

Ueber die Grundlagen der Röntgendosimetrie

Autor(en): **König, Hans**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Bern**

Band (Jahr): - **(1931)**

PDF erstellt am: **16.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-319360>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Hans König

Ueber die Grundlagen der Röntgendosimetrie¹⁾

Bald nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen erkannte man ihre biologische Wirkung, und zwar in erster Linie die Heilwirkung. Viel später erst wurde man sich der mannigfaltigen Schädigungen, die durch Röntgenstrahlen hervorgerufen werden können, in ihrem ganzen Umfange bewußt. Beim Patienten kann durch Überbestrahlung die Heilwirkung durch Schädigung lebenswichtiger Organe völlig illusorisch gemacht werden. Beim Arzt oder Bedienungspersonal andererseits kann bei ungenügendem Schutz gegen Streustrahlung die jahrelange Einwirkung der letzteren zu eigentümlichen Zerfallserscheinungen, ja sogar zum Tode führen.

Angesichts der hohen Werte, die auf dem Spiele stehen, muß man sich unbedingt als Ziel setzen: Richtige Wahl der Quantität und Qualität der Strahlung, Schutz der nicht zu bestrahlenden Teile des Patienten, Schutz des Arztes und des Bedienungspersonals. Die quantitative Beherrschung bedeutet zugleich die Möglichkeit, daß an verschiedenen Orten arbeitende Ärzte ihre Erkenntnisse austauschen können, was ja erst den Fortschritt der Röntgentherapie ermöglicht.

Die nachstehenden Ausführungen sind den Grundlagen der Durchführung des in obigen Forderungen liegenden Programmes gewidmet.

Als erstes muß man sich über die biologische Möglichkeit der Durchführung einer einheitlichen Dosismessung Rechenschaft geben. Diese ist durchaus nicht als selbstverständlich voranzusetzen. Wenn nämlich die Empfindlichkeit zweier laut Diagnose gleichartig gewebkrankter Menschen durchschnittlich so verschieden wäre, daß ein und dieselbe Dosis bei dem einen noch nicht Heilung, bei dem andern schon Verbrennung hervorrufen würde, hätte eine genaue absolute Dosierung einen beschränkten Sinn. Der Arzt müßte für jedes Individuum die richtige Dosis durch Probieren neu bestimmen. In Wirklichkeit liegen aber die Verhältnisse viel günstiger. Langjährige Forschung hat gezeigt, daß einer bestimmten Gewebkrankheit eine ziemlich bestimmte Dosis zugeordnet werden kann. Ferner schwankt

¹⁾ Nach einem am 7. Februar 1931 vor der Bernischen Naturforschenden Gesellschaft gehaltenen Vortrag. Im Anschluß an diesen Vortrag fand eine Besichtigung der Röntgendosis-Meßeinrichtungen des Eidg. Amtes für Maß und Gewicht statt.

die sog. Haut-Erythem-Dosis, d. h. diejenige Dosis, welche auf der Haut nach 8—10 Tagen eine bestimmte Rötung, nach 4 Wochen eine bestimmte Bräunung hervorruft, die wichtigste biologische Einheit, von Mensch zu Mensch nur um 20 bis 30 %. Bei Anwendung der an einer großen Zahl von Patienten gewonnenen Dosismittelwerte auf ein beliebiges Individuum muß man mit Über- oder Unterdosierungen der genannten Größenordnung rechnen. Solche sind nun erfahrungsgemäß nicht sehr nachteilig für die Heilwirkung; man darf aber verlangen, daß außer diesen Fehldosierungen infolge individueller Unterschiede, für welche der Arzt nicht verantwortlich gemacht werden kann, keine anderen hinzutreten. Der einzelnen Dosismessung sollte hiernach kein größerer Fehler als etwa 5 (bis 10) % anhaften. Die Prüfung von Dosismessern sollte auf 2 bis 3 %, die Verwirklichung der Röntgen-einheit auf 1 % genau erfolgen. Damit haben die Forderungen bereits eine quantitativ bestimmte Form angenommen.

Von den Schwierigkeiten, die sich der Erreichung dieser Genauigkeit in den Weg stellen und die im wesentlichen davon herrühren, daß es Röntgenstrahlen verschiedener Wellenlänge (Qualität, Härte) gibt, wird ausführlich die Rede sein. Das Resultat vorwegnehmend, sei festgestellt, daß man diese Genauigkeiten heutzutage im wesentlichen erreicht hat.

In historischer Hinsicht ist festzustellen, daß bis vor wenigen Jahren in der Röntgendosimetrie ein vollständiges Chaos geherrscht hat. Im Jahre 1924 wurde von BEHNKEN (Physikalisch-Technische Reichsanstalt) eine geeignete Definition für die Einheit der Röntgenstrahlenmenge, das „Röntgen“, gegeben und realisiert. Auf dem zweiten internationalen Kongreß für Radiologie in Stockholm 1928 wurde diese sog. deutsche Einheit bis auf eine kleine Abänderung als internationale Einheit erklärt. Zurzeit gibt es eine Reihe brauchbarer Dosismesser, die in „Röntgen“ geeicht sind und die eine weitgehend einwandfreie Dosismessung gestatten.

In der Schweiz hat Schinz, um in den bestehenden schlimmen Verhältnissen eine Besserung herbeizuführen, in einem im Jahre 1926 vor der schweizerischen Röntgengesellschaft gehaltenen Vortrag den Vorschlag gemacht, es möchte der Bund zur Schaffung einer Zentralstelle für die Prüfung von Röntgendosismessern angehalten werden. Einer diesbezüglichen Eingabe der Röntgengesellschaft vom Februar 1929 an das Finanzdepartement Folge gebend, übernahm das Eidg. Amt für Maß und Gewicht in Bern diese Aufgabe.

Der erste Schritt der quantitativen Erfassung, nämlich die Wahl einer Einheit, könnte als eine rein praktische Angelegenheit angesehen werden, wenn es Röntgenstrahlen nur einer Qualität gäbe. Von den verschiedenen biologischen, chemischen und physikalischen Wirkungen würde die am leichtesten quantitativ erfassbare zur Definition der Einheit der Strahlungsmenge und zu Gebrauchsmessungen herangezogen werden. Dem ist aber nicht so. Wie bereits erwähnt wurde, erschwert die Tatsache des Vorhandenseins von Röntgenstrahlen verschiedener Qualität die Erreichung des Zieles erheblich, und es erfordert eine eingehende theoretische Begründung, warum einem der verschiedenen möglichen Meßverfahren, nämlich dem auf der Messung der Luftionisation beruhenden, der Vorzug gegeben wurde. Diese Begründung ist aber nicht möglich ohne ein

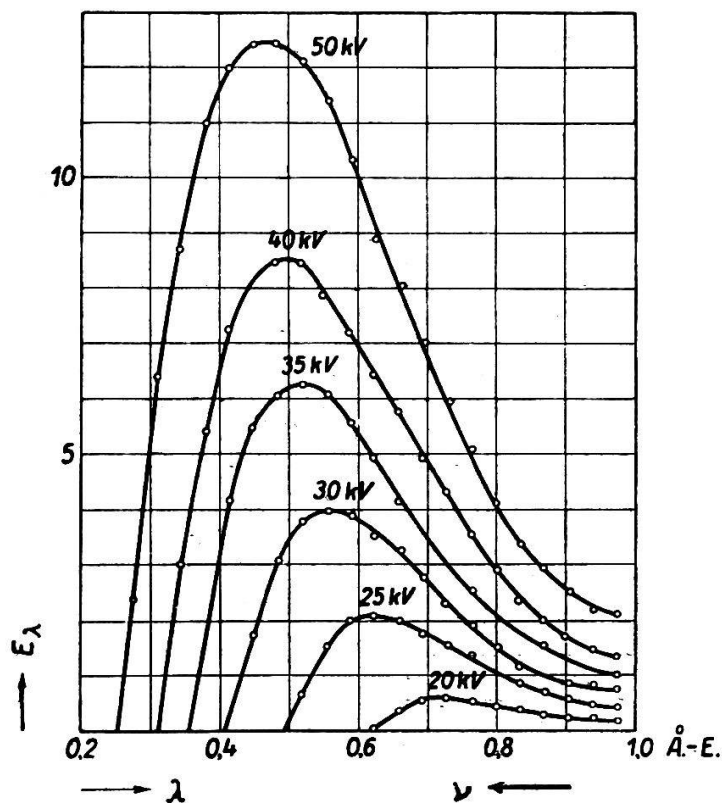


Abb. 1. Energieverteilung der Bremsstrahlung.

näheres Eingehen auf den Mechanismus der Entstehung der Röntgenstrahlen, ihrer Wechselwirkung mit der Materie (Absorption, Streuung) und auf ihre Vorbehandlung für den therapeutischen Gebrauch.

Entstehung der Röntgenstrahlen. Abb. 1 zeigt die spektrale Verteilung der bei verschiedenen an der Röntgenröhre lie-

genden Gleichspannungen V^1) von der Anode ausgehenden Bremsstrahlung ($E_\lambda = \text{Energiedichte}$). Diese entsteht bei der plötzlichen Abbremsung der Elektronen, welche nach Durchlaufen der Potentialdifferenz V mit großer Geschwindigkeit auf die Anode aufprallen. Die Bremsstrahlung ist inhomogen und enthält, wie die Abbildung zeigt, alle Frequenzen unterhalb der nach dem EINSTEIN'schen Gesetz

$$eV = h\nu_{\max}$$

$e = \text{Elektronenladung}$
 $h = \text{PLANCK'sches Wirkungsquantum}$

durch die Spannung allein bestimmten Grenzfrequenz ν_{\max} . Wenn Spannung veränderlicher Größe an der Röhre liegt, so überlagern sich obige Kurven zu einer Kurve mit breiterem Buckel. Die Röntgenstrahlung ist also um so inhomogener, je mehr die Spannungsform von Gleichspannung abweicht. Beim Induktorbetrieb ist sie am inhomogensten. Da die Inhomogenität für therapeutische Zwecke von Nachteil ist, wie unten erläutert wird, verdient der Betrieb mit Gleichspannung, schon der klareren Betriebsbedingungen wegen, unbedingt den Vorzug.

Die charakteristische Strahlung des Antikathodenmaterials entsteht nach der Bohr'schen Theorie (die neueste Theorie hat hieran mehr nur begrifflich, weniger quantitativ etwas geändert) durch das Herausreißen eines Elektrons aus einer der Schalen des Atoms durch ein auffallendes Elektron. Die entstehende Lücke wird sofort gefüllt, indem ein Elektron von einer „höheren“, d. h. energiereicheren Bahn hinunterstürzt. Die freiwerdende Energie ΔE wird nach Bohr gemäß $\Delta E = h\nu$ als Röntgenstrahlen der Frequenz ν ausgesandt. Die charakteristische Strahlung überlagert sich der Bremsstrahlung, modifiziert aber die Zusammensetzung nicht wesentlich.

Röntgenstrahlen entstehen schließlich auch als Streustrahlung beim Auftreffen von primären Röntgenstrahlen auf Materie. Auf den Streuprozeß wird unten an geeigneter Stelle noch kurz eingegangen.

Härte und Zusammensetzung der Therapiestrahlen. Man hat Grund zu der Annahme, daß Röntgenstrahlen nur dann biologisch wirken, wenn sie absorbiert werden. Der unverändert durchgehende Teil wirkt nicht. Für die Heilwirkung ist also in erster Linie die Absorbierbarkeit maßgebend. 5 kV-Strahlen (d. s. Strahlen, die

¹⁾ Auf die Erzeugung der Hochspannung kann hier nicht eingegangen werden.

mit einer Spannung $V = 5 \text{ Kilovolt} = 5000 \text{ V}$ erzeugt werden) sind sehr weich; sie werden schon von den obersten Schichten der Haut verschluckt. 50 kV-Strahlen durchdringen lediglich einige cm Gewebe (Fleisch, Knochen), die sehr harten 200 kV-Strahlen dringen schon zu einem erheblichen Teil durch den ganzen menschlichen Körper, sind also an sich schon recht ungünstig; man braucht sie aber in der sog. Tiefentherapie wegen ihrer Durchdringungsfähigkeit. Strahlen von ca. 10 kV aufwärts werden in der Oberflächentherapie, solche von 100 bis 200 kV in der Tiefentherapie benutzt.

Soviel über die mittlere Härte der verwendeten Strahlen. Hinsichtlich der Zusammensetzung (Qualität) derselben ist leicht einzusehen, daß die Strahlung einigermaßen homogen sein sollte. Man versuche nämlich z. B. ein in der Tiefe des Körpers liegendes Carzinom mit einer Strahlung zu heilen, welche aus einem harten und einem weichen Anteil besteht. Wegen der relativ geringeren Absorbierbarkeit der härteren Komponente ist eine erhebliche Bestrahlung erforderlich zur Erreichung der nötigen Dosis im Innern des Körpers. Unterdessen wird die weiche Komponente von der Haut dauernd quantitativ absorbiert und letztere durch Überbestrahlung evtl. schwer beschädigt.

Die Homogenisierung der Strahlung könnte mit Hilfe der bekannten von Laue entdeckten Interferenzerscheinungen von Röntgenstrahlen an Kristallen erreicht werden, d. h. durch Einschalten eines Kristalles in den Strahlengang könnte man Strahlen einer ganz bestimmten Wellenlänge aussondern. Der Nutzeffekt dieser Homogenisierung ist aber sehr klein. Man greift daher zu einem minder radikalen aber dafür wirtschaftlicheren Mittel, der Filterung der Röntgenstrahlen.

Die schon erwähnte Tatsache, daß weiche Strahlen viel stärker absorbiert werden als harte Strahlen, findet ihren quantitativen Ausdruck in dem Gesetz: Der Absorptionskoeffizient a von Stoffen, deren Ordnungszahl Z im periodischen System der Elemente kleiner als etwa 45 ist, ist der dritten Potenz der Wellenlänge proportional: $a = c \cdot \lambda^3$. Der langweilige Anteil wird also stärker absorbiert; die Strahlung wird dadurch homogener und im Mittel härter.

Ohne daß es für das Verständnis des Folgenden unbedingt notwendig ist, sei doch kurz begründet, warum man immer Aluminium und Kupfer zu Filterzwecken verwendet, da einerseits diese Art der Filterung heutzutage eine große Bedeutung erlangt hat, anderer-

seits sich Gelegenheit bietet, den Begriff der selektiven Absorption zu erläutern. Beim Durchgang eines Strahles durch Materie erfährt derselbe eine Schwächung (μ) infolge Absorption (α) und Streuung (σ): $\mu = \alpha + \sigma$. Die Streuung ist (theoretisch und experimentell) von λ unabhängig, schwächt also alle λ in gleichem Maße, ändert daher die Zusammensetzung der Strahlung nicht und trägt zur Filterung nicht bei. **Man** muß Stoffe nehmen, bei denen die Absorption überwiegt. Nun nimmt die Absorption mit der Ordnungszahl Z viel stärker zu als die Streuung. Folglich sind alle Stoffe mit hinreichend großer Ordnungszahl ($Z > 10$) brauchbar (Kohlenstoff z. B. mit $Z = 6$ nicht). Andererseits ist die Ordnungszahl nach oben hin durch die selektive Absorption der schweren Stoffe begrenzt. Je

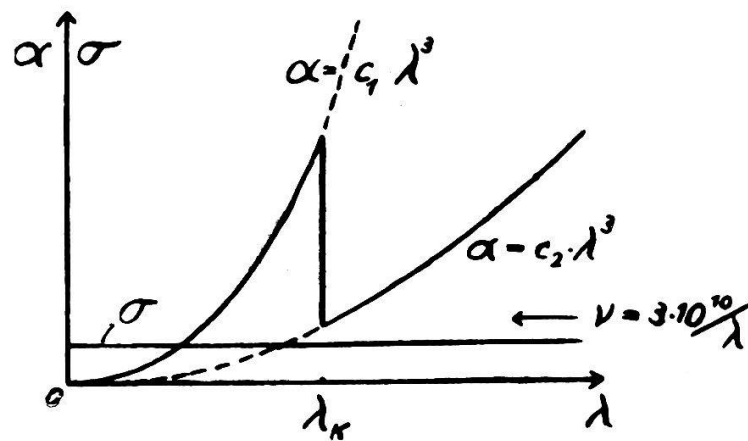


Abb. 2. Wellenlängenabhängigkeit von Absorption und Streuung.

höher nämlich die Ordnungszahl, desto fester sind die Elektronen der innersten Schale, der sog. K-Schale, gebunden; die Grenzwellenlänge λ_K , die es zu ihrer Anregung, d. h. zur Beteiligung am Absorptionsprozeß braucht, ist ziemlich klein und fällt in den Therapiebereich. Ist $\lambda > \lambda_K$, so machen die K-Elektronen nicht mehr mit und die Absorption sinkt sprunghaft auf einen kleinen Betrag hinunter, wie Abb. 2 zeigt. Die Substanz weist für Wellenlängen, die etwas kleiner als λ_K sind, selektive Absorption auf. Schon Silber mit $Z = 47$ ist aus diesem Grunde nicht mehr günstig, hingegen sind von den Metallen Aluminium mit $Z = 13$ oder Kupfer mit $Z = 20$ brauchbar.

Als wesentliches Resultat dieser einleitenden Ausführungen über die Erzeugung und Vorbereitung der Röntgenstrahlen zum therapeutischen Gebrauch sei festgehalten, daß Strahlen eines beträchtlichen Frequenzbereiches zur Anwendung gelangen

und daß im einzelnen Fall die Strahlung trotz Filterung immer noch eine gewisse Inhomogenität aufweist.

Historisches über Versuche zur Messung und zur Aufstellung einer Einheit. Röntgenstrahlen sind etwas Physikalisches, ihre Wirkung ist etwas Biologisches. Es bieten sich zwei Wege:

1. Man benutzt eine bestimmte biologische Reaktion als Maß für die Röntgenmenge. Die schon erwähnte Hauteinheitsdosis (HED) stellt einen solchen Versuch dar. Seine Nachteile sind: Man kann die Einheit nicht unterteilen, man weiß nicht, was z. B. $\frac{1}{10}$ HED ist; ferner muß man die biologische Wirkung abwarten. Der große Wert der HED ist ein geschichtlicher: Sie bildet die erste Brücke zum Vergleich der Erfahrungen zwischen verschiedenen Instituten und Ländern.

2. Man stellt diejenige Größe einer physikalischen (oder chemischen) Wirkung der Strahlung fest, der eine gewünschte biologische Wirkung entspricht. Nachstehend sind einige solche Verfahren nebst ihren Nachteilen aufgezählt.

Die bei der Absorption von Röntgenstrahlen bei Therapieverhältnissen entstehende Wärmemenge ist sehr klein und daher schwer meßbar; das Verfahren kommt höchstens für physikalische Laboratorien in Frage. Die Lumineszenzwirkung ist zur Not brauchbar, aber nur in freier Aufstellung und nur für harte Strahlung; ungenau. Das Intensimeter von FÜRSTENAU benutzt die Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit von Selen unter der Einwirkung von Röntgenstrahlen; inkonstant, nur für Relativmessungen. Die SABAURAU-NOIRÉ-Pastille (Ba-Pt-Cyanür) wird durch Röntgenstrahlen gebräunt; unempfindlich. Beim KIENBÖCK-Verfahren wird die Schwärzung der photographischen Schicht benutzt; ebenfalls unempfindlich, mühsam in der Handhabung.

Die genannten Verfahren haben außerdem den Nachteil der selektiven Absorption.

Ihnen allen überlegen ist das Ionisationsstrom-Meßverfahren. Es benutzt den Umstand, daß Luft unter der Einwirkung von Röntgenstrahlen leitend wird. Maß für die Röntgendosis ist eine Elektrizitätsmenge; diese ist recht zuverlässig meßbar. Außerdem genommen besitzt dieses Verfahren den Vorzug, daß die Messungen in Ablesungen eines Zeigers oder Fadens auf einer Skala bestehen.

Schon diese praktischen Vorteile ließen bald erkennen, daß das Ionisationsverfahren das aussichtsreichste sei und daß die

Definition der Einheit hierauf beruhen müsse. Ausgesprochen wurde dieser Gedanke von Szilard (1910), Villard, Friedrich, Greinacher; aber erst Behnken hat 1924 eine allen physikalischen und biologischen Eigentümlichkeiten Rechnung tragende Definition der Einheit gegeben. Diese Definition lautet:

„Die absolute Einheit der Röntgenstrahlen-Dosis wird von der Röntgenstrahlen-Energiemenge geliefert, die bei der Bestrahlung von 1 cm^3 Luft von 18° C Temperatur und 760 mm Quecksilberdruck bei voller Ausnutzung der in der Luft gebildeten Elektronen und bei Ausschaltung von Wandwirkung eine so starke Leitfähigkeit erzeugt, daß die bei Sättigungsstrom gemessene Elektrizitätsmenge eine elektrostatische Einheit ($\frac{1}{3} \cdot 10^{-9} \text{ Coul.}$) beträgt. Die Einheit der Dosis wird „ein Röntgen“ genannt und mit „R“ bezeichnet.“

Die Angabe von Temperatur und Druck, bzw. der Luftdichte, ist notwendig, weil die Ionisation proportional der letzteren anwächst: Jemehr Moleküle man den Strahlen in den Weg stellt, desto mehr Elektronen werden gebildet. Die Notwendigkeit des Zusatzes über die Ausnutzung der Elektronen und die Ausschaltung von Wandwirkungen wird sich aus den folgenden Entwicklungen von selbst ergeben.

Der große theoretische Vorzug des Ionisationsverfahrens liegt in dem Umstand, daß folgende Hauptforderung hinreichend erfüllt ist: Die Reaktion im Dosimeter muß in Bezug auf die biologische Wirkung wellenlängenunabhängig sein. Hinter dieser Forderung steckt allerlei an Tatsachen und Voraussetzungen. Es gilt zunächst einzusehen, in welchem Umfang diese Forderung überhaupt berechtigt und notwendig ist. Gesetzt der Fall, zwei homogene Strahlenarten λ_1 und λ_2 hätten biologisch qualitativ ganz verschiedene Wirkungen. Ein quantitativer Vergleich biologisch vollkommen ungleichwertiger Strahlungen auf physikalischer Basis würde kein Interesse bieten, ja, die obige Forderung wäre sogar inhaltsleer. Daraus kann man umgekehrt folgern: Die Forderung der Wellenlängenunabhängigkeit ist berechtigt und notwendig, insofern die biologische Wirkung selbst wellenlängenunabhängig ist. Die Erfahrung lehrt nun, daß im Gegensatz zu dem soeben erwähnten hypothetischen Beispiel die biologische Wirkung jedenfalls im Tiefentherapiebereich (100 bis 200 kV) gleichartig ist. Bei den weichen 20 kV-Strahlen haben die Versuche zur Bestimmung der HED gezeigt, daß das Krankheitsbild der Haut nicht ganz gleich ist wie bei 100 oder 200 kV. In dem genannten Umfang ist es berechtigt,

zu fordern: Gleichen biologischen Wirkungen sollen gleiche Angaben des Dosismessers entsprechen. Die Forderung ist aber auch notwendig. Man darf nicht etwa sagen: Wenn ein Dosismesser selektiv absorbiert, so merkt man sich das eben ein für allemal und setzt es im Notfall in Rechnung. Es wurde oben ausführlich gezeigt, daß die benutzten Strahlungen trotz der Filterung noch reichlich inhomogen sind, die spektrale Verteilung im allgemeinen aber nicht als bekannt vorausgesetzt werden darf, die Berücksichtigung der selektiven Absorption demnach nicht möglich ist. Die Forderung der Wellenlängen-Unabhängigkeit ist also im oben angegebenen Umfange berechtigt und notwendig.

Es wurde Wert darauf gelegt, diese Forderung ausführlich zu begründen, weil der ganze Gang der Entwicklung der Röntgendosimetrie erst auf Grund dieser Forderung verstanden werden kann. Es sei nunmehr versucht, den Beweis zu erbringen, daß die Hauptforderung erfüllt ist. Die hierzu notwendige, nicht ganz einfache Analyse des Zusammenhanges zwischen biologischer Wirkung und Menge der im Luftraum des Dosimeters freigemachten Elektronen werde in drei Schritten durchgeführt:

- a) Zusammenhang zwischen biologischer Wirkung und im Gewebe absorbierte Energie;
- b) Verhältnis von Gewebsreaktion zu Dosimeterreaktion;
- c) Zusammenhang zwischen in Luft absorbierter Energie und Zahl der freigemachten Elektronen.

Zu a). Wir stellen uns mit CHRISTEN auf den Standpunkt, daß nur der im Gewebe absorbierte Teil der Strahlung biologisch wirksam sei. Man braucht sich daher nur mit diesem zu befassen. Es ist nun nicht gesagt, daß von den physikalischen Eigenschaften der absorbierten Strahlung gerade die Energie die entscheidende Größe sei. Diese wird nach Versuchen Lenards zum größten Teil unmittelbar in Wärme umgewandelt; nur ein kleiner Teil erscheint als kinetische Energie verhältnismäßig rasch bewegter Elektronen. Wir müssen annehmen, daß die beiden Anteile biologisch nicht gleich wirksam seien. Die Erfahrung läßt trotzdem vermuten, daß Energieabsorption und biologische Wirkung parallel laufen, daß also z. B. einer Hauteinheitdosis bei verschiedenen λ einigermaßen gleiche absorbierte Energiemengen entsprechen.

Zu b). Die Wechselwirkungen eines Röntgenquantums mit Materie sind sehr mannigfaltiger Art. Das Primärquantum kann an einem Atom

ein langsames Rückstoßelektron absprenge und mit etwas kleinerer Frequenz (Compton-Effekt) als Streuquant weiterfliegen. Es liegt dann ein Streuprozeß verbunden mit etwas Absorption vor. Das Primärquant kann aber auch von einem Atom unter Aussendung eines rasch bewegten Photoelektrons absorbiert werden; das Photoelektron kann durch Ionisation weiterer Atome zur Aussendung sekundärer Röntgenstrahlen Anlaß geben usw. Solche Photoelektronen besitzen in normaler Luft bei 200 kV eine Reichweite bis zu 1 m. Je nach der Härte der Strahlung pflegt nun der eine oder andere dieser möglichen Prozesse in den Vordergrund zu treten. Bei weichen Strahlen überwiegt die Absorption. Für harte Strahlen überwiegt bei Substanzen wie Gewebe, bestehend aus Stoffen mit niedriger Ordnungszahl, die Streuung.

Erst wenn man sich diese Mannigfaltigkeit in den Erscheinungen vergegenwärtigt, kann man verstehen, was das heißt, wenn man von einem Dosismesser fordert, daß er den Besonderheiten der Wellenlängenabhängigkeit der Absorption Rechnung trage. Der entscheidende Schritt in der theoretischen Wahl des Meßverfahrens besteht nun gerade darin, daß man dafür sorgt, daß der physikalische Prozeß im Dosismesser, die sog. Dosimeterreaktion, der Gewebsreaktion gleichartig ist. Dieses ist nun offenbar der Fall, wenn das im Dosismesser bestrahlte Medium wie das Körpergewebe aus Stoffen niedriger Ordnungszahl aufgebaut ist, also z. B. aus Luft besteht. Damit ist gezeigt, daß das auf der Ionisation der Luft beruhende Verfahren den andern Verfahren nicht nur praktisch, sondern auch prinzipiell überlegen ist. Bei der Durchführung ist zu beachten, daß im Gewebe die schnellsten Elektronen höchstens 1 mm weit fliegen, also im Gewebe selbst zur Wirkung gelangen. Die Forderung der Gleichartigkeit verlangt, daß auch im Dosimeter alle Elektronen zur Wirkung kommen, wenn sie auch in der spezifisch 1000 mal leichteren Luft 1000 mal weiter fliegen als im Gewebe. In der oben gegebenen Definition findet diese Forderung eben ihren Ausdruck im Zusatz: „Bei voller Ausnutzung der in der Luft gebildeten Elektronen und bei Ausschaltung von Wandwirkungen“.

Zu c). Eingehende Untersuchungen LENARD's haben zum Resultat geführt: In Luft steht die Zahl der freigemachten Elektronen zur absorbierten Energie in einem von der Wellenlänge einigermaßen, zwischen 100 und 200 kV sogar weitgehend unabhängigen Verhältnis.

Verbindet man mit diesem Ergebnis die unter a) und b) gemachten Angaben, so folgt: Zahl der in Luft freigemachten Elektronen und biologische Wirkung laufen einigermaßen parallel. Und zwar: 1 R 20 kV-Strahlung scheint¹⁾ der relativ geringeren Zahl der erzeugten Elektronen wegen eine etwas größere biologische Wirkung zu haben als 1 R 100 kV-Strahlung. Hingegen haben 1 R 100 kV-Strahlung und 1 R 200 kV-Strahlung dieselbe biologische Wirkung. Auf diesem Resultat beruht die Brauchbarkeit der Behnken'schen Definition von 1 R und des Ionisationsverfahrens. Bis auf eine kleine Änderung, wonach nicht 18⁰, sondern 0⁰ die Bezugstemperatur sein soll, wurde die Einheit daher international angenommen:

$$1 \text{ internationales Röntgen} = „r“ = \frac{1}{1.066} \text{ R.}$$

Nach der Begründung der Einheit kommt als nächstes ihre Verwirklichung, d. h. die absolute Dosismessung. Ein ausführliches Eintreten auf die Fragen der praktischen Dosimetrie würde den Rahmen

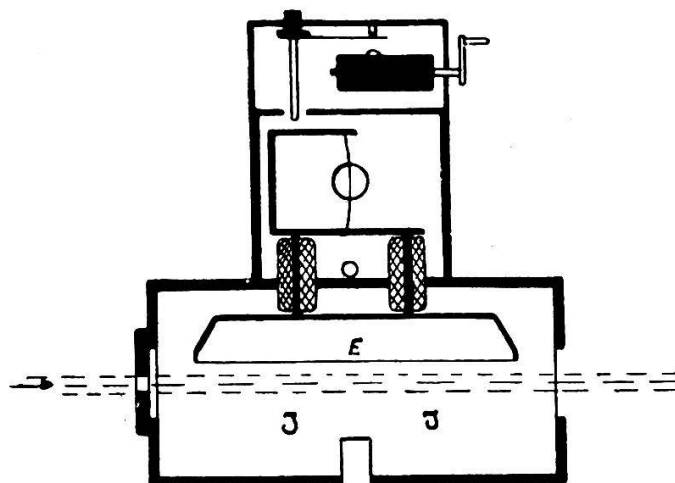


Abb. 3. Küstner-Kammer.

dieses Berichtes überschreiten. Es soll daher nur auf die wesentlichen Punkte hingewiesen werden.

Das Abfangen der ausgelösten Elektronen erfolgt durch Anlegen einer hinreichend großen Spannung an die Ionisationskammer (Sättigungszustand). Durch Verwendung eines dünnen Drahtes als Innen-Elektrode (vergl. Abb. 3) wird vorzeitiges Auftreffen weitreichender Elektronen auf feste Körper weitgehend vermieden. Durch Anwendung

¹⁾ Die Angaben verschiedener Forscher widersprechen sich noch etwas.

von Hilfselektroden analog dem beim Kondensator üblichen THOMSON'schen Schutzring werden Feldverteilung und Meßvolumen der Rechnung zugänglich gemacht.

Die Versuche BEHNKEN's befassen sich in erster Linie mit der Frage der vollen Ausnutzung der Elektronen und dem Einfluß der Kammerwand. 200 kV-Elektronen können Reichweiten über 1 m haben; aber die Bahnen der Elektronen sind meist stark geknickt und aufgewickelt, so daß nur wenige Elektronen maximale Reichweite haben. Das hat zur Folge, daß die Kammer lange nicht so groß zu sein braucht, wie man zuerst befürchten mußte. Eine Steigerung des Durchmessers über 15 cm ist nicht notwendig. Abgesehen von der geringen Zahl weitreichender Elektronen, trägt noch folgender Umstand dazu bei, daß man die Kammer relativ klein wählen kann: Durch das Auftreffen eines Elektrons auf die Wand gehen diejenigen Elektronen, die das Elektron auf seiner Bahn noch hätte erzeugen wollen, verloren. Dafür erzeugt es beim Auftreffen auf die Wand Sekundärelektronen; die beiden Effekte kompensieren sich teilweise. An Stelle des Kammerdurchmessers kann man auch den Druck variieren. So wurde bei Siemens für die Physikalisch-Technische Reichsanstalt eine Druckluftkammer für 6 At. hergestellt. Die sechsfache Erhöhung der Luftdichte hat eine Verkürzung aller Elektronenbahnen auf $\frac{1}{6}$ zur Folge. Beide Versuche führten zu im wesentlichen übereinstimmenden Resultaten.

Die Wahl des Materials für die Kammerwand ist von großer Wichtigkeit. Die besten Resultate erhält man, wie nach den vorausgegangenen Ausführungen zu vermuten ist, wenn die mittlere Ordnungszahl des Wandstoffes derjenigen der Luft ungefähr gleich ist. Andererseits muß das Meßvolumen gegen ungewollte Fremdstrahlung geschützt sein. Die Kammer besteht daher aus einem dickwandigen Metallzylinder mit Papier- oder Pappeauskleidung.

KÜSTNER hat sich ebenfalls um die Verwirklichung der Röntgen-einheit große Verdienste erworben. Die von ihm konstruierte Kammer, bestehend aus eigentlicher Ionisationskammer, Elektrometer und kleiner Elektrisiermaschine zur Aufladung des letzteren ist in Abb. 3 schematisch wiedergegeben.

Soviel über die Ausnutzung der ausgelösten Elektronen. Bei einer Absolutmessung sind aber noch eine Reihe weiterer Faktoren zu berücksichtigen, so die Absorption im Eintrittsfenster und in der Luft innerhalb des Meßvolumens, die Abnahme der Intensität, die

Abhängigkeit von Druck und Temperatur, mit einem Wort: Es bedarf der Verwirklichung aller in der Definition der Einheit vorgeschriebenen Umstände, die notwendig sind, um die richtige Elektrizitätsmenge frei werden zu lassen.

Diese Menge muß nun richtig gemessen werden. Eine Elektrizitätsmenge ist meßbar als Produkt von Spannung und Kapazität oder als Produkt von Stromstärke und Zeit. In praxi sind beide Wege mit Erfolg beschritten worden. Eine absolute Genauigkeit von 1% ist hierbei ohne große Schwierigkeit zu erreichen. In Bezug auf die Messung der Stromstärke sei bemerkt, daß diese nur indirekt erfolgen kann, da den Strömen von im Mittel 10^{-11} A gegenüber auch die empfindlichsten Spiegelgalvanometer versagen. Man hilft sich z. B. durch elektrometrische Messung des durch den Strom an einem bekannten hochohmigen Widerstand erzeugten Spannungsabfalls oder durch Kompensation des unbekanntes Stromes gegen einen durch Aufladung eines Kondensators künstlich erzeugten bekannten Strom.

Die Frage der Absolutmessung mit Hilfe der großen Kammern ist damit erledigt. Für den praktischen Gebrauch hat man nun kleine Kammern, sog. Fingerhutkammern, konstruiert. Aus Gründen der mechanischen Festigkeit müssen die Wände eine gewisse Dicke haben. Dies bedingt eine gewisse Absorption. Ferner ist bei harten Strahlen die Reichweite der Elektronen sicher nicht ausgenützt. Die Bedingungen der Definition sind also nicht erfüllt, und die Kammern sind erst nach Eichung mit einer großen Normalkammer gebrauchsfähig. Die Kunst ist, Form und Material der Kammer so zu wählen, daß die verschiedenen erwähnten Fehlerquellen sich möglichst aufheben. Der Grundsatz, Materialien mit gleicher Ordnungszahl wie Luft zu verwenden, hat sich auch hier bestens bewährt. Zur Brauchbarkeit der kleinen Kammern bei harten Strahlen trägt der Compton-effekt wesentlich bei, weil die durch ihn ausgelösten Rückstoßelektronen sehr geringe Reichweite haben und gerade bei harten Strahlen der Effekt stark hervortritt. Im Gebiete der weichen Strahlen ist Härteunabhängigkeit weniger leicht zu erreichen.

Es gibt heutzutage eine Reihe gut durchgebildeter, auf dem Prinzip der Luftionisierung beruhender praktischer Ausführungsformen von Dosismessern, deren einige nachstehend aufgeführt seien. Das Röhrengalvanometer von Siemens mißt den Röntgenstrom (= Röntgenmenge pro Sekunde). Die periodische Nachprüfung dieser Apparatur erfolgt durch einen Strom-Standard. Dieser

ist eine Ionisationskammer, deren eine Elektrode mit einer radioaktiven Substanz (U_3O_8) belegt ist und durch welche bei gegebener Spannung und Luftdichte ein zeitlich sehr konstanter Strom fließt. Der Integral-Dosismesser von Siemens und das Ionimeter von MARTIUS beruhen auf der Entladung eines Elektrometers durch den Kammerstrom. Registrierende Dosismesser sind das HAMMER-Dosimeter mit mechanischem und das Mekapion von STRAUSS mit elektrischem Registrier-Relais.

Schutz gegen Röntgenstrahlen. Man ist heute allgemein der Ansicht, daß eine Dosisleistung von 10^{-5} r/sek., was bei 8 h täglicher Arbeitszeit in ca. 6 Jahren eine HED ausmacht, ungefährlich sei. Es ist klar, daß man sich in erster Linie gegen direkt von der Röhre kommende Strahlen schützt, und zwar durch genügend dicke Bleiwände oder durch die Verwendung von Strahlenschutzröhren. Das gleiche soll aber auch in Bezug auf die Streustrahlung gelten. Im allgemeinen ist das vom Patienten ausgehende Streufeld noch in 2 m Abstand als auf die Dauer gefährlich anzusehen.

Dosismesser sind subtile Instrumente, und die Annahme, daß sie jahraus, jahrein, evtl. sogar nach größeren Transporten, stets gleich zeigen, ist nicht gerechtfertigt. Sofern nicht eine periodische Kontrolle durch ein beigegebenes Stromnormal stattfindet, empfiehlt sich die Kontrolle mit Radiumpräparaten, deren zeitliche Konstanz leicht gewährleistet werden kann.

Die vorliegenden Ausführungen haben den Zweck, das Bewußtsein zu übermitteln, daß das Problem der Röntgendosismessung sowohl in theoretischer wie in praktischer Hinsicht in befriedigendem Maße gelöst ist. Angesichts der großen Gefahren, denen der Patient bei unsachgemäßer Bestrahlung ausgesetzt ist, ist es Pflicht des Arztes, seine Dosismeßeinrichtung dem Stand der Forschung unverzüglich anzupassen. In dieser Beziehung ist leider noch lange nicht alles so, wie es sein sollte. Um den Anforderungen genügen zu können, muß der Arzt, abgesehen von den finanziellen Mitteln, über das nötige Verantwortungsgefühl und nicht zuletzt über ein erhebliches Ausmaß an physikalischen Kenntnissen und namentlich an physikalischem Kritikvermögen verfügen.

Zusammenfassung.

Die Schwierigkeiten der Röntgen-Dosismessung sind nicht nur physikalisch-technischer, sondern auch begrifflicher Art. Sie erwachsen alle aus dem Umstand, daß wir es stets mit Strahlengemischen ver-

schiedener Härte zu tun haben. Die biologische Wirkung der Röntgenstrahlen verschiedener Wellenlängen ist angenähert gleichartig. Hieraus wurde die Forderung der Härteunabhängigkeit der Dosimeterangaben abgeleitet. Die Aussicht, dieser Forderung gerecht zu werden, ist am größten, wenn Dosimeterreaktion und Gewebsreaktion gleichartig verlaufen. Dies ist bei Luftionisationsmessungen der Fall, weil Luft und Körpergewebe aus Stoffen ungefähr gleicher Ordnungszahl aufgebaut sind.

Es gibt keine physikalische Größe, von der man von vornherein sagen kann, daß sie zur biologischen Wirkung in einem wellenlängenunabhängigen Verhältnis stehe. Für die absorbierte Energie scheint es ungefähr der Fall zu sein, und für die in Luft freigemachte Elektrizitätsmenge ist es ungefähr der Fall. Dieses ist der theoretische Grund für die Vorzugsstellung der auf dem Ionisationsprinzip beruhenden Dosimeter. Der praktische Grund liegt darin, daß sie durchgehend die Gestalt direkt zeigender Instrumente haben. Aus diesen Gründen ist die von Behnken aufgestellte absolute Definition der Einheit 1 Röntgen im wesentlichen ungeändert international angenommen worden. Auf Grund dieser Definition ist zwischen den führenden Institutionen der verschiedenen Länder im Bereich der Therapiestrahlung Einheitlichkeit erzielt worden, und zwar unter Benützung großer Standardionisationskammern. Für die Praxis sind eine Reihe von Geräten mit Kleinkammern ausgearbeitet worden.

Es ist nun Sache des Arztes, im Interesse der Patienten dafür zu sorgen, daß die erwähnten meßtechnischen Fortschritte in der Therapiepraxis Eingang finden.