

## Die physikalischen und technischen Grundlagen der Tiefenbestrahlung.

Von

Ingenieur **Friedrich Dessauer, Frankfurt a. M.** (früher Aschaffenburg).

(Mit 9 Abbildungen im Text.)

A.

Die Bestrebungen, den biologischen Einfluß der X-Strahlung auch auf solche Prozesse anzuwenden, die sich nicht an der Oberfläche, sondern mehr oder weniger in der Tiefe des menschlichen Körpers abspielen, sind noch nicht alt. Der Amerikaner Senn (1), die Deutschen Albers-Schönberg (2) und Heinecke (3) u. a. beobachteten bereits in den Jahren 1903 und 1904 Einwirkungen der X-Strahlen auf die Tiefe und zwar auf die Milz und auf die samenbildenden Organe, die sich als besonders röntgenstrahlenempfindlich herausgestellt haben. Mit Zielbewußtsein an die Frage herangetreten zu sein, ob eine Beeinflussung pathologischer Gebilde in der Tiefe des menschlichen Körpers möglich sei, ist das Verdienst des Leipziger Chirurgen Perthes. In einer Arbeit: „Zur Frage der Röntgentherapie des Karzinoms“, welche 1904 im Archiv für klinische Chirurgie erschien, teilte er mit, daß es ihm gelungen sei, Lippenkarzinome mit Bestrahlungen durch die Haut hindurch zur Abheilung zu bringen. Die bedeutendste Arbeit und der eigentliche Beginn der Tiefenbestrahlung in der damaligen Zeit erschien Ende des Jahres 1904 in den Fortschritten auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen von Perthes (4) unter dem Titel: „Versuche einer Bestimmung der Durchlässigkeit menschlicher Gewebe für Röntgenstrahlen mit Rücksicht auf die Bedeutung der Durchlässigkeit der Gewebe für die Radiotherapie.“ Diese Arbeit kann als Anfang der Bestrebungen zur Tiefenbestrahlung bezeichnet werden. Perthes berichtete hier von ausführlichen Versuchen, die er angestellt habe, um festzustellen, wie weit in die Tiefe des menschlichen Körpers sich der biologische Einfluß erstreckte. Er verwandte, um den Einfluß in die Tiefe zu leiten, verschiedene Mittel, wählte größere Entfernung der Röntgenröhren, wählte harte X-Strahlung und filtrierte mit Hilfe von Staniol die ausgesandte X-Strahlung, um nur den härteren Teil zur Wirkung kommen zu lassen. Aber trotz dieser richtigen Methodik kam er zu einem im wesentlichen negativen Resultat, das für die Entwicklung des Tiefenbestrahlungsverfahrens keine günstige Prognose erlaubte. Er faßt das Resultat in seinen Schlußworten folgendermaßen zusammen: „Bei Bestrahlung des Körpers sinkt die Intensität der Röntgenstrahlen von der Körper-

oberfläche nach dem Körperinnern zu rasch ab. Bei Verwendung von mittelweichen Röhren ist in 1 cm Tiefe nur 50—60 Proz., in 2 cm Tiefe nur 35—45 Proz., in 3 cm Tiefe nur 20—30 Proz. der ursprünglichen Intensität vorhanden. Die Intensitätsabnahme erfolgt langsamer bei der Verwendung harter Röhren, aber auch in diesem Falle sinkt die Intensität im 4. cm unter 40 Proz., im 5. cm unter 25 Proz. des ursprünglichen Wertes herab. Die Intensitätsabnahme in der Tiefe erfolgt merklich langsamer, wenn auf die Körperoberfläche eine absorbierende Schicht, etwa 1 mm Aluminium gelegt wird.“

Ohne Kenntnis der Arbeiten von Perthes, aber angeregt durch eine Diskussion mit einem Freunde und früheren Mitarbeiter, Herrn Dr. med. Paul C. Franze, befaßte ich mich Ende des Jahres 1904 mit der physikalischen Lösung des Problemes der Tiefenbestrahlung und es gelang mir damals diese Lösung herbeizuführen (5 und 5a). Durch die Unterstützung von Exzellenz Czerny in Heidelberg konnte ich 1905 und 1906 eine derartige Tiefenbestrahlungsanordnung längere Zeit im Betriebe erhalten und ihre physikalischen Bedingungen praktisch ausprobieren. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe legte ich zum Beginne des Jahres 1907 der Deutschen physikalischen Gesellschaft vor, in deren Verhandlungen die Arbeit abgedruckt ist (6). Diese Arbeiten mit der Tiefenbestrahlung wurden in der damaligen Zeit von wenigen aufgegriffen, unter ihnen insbesondere von der Frauenklinik in Halle (Geheimrat Veit) (7) in Verbindung mit dem dortigen Physikalischen Institut (Geheimrat Dorn) (8), von Dr. Wetterer (9) in Mannheim, Schüller (10) und von anderen Stellen (10 a, b, c, d). Bald darauf gewann aber die Bewegung an Breite, überall wurde von Radiologen versucht in die Tiefe zu bestrahlen und die Methode, welche Perthes und ich angegeben hatten, wurde mehr oder minder vollkommen und mit verschiedener technischer Variation angewendet. Heute wird die Tiefenbestrahlung vielfach ausgeübt und es ist mit einiger Sicherheit vorauszusagen, daß ihre Anwendung noch viel weiter gedeihen wird, nachdem die anfangs überaus groß erscheinenden technischen Schwierigkeiten zur Durchführung rationeller Tiefenbestrahlung oder Homogenbestrahlung mit der Zeit überwunden werden konnten und uns neuerdings Maschinen zur Verfügung stehen, die das Geforderte mit einigermaßen genügender Ökonomie zu leisten vermögen. Die technische Durchbildung der Tiefenbestrahlung zu einer Methode, die nicht nur ganz vereinzelt angewendet werden kann, stammt aus neuerer Zeit. Wie meist in der Technik erst dann die Apparate zur notwendigen Vollkommenheit durchgebildet werden können, wenn ein konkretes Bedürfnis für sie vorliegt, so hat der glänzende Erfolg, der in der Behandlung des Myoms durch Röntgentiefenbestrahlung erzielt worden ist, die Maschine zur Erzeugung der

therapeutisch tiefwirkenden Strahlung endgültig erzogen. Im Nachfolgenden möchte ich zunächst die physikalischen, sodann die technischen Grundlagen der Tiefen- oder Homogenbestrahlung kurz darstellen und diejenigen Maschinen erwähnen, die zur Erzeugung der tiefwirkenden X-Strahlen sich bewährt haben. Am Schlusse möchte ich eine neue Maschine angeben, die ich in den letzten Monaten konstruierte und ausprobierte und die, wie mir scheint, in der Lage sein wird, die Bestrebungen der Tiefenbestrahlung ihrerseits zu fördern.

### B.

Perthes hatte untersucht: „wie tief geht der biologische Einfluß der X-Strahlung?“. Ich stellte mir das Problem 5) und 6) anders und zwar folgendermaßen:

Der heilende Einfluß der X-Strahlung beruht darauf, daß verschiedene Zellformen auf gleiche Mengen X-Strahlung verschieden reagieren und zwar häufig pathologische Zellformen mehr als normale, gesunde. Die Voraussetzung, daß eine solche Elektivwirkung, hervorgerufen durch verschiedene Radiosensibilität, zu Tage tritt, ist also die, daß die pathologische und die gesunde Zellgruppe möglichst unter gleichen Bedingungen bestrahlt werden, d. h., daß nicht etwa die gesunden Zellen sehr viel mehr Strahlen bekommen als die pathologischen, denn in letzterem Falle würde der Unterschied ihrer Empfindlichkeit ausgeglichen. Nun wissen wir, daß weiche X-Strahlung biologisch stark wirkt, daß aber weiche X-Strahlung an der Oberfläche der Haut bereits im wesentlichen absorbiert wird und erkennen daraus, daß die biologische Kraft an der Haut am größten und in der Tiefe sehr gering ist. Es scheidet also die Beeinflussung pathologischer Zellanhäufungen in der Tiefe daran, daß es uns aus physikalischen Gründen nicht möglich ist, die in der Tiefe liegenden Zellen unter den gleichen biologischen Einfluß zu bringen, wie die an der Oberfläche liegenden gesunden, d. h. sie mit jenen homogen zu bestrahlen. Infolgedessen formulierte ich das Problem folgendermaßen: ist es physikalisch möglich, in beliebiger Tiefe des menschlichen Körpers unter möglichst den gleichen Bedingungen mit Röntgenstrahlen zu bestrahlen, wie es an der Oberfläche möglich ist? An der Oberfläche treffen die Strahlen auf eine gewisse nicht zu große Zone der Haut gleichmäßig stark ein. Es wird also an der Oberfläche homogen bestrahlt. Die Strahlen sind für die einzelnen getroffenen Punkte von homogener Beschaffenheit und die einzelnen Stellen sind auch gleichmäßig weit von der Strahlenquelle entfernt. In der Tiefe ist es anders, die Strahlen sind von ungleichmäßiger Beschaffenheit und die Entfernung ist größer wie an der Oberfläche. Können wir physikalisch trotzdem in

der Tiefe so bestrahlen wie an der Oberfläche, mit anderen Worten ist es möglich, homogen zu bestrahlen?

Es ist offenbar, daß in dieser Problemstellung die ganze Zukunft der Tiefenbestrahlung enthalten ist. Wenn es also möglich ist, in der Tiefe so zu bestrahlen, wie an der Oberfläche, dann ist es möglich, in der Tiefe primär ähnliche Erfolge zu erzielen, wie an der Oberfläche — wobei auf sekundäre Prozesse, Resorptionserscheinungen und dergleichen zunächst keine Rücksicht genommen ist. — Ist die Frage aber physikalisch lösbar, d. h. können wir erst physikalisch die Bedingungen so machen, daß man in der Tiefe genau so bestrahlt wie an der Oberfläche, die Oberfläche also nicht mehr X-Strahlung erhält als die Tiefe, so muß es technisch, wenn auch vielleicht nicht vollkommen, so doch annähernd möglich sein, der physikalischen Lösung nahe zu kommen. Es muß dann eine Reihe von technischen Hilfsmitteln geben, die vielleicht verschiedener Natur sind, um die physikalisch möglichen Bedingungen auch praktisch in die Wege zu leiten. Die physikalische Lösung bildet den Gegenstand der zwei zitierten Arbeiten, deren Inhalt ich im Nachfolgenden auszugsweise wiedergebe:

1. Mit wachsender Penetrationskraft nimmt die biologische Energie der X-Strahlung rasch ab. Strahlen also, die tief dringen, haben wenig biologische Kraft, Strahlen, die unter normalen Verhältnissen schon an der Oberfläche absorbiert werden, haben große biologische Kraft.

2. Die Bestandteile des menschlichen Körpers absorbieren verschieden stark die X-Strahlung, wie wir uns an jedem Röntgenbilde überzeugen können. Absorbieren nun benachbarte Zellgruppen die X-Strahlung sehr verschieden, so wird auch dadurch die Gleichmäßigkeit der Wirkung sehr beeinträchtigt.

3. Das dritte Hindernis der Tiefenbestrahlung endlich ist das folgende: die X-Strahlungen und ihre biologische Energie nehmen im Quadrat der Entfernung ab; da im allgemeinen tiefliegende Gebiete von der Röntgenröhre weiter weg sein müssen, als die Oberfläche des Körpers, so wird auch dadurch die Homogenität der Bestrahlung beeinträchtigt.

Diese drei Hindernisse sind physikalisch wie folgt zu überwinden: (die Einzelheiten wollen in den aufgeführten Abhandlungen nachgelesen werden). Wenn man den Abstand vergrößert, aus welchem bestrahlt wird, so macht die Tiefe im menschlichen Körper in Bezug auf die räumliche Abnahme nicht mehr viel aus (Fig. 1). Man kann sich das leicht klar machen, wenn man folgendes überlegt: ein Blatt Papier in 1 m Abstand von einer Kerze wird viermal so hell beleuchtet sein, wie ein Blatt Papier in 2 m Abstand von einer Kerze. Wenn wir aber das Blatt Papier aus dem Abstand von 2 m in den Abstand von 2 m und 1 cm entfernen, so

ist die Differenz verschwindend klein (Fig. 2). Wenn also, auf das Tiefenbestrahlungsproblem übertragen, die Körpertiefe in Bezug auf den Gesamtabstand unerheblich wird, so ist die räumliche Homogenität gewahrt, d. h. die Vergrößerung der Entfernung spielt keine wichtige Rolle mehr. Die räumliche Homogenität wird also verbessert, wenn wir die Röntgenröhren vom

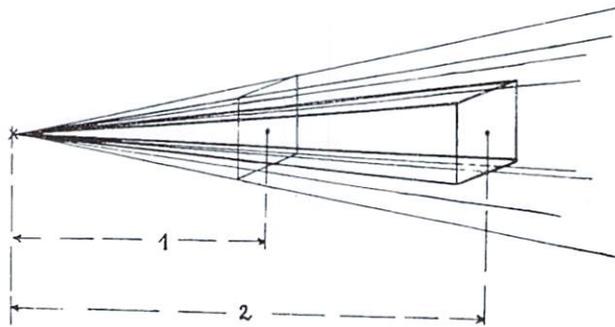


Fig. 1. Räumliche Homogenität I.

Objekte weiter weg entfernen. Es muß da nicht gleich zu extremen Bedingungen gegriffen werden, wie ich sie seiner Zeit bei der ersten konsequenten Durchführung der Tiefenbestrahlung in der Czernyschen Klinik angewendet habe. Zur Bestrahlung

von einigen Zentimetern in der Tiefe genügt unter Umständen schon ein nicht sehr erheblicher Abstand, umso mehr man andere Mittel anwendet, die die räumliche Homogenität gleichfalls herzustellen gestatten. Ein solches Mittel ist die Bestrahlung von verschiedenen Seiten, wie das durch die Fig. 3 dargestellt wird. Wenn man von verschiedenen Seiten durch Eintrittspforten, deren Umgebung durch undurchlässige Medien abgedeckt ist, bestrahlt, so überkreuzen sich die Strahlen in der Mitte und man kann das, was in der Tiefe weniger zur Geltung kommt, durch die Überkreuzung bei der Mehrfachbestrahlung wieder ausgleichen.

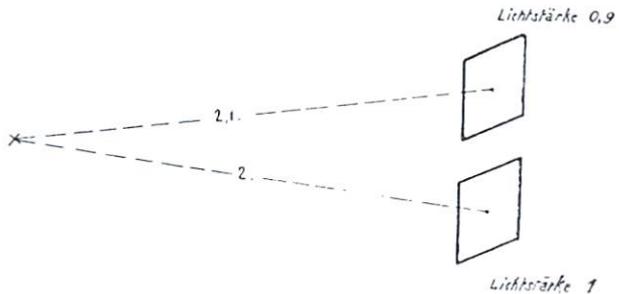


Fig. 2. Räumliche Homogenität II.

Auf diese Weise läßt sich räumliche Homogenität der Strahlung herbeiführen. Die Absorption, welche an und für sich verschieden ist bei der Strahlung, die für gewöhnlich bei Durchleuchtungen und Aufnahmen zur Anwendung kommt, wird immer weniger verschieden, wenn wir nur Strahlen einer Qualität und zwar Strahlen sehr harter Art benützen.

Man kann sich leicht davon überzeugen. Bei Wahl härterer Röhren ist der Unterschied zwischen Knochen und Fleisch und Durchleuchtungsbildern der Hand beispielsweise nur noch gering. Treibt man die Härte bis zu einem Extrem, so ist die Differenz zwischen der Absorption, der ja in ihrer Dichte im allgemeinen sehr nahe beieinander liegenden pathologischen und normalen Zellformen, also z. B. eines Tumors und der benachbarten Muskulatur zu vernachlässigen, was bei weicher X-Strahlung keineswegs der Fall ist. So läßt sich Homogenität der Absorption erreichen.

Die dritte wichtige Voraussetzung ist aber schließlich die homogene Qualität oder, wie sie in den genannten Arbeiten bezeichnet wird, die spezifische Homogenität der Strahlung, d. h. die Bedingung, daß auf die Oberfläche der Haut keine andere Strahlung wirkt wie in der Tiefe. Im allgemeinen ist das Gegenteil der Fall. An der Oberfläche wirken die härteren und vor allen Dingen die weicheren Strahlen (Fig. 4). Diese werden an der Oberfläche absorbiert, in der Tiefe wirken dann nur die harten

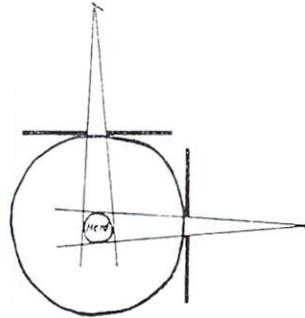


Fig. 3. Räuml. Homogenität III.

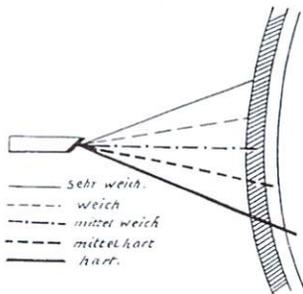


Fig. 4. Spezifische Homogenität I.

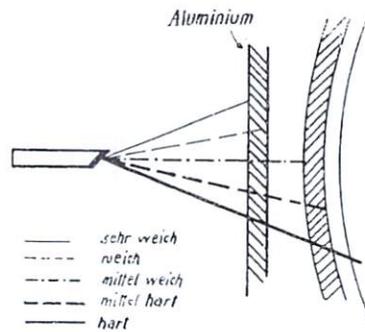


Fig. 5. Spezifische Homogenität II.

und die sind biologisch viel schwächer. Die spezifische Homogenität herzustellen ist eigentlich das Hauptproblem. Man kann sie herstellen, indem man dafür sorgt, daß auch auf die Oberfläche nur sehr harte Strahlen wirken, indem man sehr harte Röhren wählt und durch Filter die weiche Strahlung vorher abfängt (Fig. 5). Experimentell gelangte ich zu dem Extrem. Strahlungen herzustellen, die durch 4 hintereinander aufgestellte Menschen hindurch gingen, wobei die menschlichen Körper nur noch als schwache Schatten auf dem Leuchtschirm wahrnehmbar waren, etwa wie trübes.

aber noch durchscheinendes Glas im Lichte. Es waren also die spezifischen Absorptionsunterschiede ausgeglichen. Ebenso konnte ich bei der experimentellen Durchführung zeigen, daß oberhalb des menschlichen Körpers und unterhalb des menschlichen Körpers nahezu gleichviel absorbiert wurde, wenn die Strahlung von vorne kam, daß also die räumliche Homogenität und die spezifische Homogenität bewahrt wurden. Es muß hier nun vor allen Dingen betont werden, daß es zur Herbeiführung eines Erfolges in einem gegebenen Krankheitsfall keineswegs notwendig ist, eine physikalische Homogenität herbeizuführen. Es genügt hier in der Regel ja eine Annäherung. Praktisch ist also die Herstellung einer idealen Homogenität meist überflüssig. Um aber überhaupt das Problem der Tiefenbestrahlung zu lösen und weiter zu führen, mußte es zunächst physikalisch aufgefaßt werden und mußten die physikalischen Versuchsbedingungen rein studiert werden. Vielfach ist in der späteren Literatur der Irrtum aufgetaucht, als ob diese Auffassung dieses Problems, die ich in meinen ersten Arbeiten brachte, nun von mir in jedem einzelnen Falle der Tiefenbestrahlung verlangt würde. Das ist keineswegs der Fall und ist keineswegs beabsichtigt. Vielmehr ist bloß daran gedacht, zu zeigen, wo die Lösung des Problems liegt, also die Richtung in der praktisch gearbeitet werden muß, und es ist dem einzelnen Fall überlassen, sich dieser Lösung zu nähern, so weit wie es möglich ist, andererseits soweit es praktisch erscheint. Die praktische Tiefenbestrahlung ist also immer nur eine mehr oder minder große Annäherung an die physikalische Lösung des Problems.

## C.

Von der physikalischen Lösung zur technischen Lösung ist ein immerhin nicht unbeträchtlicher Weg zurückzulegen gewesen. Der Fehler der ersten durchgeführten Tiefenbestrahlung war der, daß die applizierte Strahlendosis zu klein, bzw. wenn sie groß genug war, die Bestrahlungsdauer allzu lang gewählt werden mußte. Sehr harte Strahlen, wie sie in der Tiefenbestrahlung ausschließlich zur Anwendung kommen sollten, haben einen geringen biologischen Einfluß, verfärben auch die Reagenzien der Dosimeter wenig und verlangen infolgedessen lange Zeiten oder große erzeugte Strahlenmenge. Die Röntgenröhren nun geben für den in sie hineingesandten Strom ein Strahlungsgemisch ab, das im Allgemeinen aus einem großen Teil weicher Strahlung und einem geringen Teil härterer Strahlung besteht. Auch eine harte Röhre ist eine solche, die verhältnismäßig viel harte Strahlen, in Wirklichkeit aber auch sehr viel weichere Strahlen (und Wärme) produziert. Bei meinen ersten Tiefenbestrahlungen wurde nun in der Regel ein normaler Röntgenapparat gewählt, die Röhre möglichst hart benutzt und filtriert und dann bei häufigem Wechsel der Röntgen-

röhre, um sie vor Überlastung und allzu großer Erhitzung zu schützen, von mehreren Seiten durch Filter hindurch bestrahlt. Es ist dies auch heute noch die Methode, die meistens angewendet wird. Im einzelnen gibt es hier viele Variationen. Bei meinen Versuchen hat sich Fensterglas als ein gut geeigneter Filter erwiesen, v. Jaksch in Prag hat zweifellos ausgezeichnete Resultate mit dünnen Silberfolien erzielt. Sehr vielfach ist das Aluminium im Gebrauch und es scheint, als ob die meiner Erinnerung nach zuerst von Kienböck gemachte Angabe, daß etwa 1 mm Aluminium in der Absorption einem Zentimeter Fleisch entspreche, annähernd zutrifft. So wurde denn insbesondere in der letzten Zeit meistens Aluminium als Filtermaterial benutzt und hat sich auch bewährt.

Die Entfernung für die Tiefenbestrahlung wurde anfangs sehr groß gewählt. Aber da die Strahlung dann durch die große Entfernung stark beeinträchtigt war, mußte man notgedrungen näher gehen und man glich den Fehler an räumlicher Gleichmäßigkeit bei der Einzelbestrahlung aus durch Bestrahlung von immer mehr Eintrittspforten. In letzter Zeit sind von verschiedener Seite förmliche Bestrahlungsgitter angegeben worden, das heißt Folien aus undurchlässigem Material (Blei), in welche viereckige oder runde Löcher geschnitten sind und die man auf die Oberfläche des zu bestrahlenden Gebietes legt. Durch die Diaphragmen läßt man Strahlen eindringen, sodaß sie in der Tiefe immer an dieselbe Stelle gelangen. Man zielt also von verschiedenen Seiten auf das in der Tiefe liegende Gebiet, eröffnet, wie Gauss es nennt, ein Kreuzfeuer. Alle diese Methoden sind anwendbar und führen mehr oder weniger zum Ziel und zwar ist ihre Zweckmäßigkeit um so größer, je mehr sie sich der physikalischen Homogenität nähert. Man wird sich mit den Hilfsmitteln, Wahl der Filter, des Abstandes, der Röhrenhärte, Mehrseitenbestrahlung, eben dem einzelnen Falle so gut es geht anzupassen suchen, um so den Forderungen der Tiefenbestrahlung, einmal Schutz der Oberfläche und zweitens hinreichende Strahlenmenge in der Tiefe, nach Möglichkeit gerecht zu werden.

Das Hauptproblem der technischen Tiefenbestrahlung liegt aber wo anders. Bei der gewöhnlichen, zu diagnostischen Zwecken angewendeten Apparatkonstruktionen handelt es sich darum, eine möglichst komplexe Strahlung zu erzielen, also eine Strahlung, die aus einem reichhaltigen Gemenge von vielen weichen und härteren Strahlen sich zusammensetzt und so ein fein nüanciertes Bild liefert. Gewöhnliche gut gebaute Funkeninduktoren, auch die neuen Wechselstrommaschinen und Einzelschlag-(Blitz)apparate eignen sich dazu vorzüglich. Wendet man diese Apparate für Tiefenbestrahlung an, so ist das, was in der Durchleuchtung und Aufnahme ihr Vorteil ist, die Komplexität ihrer Strahlung, ein offenkundiger Nachteil, denn von dem ganzen Strahlungsgemisch soll nur die härteste

Strahlung in Anwendung kommen, die weiche, bevor sie die Haut erreicht, abgefangen werden. Es ist also offenbar, daß die Technik uns eigentlich ganz andere Apparate der Tiefenbestrahlung bauen müßte, als wie sie solche bis jetzt für den diagnostischen Zweck und für die Oberflächenbestrahlung gebaut hat. Auf diesen großen Unterschied habe ich bereits im Jahre 1905 auf dem ersten Röntgenkongreß hingewiesen, in einem Vortrage über die Ziele der Röntgentechnik, der mit folgenden Worten schloß: „In der diagnostischen Anwendung steht unter allen Zielen, die wir erstreben, die immergrößere Verfeinerung in der Differenzierung von Dichtigkeitsunterschieden oben an, hier arbeiten wir ruhig in den Bahnen weiter, die wir beschritten haben. In der Therapie werden wir meiner Anschauung nach, was die Röntgentechnik anlangt, unsere Marschroute ändern, neue Ziele der Konstruktion ins Auge fassen und im Bau der Apparate tiefgreifende Änderungen erleben.“ Es kommt tatsächlich bei der Tiefenbestrahlung darauf an, Röntgenröhren so in Betrieb zu setzen, daß sie für die hineingeleitete elektrische Energie möglichst nur ganz harte Strahlung liefern unter Vermeidung der Erzeugung weicher Strahlung und unter Vermeidung überflüssiger Wärmebildung. Die Röntgenröhre liefert ja für die hineingeleitete Elektrizität zwei Energieformen, Röntgenstrahlen und Wärme und zwar im allgemeinen sehr viel Wärme und sehr wenig Röntgenstrahlen. Die Abnutzung der Röntgenröhre ist zum großen Teil die Begleiterscheinung der Wärmeerzeugung und es ist für die Ökonomie des Betriebes nicht gleichgültig, in welcher Form die Elektrizität die Röhre passiert. So wissen wir, daß starke Schließungsinduktion liefernde Apparate ungewöhnlich viel Wärme bilden und die Röhren rasch vernichten. Aber wenn wir annehmen, daß die Entladung günstig ist, die Wärmebildung also in der Röntgenröhre nur so groß ist, wie sie sich eben nicht vermeiden läßt, so ist klar, daß sie davon abhängt, ob wir viel oder wenig Strom in die Röhre senden. Im allgemeinen wird eine Röhre um so rascher abgenutzt, je mehr und länger sie Strom erhält, wenn nämlich der Strom an und für sich geeignet ist. Der Strom bildet nun weiche und harte Röntgenstrahlung. Für die Bildung von weicher und harter Röntgenstrahlung wird Strom verbraucht. Die weiche Röntgenstrahlung können wir aber zu dem Zwecke der Tiefenbestrahlung nicht benützen, wir brauchen nur die harte Röntgenstrahlung und so könnten wir mit einem Bruchteil des Stromes die Röhre betreiben, wenn wir die weiche Röntgenstrahlung gar nicht erzeugten. Wenn wir aber mit einem Bruchteile des Stromes die Röhre betreiben, so ist schon aus diesem Grunde ganz zweifellos die Abnutzung der Röhre viel geringer. Diesen Zusammenhang, der unmittelbar zur eigentlichen technischen Problemstellung führt, wollen wir an einem Beispiel uns noch klarer machen. Angenommen, es wird aus einer Ent-

fernung von 10 cm auf eine Aluminiumfolie von 3 mm Dicke X-Strahlung gesendet und es liegen oberhalb und unterhalb dieser Aluminiumfolie Reagenzkörper, welche die zugeführte X-Strahlenmenge messen, so erhalten wir bei einer Bestrahlung von 10 Minuten mit 5 Milliampère in der Röntgenröhre bei der gewöhnlichen Betriebsart etwa folgendes: der obere Reagenzkörper, der von dem Aluminium nicht bedeckt war, hat als Äquivalent für die aufgewendeten 50 Milliampèreminuten 25 X-Einheiten (Kienböckeinheiten) Bestrahlung erhalten. Der Reagenzkörper unterhalb des Aluminiums  $2\frac{1}{2}$  X-Einheiten. Die Differenz ist im Aluminium absorbiert worden. Es ergibt sich daraus: an der Oberfläche wären für jedes erzeugte X nur 2 Milliampèreminuten Stromaufwand notwendig gewesen. Aber unter 3 mm Aluminium wird durch die aufgewandten 50 Milliampèreminuten nur  $2\frac{1}{2}$  X erzeugt, also für jedes X werden 20 Milliampèreminuten Strom verbraucht, d. h. die Röhre erleidet eine Abnutzung von 20 Milliampèreminuten Strom für die Erzeugung von einem X in der Tiefe. Wir können das Ergebnis auch so fassen, daß die Abnutzung der Röhre, bzw. ihre Strombelastung für dieselbe Dosis unter 3 mm Aluminium zehnmal so groß ist wie an der Oberfläche. Wir brauchten also mit anderen Worten zehnmal so viel Röhren und zwar deswegen, weil der größte Teil des die Röhre verzehrenden Stromes dazu dient, weiche Strahlen hervorzubringen, mit denen wir nicht arbeiten können. Wäre es möglich, die Röntgenröhre mit einem solchen Strom zu betreiben, daß für je 5 Milliampèreminuten unter 3 mm Aluminium ein X erzeugt würde, so brauchten wir die Röhre nur mit 12,5 Milliampèreminuten anzustrengen, um diese  $2\frac{1}{2}$  X zu erzielen, und wäre es gar möglich, den Strom so abzuändern, daß wir nur 2 Milliampèreminuten für ein X unter den Filter brauchten, so hätten wir um  $2\frac{1}{2}$  X unter 3 mm Aluminium hervorzubringen, nur 5 Milliampèreminuten notwendig, und wir brauchten also die Röhre statt mit 5 Milliampère nur mit 0,5 Milliampère zu belasten und das wäre ein gewaltiger Fortschritt. Tatsächlich ist es mir gelungen, mit Apparaten, die ich in den Veifa-Werken in Frankfurt a. M. herstellen ließ, in der letzten Zeit eine Strahlung zu erzielen, die nur ca. 1,22 Milliampèreminuten für die Erzeugung einer X-Einheit unter 3 mm Aluminium oder, was dasselbe ist, unter 3 cm Körpertiefe verbraucht; das bedeutet also, daß wir für dieselbe Tiefenwirkung 10 oder gar 20 mal weniger Strom und Röhrenbeanspruchung nötig haben, wie früher. Es ist klar, daß sich solche Apparate zu diagnostischen Zwecken wenig oder gar nicht eignen, ebenso wie sie sich wenig zur Oberflächenbestrahlung ausnutzen lassen.

Die Methoden, die zum Ausbau des technischen Apparates für die Tiefenbestrahlung geführt haben, konnten nur dadurch zur Entfaltung kommen, daß ein aufnahmefähiger Markt geschaffen wurde, und der trat

ein, als es gelang, das Myom äußerst günstig zu beeinflussen. Als insbesondere durch die Arbeiten der Freiburger Klinik die Myombestrahlung in allgemeine Aufnahme kam, wurde durch die Anforderung der Patienten es notwendig, ungeheure Mengen Röntgenlichtes in die Tiefe zu bringen und die Techniker mußten Apparate herausbringen, die das ohne allzu-große Röhrenabnutzung vermochten. Die wichtigsten derartigen Konstruktionen scheinen mir die folgenden drei zu sein:

1. die in der Arbeit des Berner Dozenten Schwenter-Trachsler beschriebene Methode der Röhrenbelastung mit großen Pausen;
2. die Methode von Janus (Reiniger, Gebbert & Schall) mit einem Pausenschalter und endlich
3. die in Nachstehendem von mir beschriebene neue Methode des Betriebes der Röhre mit Überspannung.

Die Methoden sollen nun hier ganz kurz angegeben werden, während das nähere technische Detail in den einzelnen Abhandlungen nachzulesen ist.

Die von Schwenter beschriebene Methode (Münchener Medizinische Wochenschrift 1910, Heft 50), beruht auf der Erfahrung, daß die Röntgenröhre nach dem Durchgang eines Stromstoßes noch eine Weile ionisiert bleibt, und wenn sofort ein neuer Stromstoß an sie herantritt, mehr Wärme erzeugt, als sie erzeugen würde, wenn sie vor dem Eintritt des neuen Stromstoßes Zeit gehabt hätte, sich zu erholen. Mit dieser Methode sind die einzelnen Entladungen der Röntgenröhre durch Pausen zu trennen und insbesondere bei Verwendung von kräftigen Induktorien, wie des Blitzapparates der Veifa-Werke, hat die Freiburger Klinik ihre ersten hervorragenden Resultate erzielt und es waren bei Anwendung dieser Methode nur etwa 3,8 Milliampèreminuten — manchmal etwas weniger, manchmal etwas mehr — notwendig, um unter 3 mm Aluminium ein X zu erzeugen, während frühere Apparate vielfach 10, 20, ja sogar 25 Milliampèreminuten zur Erzeugung von 1 X in dieser Tiefe notwendig gemacht hatten. Nach Publikationen, die schon weit zurückliegen, hat Janus von der Aktiengesellschaft Reiniger, Gebbert & Schall eine Methode ausgearbeitet, bei einem speziell gebauten Röntgenapparat außer dem gewöhnlichen Quecksilberunterbrecher noch einen Pausen- oder Phasenschalter, oder wie er ihn nennt, „Rythmeur“ einzuschalten, der etwa in jeder Sekunde einmal für  $\frac{1}{2}$  Sekunde den Strom eintreten läßt und für  $\frac{1}{2}$  Sekunde ihn unterbricht. So entstehen Perioden der Tätigkeit und der Untätigkeit des Apparates, die Röhre flackert auf, leuchtet eine Zeitlang, erlischt wieder, flackert wieder auf, erlischt wieder. Sie hat bei jedem Erlöschen Zeit, von ihrer Wärme abzugeben und wird so geeignet, während der Belastungsphase mehr elektrischen Strom aufzunehmen. Mit dieser Methode kam die Freiburger Klinik bis zu einem Verbrauch von etwa 2 Milliampère-

minuten pro X, wie ich mich durch eigene Versuche überzeugen konnte. In der von Janus (11) publizierte, unten wiedergegebene Kurve sind unter 3 mm Aluminium noch 5 Milliampèreminuten pro X notwendig (Fig. 6). Die neue Methode, die ich in der letzten Zeit im Laboratorium der Veifa-Werke ausgearbeitet habe und über die ich an anderer Stelle ausführlich berichtete, beruht auf folgender Überlegung:

Bei einem Induktionsstoß des Funkeninduktors zeigt zunächst im Augenblicke der Unterbrechung die Spannung im Sekundärstromkreise bis auf diejenige Höhe, bei welcher sie durch Leitungsbahn (Röntgenröhre) durchbrechen kann (Fig. 7). Der erste Durchbruch der Elektrizität durch die

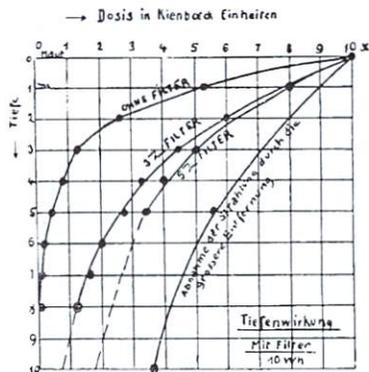


Fig. 6. Dosis A (1,3 X in 8 cm Tiefe bei 10 X auf der Haut) wurde erreicht in 10 Minuten bei 5 Milliampère in der Röhre, 20 Wh. Strahlenhärte, 15 Cm Fokus-Hautdistanz und 3 mm Aluminiumfilter.

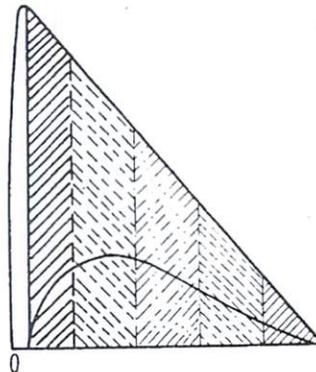


Fig. 7. Spannungs- u. Stromkurve u. Härtefelder der Röhre.

Röntgenröhre ionisiert den Gasinhalt und macht die Röhren leitend, sodaß nunmehr die Stromstärke in der Röntgenröhre bei fallender Spannung zunimmt. Es entstehen somit im allerersten Momente des Durchbruchs in der Röntgenröhre harte Strahlen, nachher bei fallender Spannung eine größere Menge weicher Strahlen. Bei der Wechselstrommaschine ist das Verhältnis ein anderes: hier ist die primäre Änderung keine ruckweise wie bei der Unterbrechung, sondern eine von gegebener Geschwindigkeit, infolgedessen steigt die Spannung im sekundären Stromkreis relativ langsam von Null bis zum Maximum. Der Durchbruch bei der Wechselstrommaschine wird bei der eben gerade hinlänglichen Spannung erfolgen. Der langsame Verlauf der Induktionswelle bei der Wechselstrommaschine hat nun zur Folge, daß nach erfolgtem Durchbruch verhältnismäßig lange Zeit hindurch der Strom durch die Röhre hindurchgeht und daß auch bei der langsamen Abnahme der Spannung Strom bei sehr geringer Spannung die Röhre

passiert und daher überwiegend weiche Röntgenstrahlung entsteht. Man kann nun — und das ist die Lösung des vorliegenden Problems — auch bei Wechselstrommaschinen die Röntgenröhre mit überharter Strahlung betreiben, wenn man folgende Vorkehrungen trifft:

Zunächst wird der Röntgenröhre dauernd ein Widerstand parallel geschaltet. Dieser Widerstand hat den Zweck, Hochfrequenzschwingungen,

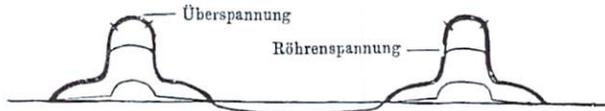


Fig. 8. Theoretische Stromkurve.

die sich im Transformator sonst leicht ausbilden, wegzunehmen und dadurch die Röntgenröhre zu schützen; überdies die damit verbundenen

Durchschläge der Röhre zu vermeiden. Wird ein solcher Widerstand parallel geschaltet, so kann das Übersetzungsverhältnis der primären zur sekundären Spule ohne Gefahr für die Röntgenröhre wesentlich erhöht und damit die Sekundärspannung erheblich gesteigert werden. Das zweite Mittel der neuen Konstruktion besteht darin, daß die Röntgenröhre in den Sekundärstromkreis des Transformators erst dann eingeschaltet wird, wenn die Spannung des Sekundärstromes über die notwendige Durchbruchspannung hinausgewachsen ist. Vorher befindet sich nur der sehr hohe Widerstand im Stromkreise. Dadurch wird erreicht, daß die Spannung, welche die Röntgenröhre empfängt

wesentlich größer ist, als wenn die Röntgenröhre bei Wechselstrombetrieb im sekundären Kreise eingeschaltet ist und dann die Spannung durch ihren Durchbruchwiderstand selbst bestimmt.

Das dritte Mittel ist, daß der Hochspannungsschalter den Strom wieder unterbricht in dem Augenblick, wo die Strahlung bei sinkender Spannung weicher wird (Fig. 8). Auf diese Weise konnte es gelingen, bei Wechselstrombetrieb Resultate zu erzielen, wie sie in Kurve Fig. 9 dargestellt sind, bei welchen also eine überaus harte Strahlung bei relativ sehr ge-

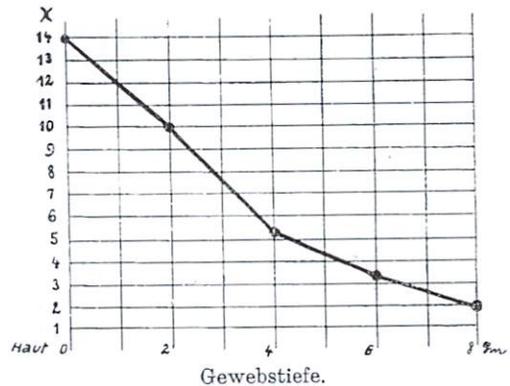


Fig. 9. Röhrenhärte: 10 Benoist-Einheiten.  
Belastung: 2 Milliampère.  
Bestrahlungszeit: 10 Minuten.  
Focus-Haut: 15 cm.  
Hautfilter: 3 mm Aluminium.

ringem Stromaufwand (Milliampèreminuten) durch die Röhre hervorgebracht wird. Diese Kurve zeigt ein wesentlich günstigeres Resultat, als die in der Literatur, z. B. in der Münchener Med. Wochenschrift Nr. 11 vom 12. März 1912 dargestellte Kurve. Auch der Effektaufwand (Milliampèreminuten) ist wesentlich kleiner.

So dürfte nun auch in den technischen Grundlagen der Tiefenbestrahlung ein großer Schritt vorwärts geschehen sein. Die Ökonomie der Tiefenbestrahlung ist verbessert, der Röhrenverbrauch, der vorher fast unerschwinglich war, erheblich reduziert. Noch ist diese Behandlungsmethode kostspielig und wird es vorerst auch bleiben. Aber sie ist wenigstens auch für weitere Kreise praktisch möglich geworden. Hoffen wir, daß dieser in etwa 8 Jahren mühsamer technischer Arbeit erreichte Abschluß der technischen Grundlagen durch weitere Erfolge in der Behandlung tiefliegender Prozesse gekrönt wird.

#### Literatur.

- 1a) Senn, N., The therapeutical value of the Roentgen rays in the treatment of pseudoleucaemia. New York Med. Journ., 18. IV. 1903. Ref. Zentralbl. f. Chir. 1903, Nr. 33, S. 905.
- 1b) Senn, N., Case of splenomedullary leucaemia successfully treated by the use of the Roentgen rays. New York Med. Record, 22. VIII. 1903. Ref. Zentralbl. f. Chir. 1904, Nr. 15, S. 476.
- 1c) Senn, N., The X-rays in lymphadenoma. New York Med. Journ., 18. IV. 1903. Ref. The Lancet 1903, Vol. I, p. 130.
- 2) Albers-Schönberg, Über eine bisher unbekannte Wirkung der Röntgenstrahlen auf den Organismus der Tiere. Münch. med. Wochenschr. 1903, Nr. 43, S. 1859.
- 3) Heinecke, Über die Einwirkung der Röntgenstrahlen auf innere Organe. Münch. med. Wochenschr. 1904, Nr. 18, S. 785 und Nr. 21, S. 927.
- 4) Perthes, Versuche einer Bestimmung der Durchlässigkeit menschlicher Gewebe für Röntgenstrahlen mit Rücksicht auf die Bedeutung der Durchlässigkeit der Gewebe für die Radiotherapie. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen 1904, Bd. 8, H. 1.
- 5) Dessauer, Beiträge zur Bestrahlung tiefliegender Prozesse. Med. Klinik 1905, Nr. 21, S. 526. Ref. Fortschr. auf d. Geb. d. Röntgenstrahlen Bd. 9, H. 1, S. 80.
- 5a) Dessauer, Probleme und Methode der Tiefenbestrahlung mit Röntgenstrahlen. Therapeutische Rundschau 1908, Nr. 44.
- 6) Dessauer, Eine neue Anwendung der Röntgenstrahlen. Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft 1907, Bd. 9, Nr. 3.
- 7) Veit, Zusatz zur Arbeit Prof. Dr. Dorns über: Zur Tiefenbestrahlung mit Röntgenstrahlen. Münch. med. Wochenschr. 1909, Nr. 14.
- 8) Dorn, Zur Tiefenbestrahlung mit Röntgenstrahlen. Münch. med. Wochenschr. 1909, Nr. 14.
- 9) Wetterer, Die Homogenbestrahlung nach Dessauer. Arch. d'électr. med. Nr. 247. Ref. Fortschr. auf d. Geb. der Röntgenstrahlen Bd. 13, H. 3, S. 189.

- 10) Schüler, Erfahrungen mit der Dessauerschen Röntgentiefenbestrahlung. Deutsch-med. Wochenschr. 1909, Nr. 31.
  - 10a) Schwenter, Eine neue Methode der Röntgenbestrahlung. Münch. med. Wochenschr. 1910, Nr. 50.
  - 10b) Krüger u. Dessauer, Die Nachbehandlung operierter Karzinome mit homogener Bestrahlung. Berlin. klin. Wochenschr. 1908, Nr. 11.
  - 10c) Franze, Homogenbestrahlung. Deutsche Ärzte-Zeitung, August 1908.
  - 10d) Sommer, Über das Problem der homogenen Tiefenbestrahlung in der Röntgentherapie. Zeitschr. f. neue physikal. Med. 1908, Nr. 11.
  - 11) Janus, Ueber die Technik der Röntgenbestrahlung tiefliegender Gewebe. Münch. med. Wochenschrift 1912, Nr. 11.
-