Abb. 24

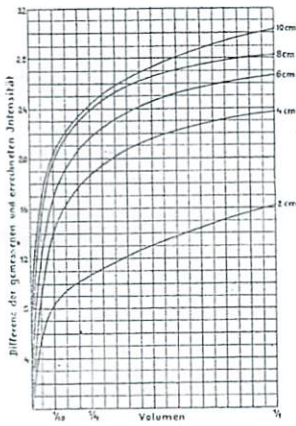


Abb. 24.

Zuwachs der Streuung in Abhängigkeit von der Größe der Strahlenpyramide ca. 181,5 kV an der Röhre. μ Wasser = 0,149

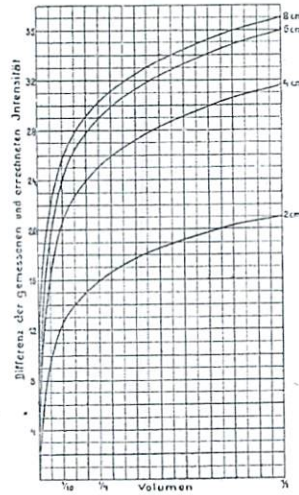


Abb. 25.

Zuwachs der Streuung in Abhängigkeit von der Größe der Strahlenpyramide ca. 200 kV an der Röhre. μ -Wasser = 0,140.

haben wir Parallelen zur Ordinate gezogen, die diese Werte für die bei fünf verschiedenen Spannungen sich ergebenden Streuzusätze in den Schnittpunkten der einzelnen Kurven ergeben.

VII.

Wir haben bis jetzt folgende Zusammenhänge aus den Kurven und Tabellen quantitativ erkannt.

1. Den Einfluß der Tiefe auf die Intensität an einem Punkte (Abb. 4—7).
2. Den Einfluß des durchstrahlten Volums (Abb. 4—7 und 22—25).
3. Den Einfluß der Strahlenhärte (Abb. 4—7).
4. Die Abhängigkeit von dem Fokusoberflächenabstand (Tabelle 18—21).
5. Die Abhängigkeit von der Seitenlage (Abb. 17—20 und 13—16).
6. Die Energieverteilung außerhalb des durchstrahlten Volumens (wie 5).

Außerdem haben wir gelernt, wie aus den gewonnenen Resultaten für alle möglichen Strahlenkegel und alle möglichen Fokusoberflächenabstände die Intensitätsverteilung vermittelt werden kann. Bevor wir zur graphischen Darstellung für den medizinischen Gebrauch übergehen, bleibt noch die Abhängigkeit vom Antikathodenmaterial zu besprechen. Vergleichsversuche haben ergeben, daß Röhren mit Platinantikathoden in den von uns

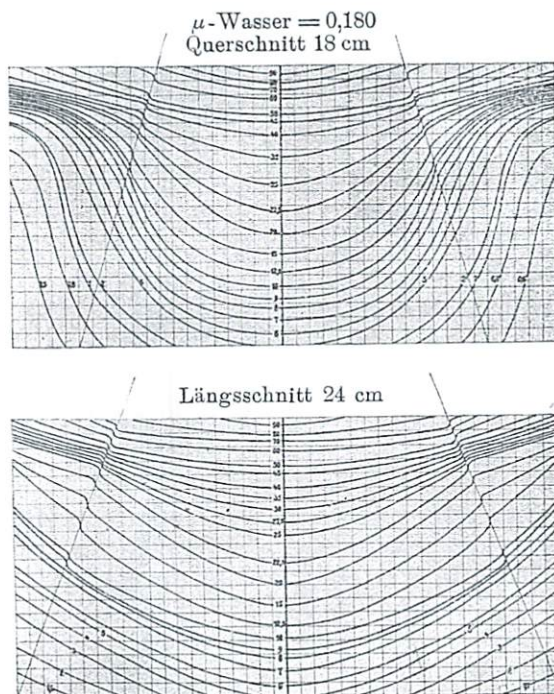


Abb. 26.

Intensitätsverteilung bei folgenden Bedingungen: Fürstenau-Coolidge-Röhre mit Wolfram- oder Platin-Antikathode; Klemmenspannung an der Röhre (wegen der Nadelschalterverluste) 150 kV; Belastung bis zu 2,5 MA; Filter: 0,5 Cu + 1,0 Al; Fokus-Haut-Abstand: 30 cm; Einfallsfeld auf der Haut 18 × 24 cm. Entladungsform: Hochspannungstransformator mit Nadelschalter (gemessen mit Intensiv-Reform-Apparat).

geprüften Bedingungen eine um ca. 10% größere Intensität als solche mit Wolframantikathode liefern. Dagegen ist die Verteilung der Röntgenenergie in der Tiefe relativ, so wie bei derjenigen, die durch Wolframantikathode erzeugt ist.

Zusammenfassung der Resultate.

Es wurde für fünf verschiedene Strahlenqualitäten die Intensitätsverteilung der Röntgenstrahlen für verschiedene Kegelgrößen gemessen.

Die Untersuchungen ergeben Aufschluß über das Verhältnis der gestreuten Strahlung zur direkt eingestrahnten und zur Gesamtintensität. Es ist möglich, auf Grund unserer Untersuchungen festzustellen, wie groß der Streuzusatz für eine beliebige Kegelgröße ist, wenn eine der von uns benützten Strahlenqualitäten zur Anwendung gelangt. Die Intensitäten inkl. der Streustrahlung übertreffen die nach dem Abschwächungsgesetz errechneten

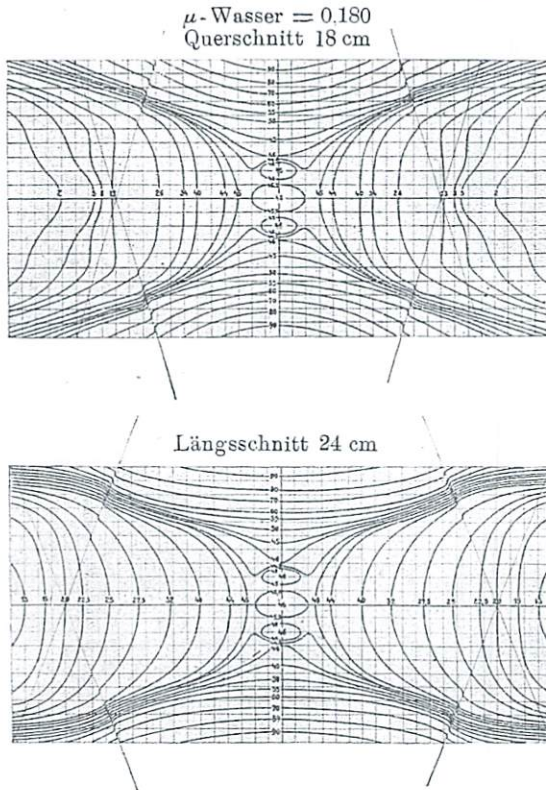


Abb. 27.

Kombination von zwei gleichgroßen Kegeln von vorn und hinten. Intensitätsverteilung bei folgenden Bedingungen: Fürstenau-Coolidge-Röhre mit Wolfram- oder Platin-Antikathode; Klemmenspannung an der Röhre (wegen der Nadel-schalterverluste) 150 kV; Belastung bis zu 2,5 MA; Filter: 0,5 Cu + 1,0 Al; Fokus-Haut-Abstand: 30 cm; Einfallsfeld auf der Haut: 18×24 cm; Entladungsforn: Hochspannungstransformator mit Nadelschalter (gemessen mit Intensiv-Reform-Apparat).

Intensitäten (die mit verhältnismäßig weichen Strahlen und kleinen Kegeln annähernd der Wirklichkeit entsprechen) weitaus. Die Intensitätsabfälle nach dem Rande des Kegels sind recht beträchtlich, und es ist verkehrt, wenn auf Grund von in der Mitte des durchstrahlten Volumens gemachten

Messungen auf die Intensität an der Seite geschlossen wird. Das ist in der Praxis öfter geschehen und es ist zu verwerfen.

Auf Grund dieser Versuchsergebnisse gewinnt das technische Problem (das medizinische Problem ist eine Sache für sich und muß von medizinischer Seite gelöst werden) eine andere Gestalt. Die Bestrahlung irgendeines gegebenen Krankheitsherdes ist technisch etwa folgendermaßen anzufassen:

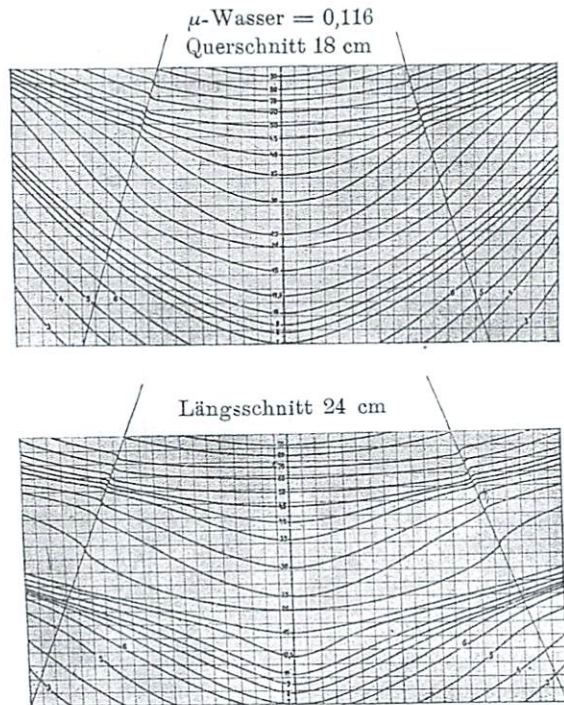


Abb. 28.

Intensitätsverteilung bei folgenden Bedingungen: Fürstenau-Coolidge-Röhre mit Wolfram- oder Platin-Antikathode; Transformatorscheitelspannung ca. 180 kV; Klemmenspannung an der Röhre (wegen der Nadelschalterverluste) 162,5 kV; Belastung bis zu 2,0 MA; Filter: 0,5 Cu + 1,0 Al; Fokus-Haut-Abstand: 30 cm; Einfallsfeld auf der Haut 18 × 24 cm; Entladungsform: Hochspannungstransformator mit Nadelschalter (gemessen mit Intensiv-Reform-Apparat).

Der Arzt hat aus der Untersuchung eines Kranken eine möglichst präzise Kenntnis nicht nur der Art, sondern der gesamten Ausdehnung in Tiefe, Breite und Höhe des Krankheitsherdes erlangt. Eine maßstäbliche Aufzeichnung, zweckmäßigerweise z. B. auf Pauspapier, gibt ein Bild der räumlichen Ausdehnung und der Lage zu den Oberflächen des menschlichen Körpers.

Auf diese Weise wird aus dem Krankheitsgebiet ein den physikalischen Methoden zugängliches geometrisches Gebilde, welchem ein medizinischerseits vorgeschriebenes Maß von Strahlenenergie unter den Verteilungsgrundsätzen der Homogenstrahlungslehre zuzuführen ist. Die Kenntnis der

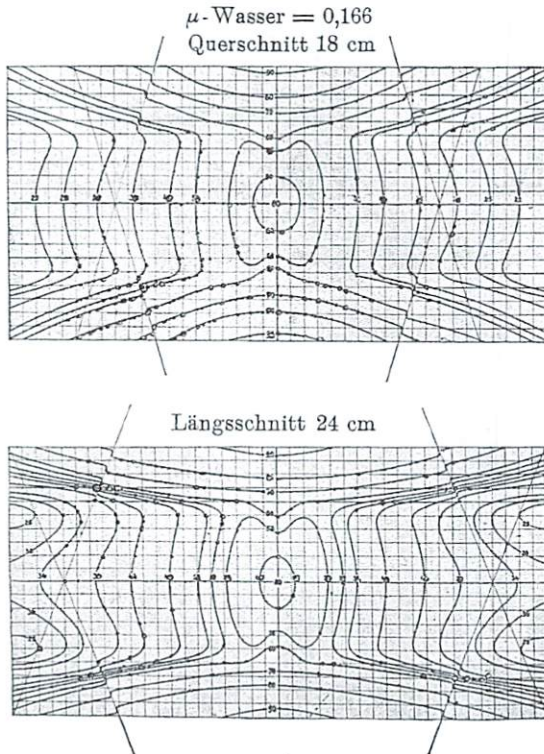


Abb. 29.

Kombination von zwei gleichgroßen Kegeln von vorn und hinten. Intensitätsverteilung bei folgenden Bedingungen: Fürstenau-Coolidge-Röhre mit Wolfram- oder Platin-Antikathode; Transformatorscheitelspannung ca. 180 kV; Klemmenspannung an der Röhre (wegen der Nadeschalterverluste) 162,5 kV; Belastung bis zu 2,0 MA; Filter: 0,5 Cu + 1,0 Al; Fokus-Haut-Abstand 30 cm; Einfallsfeld auf der Haut: 18 × 24 cm; Entladungsform: Hochspannungstransformator mit Nadeschalter (gemessen mit Intensiv-Reform-Apparat).

Intensität, die bei Verwendung einer bestimmten Strahlenqualität an irgendeinen Ort in der Tiefe gelangt, geben die Abb. 26 u. ff. (auch 17 u. f.) Man überträgt sie, indem man die Pause auf das Schema der Abbildungen¹⁾

¹⁾ Das Sekretariat des Institutes sendet gegen Erstattung des Unkostenpreises die von uns hergestellten Intensitätsverteilungen für verschiedene Strahlenqualitäten, verschieden durchstrahlter Volumen und verschiedene Fokusoberflächenabstände.

legt und man kann nunmehr ablesen, wieviel Prozent der Oberflächenintensität an jeden Punkt des Krankheitsherdes kommen. Durch Kombinieren mit anderen Kegeln läßt sich die Intensität erhöhen und man muß versuchen, jeden Punkt des Krankheitsherdes mit genügender Intensität zu versehen. Es genügt dazu in vielen Fällen mit einer Strahlenqualität zu arbeiten, deren Abschwächungskoeffizient 0,166 ist; dann reichen manchmal schon vier Felder aus, um 100% der Oberflächenbeanspruchung in die

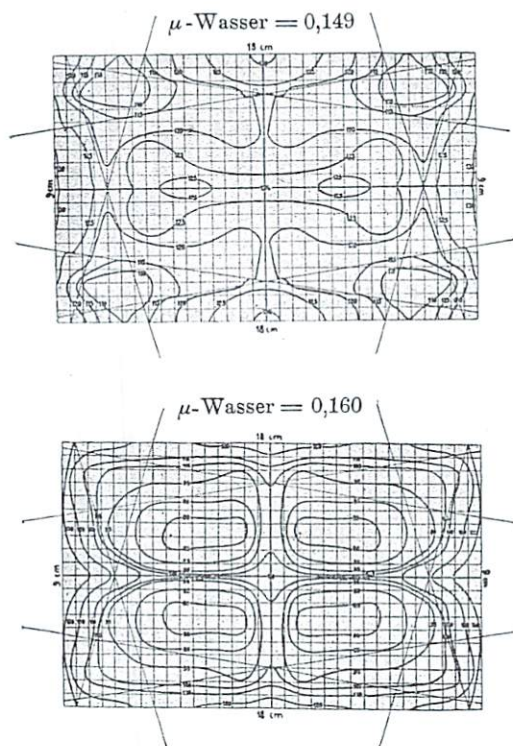


Abb. 30-31.

Kombination von vier Kegeln. Zwei große von vorn und hinten, zwei kleine von links und rechts, Einfallsfeld 18×24 u. 9×24 cm.

Tiefe von 10 cm zu bekommen. Es sei aber gleich gesagt, daß die Sache nicht so einfach ist, wie sie aussieht, und es ist daher der Zweck weiterer Arbeiten, eine genaue Bestrahlungstechnik auf der Grundlage dieser Ergebnisse aufzubauen.

Schemata, welche die Verteilung der Strahlen in der Tiefe veranschaulichen, sind schon seit fast 10 Jahren von verschiedenen Autoren angewendet worden. Prinzipielle Bedeutung hat dieser Schritt nicht, vielmehr nur der-

jenige Schritt, der die genaue Kenntnis der Intensitätsverteilung verleiht. Solange diese fehlte, waren alle Schemata falsch. Nachdem man sie kennt, kann man irgend ein praktisches Schema wählen, um die Handhabung der Kenntnis in der Praxis zu erreichen. Am besten kamen wir in den Fällen, wo man von medizinischer Seite unsere Mitarbeit wünschte, mit diesen Kegelzeichnungen und mit der Aufzeichnung des Krankheitsherdes und seiner Umgebung auf gutem Pauspapier zurecht.

Die größten Schwierigkeiten entstehen nicht bloß bei dem Uteruskarzinom, wo ein sehr ausgedehnter Wirkungsbereich in der Tiefe sich erstreckt, sondern vielmehr bei kleinen Gebilden, bei Zungen-, Kieferkarzinom u. dergl. Hier müssen noch besondere Hilfsmittel angewendet werden, die zwar auch schon seit langer Zeit angewendet worden sind,

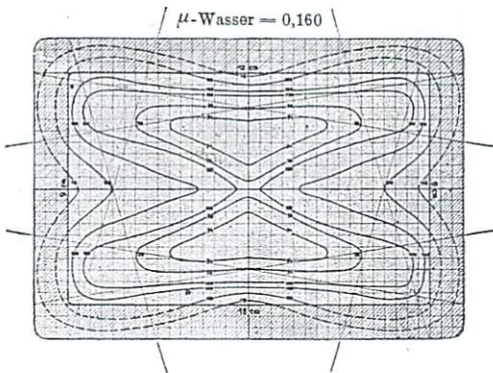


Abb. 32.

Kombination von vier Kegeln. Zwei große von vorn und hinten, zwei kleine von links und rechts; mit Paraffingürtel; Einfallsfeld 18×24 und 9×24 cm.

deren quantitative Bedeutung aber erst jetzt zur Geltung kommt. Es ist die Überdeckung, Umhüllung eines Körperteiles, z. B. des Halses oder Kiefers, durch einen anderen Körper von ähnlichen Absorptions- und Zerstreuungseigenschaften. Wasser, Paraffin und Wachs u. dergl. eignen sich dazu. Die Abb. 32 zeigt schematisch die Wirkung. Die Körperoberfläche ist durch eine schraffierte Schicht von beispielsweise 3 cm Paraffin überdeckt. Wendet man nun die Verteilungsgesetze anhand der oben beschriebenen schematischen Darstellungen an, so bekommt z. B. bei 180 000 Volt bei dem kleinsten der drei in Frage kommenden Kegel nun die erkrankte Stelle eine ganz andere relative Dosis als ohne die Paraffinüberdeckung. Statt der Oberfläche des Körpers wird die Oberfläche der Überdeckung den stärksten Intensitätsabfall, der in den ersten Zentimeter stattfindet, aufnehmen. Die quantitative Veränderung der Strahlungsbedin-

gungen oder mit einem Wort, die bessere Homogenisierung des Wirkungsfeldes durch Kenntnis der Strahlungsverteilung gibt diesem Hilfsmittel eine große Bedeutung. Dieses Hilfsmittel ist systematisch, wie wir glauben zuerst von Chaul in München und von v. Vieser in Wien angewendet worden.

Diese und andere Hilfsmittel, die uns zur Verfügung stehen, lassen für die Zukunft erhebliche Verbesserung der Resultate erhoffen.

Denn es ist sicher, daß (was von Warnekros und Dessauer in der mehrfach zitierten Arbeit ausgeführt ist) in der Vergangenheit und auch in der Gegenwart bei der weitaus größten Zahl der tiefentherapeutisch behandelten Fälle mit Sicherheit gesagt werden kann, daß schon die physikalischen Voraussetzungen der Bestrahlungen nicht erfüllt waren, daß nicht in allen Teilen des Krankheitsherdes genug und nirgends zu viel der Strahleneinwirkung vorhanden war. Aber es entstehen gleichzeitig neue und große Aufgaben. Jeder einzelne Typus von Fällen, die der Tiefentherapie zugewiesen werden, muß nun auf Grund der gewonnenen Kenntnisse medizinisch und physikalisch durchgedacht werden. Es werden sich mit Hilfe der gewonnenen Kenntnisse und verschiedenen Mittel besondere Methoden für die Bestrahlung des Brustkarzinoms, des Unterleibskarzinoms und anderen Fällen herausbilden lassen. Diese Methoden haben den Sinn, die Bedingungen zu erfüllen, die im Beginn der Tiefentherapie aufgestellt worden sind und sich bewahrt haben, nämlich die der sogenannten Homogenitäts-Strahlungslehre. Diese waren¹⁾ einmal die Benutzung einer sehr harten qualitativ homogenen Strahlung, d. h. einer solchen Strahlung, die nicht mehr aus allzu viel Komponenten besteht und deren Absorptionskoeffizienten so beschaffen sind, daß die Zusammensetzung der Strahlung in spezifisch leichten Körpergeweben sich nicht mehr merklich ändert. Das läßt sich heute verwirklichen. Das zweite Prinzip aber, das der quantitativen Homogenität, welche fordert, daß der ganze Krankheitsherd in seiner vollen Ausdehnung möglichst gleichmäßig viel der Strahlung bekommt, unter Vermeidung eines Übermaßes, insbesondere an gesunden Stellen, rückt seiner Erfüllung durch die Kenntnis der Energieverteilung entscheidend näher.

¹⁾ An den zitierten Stellen.