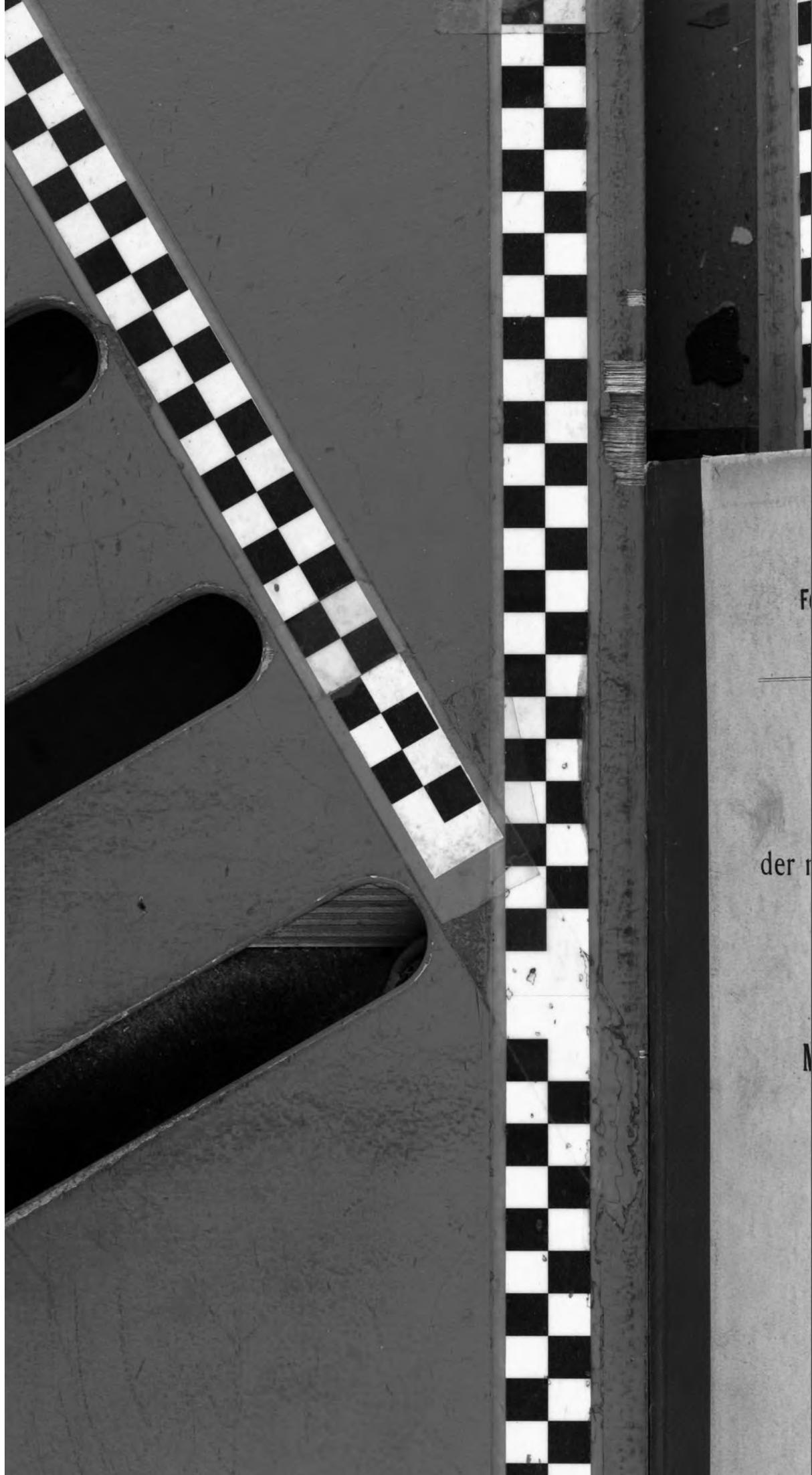


**PAGE NOT  
AVAILABLE**



F

der r

M

**Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen**

Herausgeber: Prof. Dr. **Albers-Schönberg**

**Ergänzungsband 28**

---

# **Archiv und Atlas**

der normalen und pathologischen Anatomie

in typischen Röntgenbildern

## **Messung und Dosierung der Röntgenstrahlen**

von

Dr. med. et phil. **Th. Christen**

Privatdozent an der Universität Bern

Mit einem Vorwort von Professor Dr. **Albers-Schönberg**



**Hamburg**

Lucas Gräfe & Sillem  
(Edmund Sillem)

1913

---

L. 22

negoffen

THE LIBRARY  
OF THE



CLASS B610.5  
BOOK 9 F77e







**Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen**

Herausgeber: Prof. Dr. **Albers-Schönberg**

**Ergänzungsband 28**

---

# **Archiv und Atlas**

der normalen und pathologischen Anatomie

in typischen Röntgenbildern

**Messung und Dosierung der Röntgenstrahlen**

von

**Dr. med. et phil. Th. Christen**

Privatdozent an der Universität Bern

---

Mit einem Vorwort von Professor Dr. **Albers-Schönberg**



**Hamburg**

Lucas Gräfe & Sillem

(Edmund Sillem)

1913

# Messung und Dosierung

der

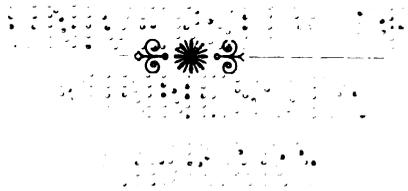
# Röntgenstrahlen

von

Dr. med. et phil. **Th. Christen**

Privatdozent an der Universität Bern

Mit 5 Tafeln



**Hamburg**

Lucas Gräfe & Sillem

(Edmund Sillem)

1913

TO VIKTOR  
ALOS  
YASLI

## Vorwort.

Solange therapeutisch mit Röntgenstrahlen gearbeitet wird, haben die Klagen über die Unsicherheit der Dosierung nicht aufgehört. Der Wunsch, ein Verfahren zu besitzen, welches eine präzise Messung und Dosierung der Strahlen ermöglicht und gleichzeitig so einfach auszuführen ist, daß jeder Röntgentherapeut sich seiner ohne weiteres bedienen kann, ist nur allzu berechtigt. Vergegenwärtigt man sich die zahlreichen Prozesse, welche wegen verursachter Röntgenschädigungen angestrengt worden sind, so tritt in ihnen immer wieder als springender Punkt der Mangel eines sicheren Dosierungsverfahrens hervor. Es unterliegt keinem Zweifel, daß wir Methoden besitzen, welche in der Hand des geübten Praktikers, dem eine langjährige persönliche Erfahrung helfend zur Seite steht, im allgemeinen ausreichen. Solche Ärzte werden aber auch ohne Dosierungsverfahren kaum eine Schädigung anrichten. Die große Mehrzahl der Röntgentherapeuten und ganz besonders die lernenden unter ihnen bedürfen im Interesse der Kranken unbedingt einer exakten Messungs- und Dosierungstechnik. Zur eigenen Fortbildung in der Röntgentherapie, sowie zur Rückendeckung bei Verbrennungen sollte ihnen eine Methode, deren Resultate auch vor allen Dingen reproduzierbar sind, an die Hand gegeben werden. Die Zahl der veröffentlichten und ausprobierten Dosierungs-Verfahren ist groß. Die besten Kräfte unter den Röntgenphysikern und Röntgenärzten haben geniale Methoden erdacht, mit denen sie gewiß das mögliche leisten, die sich aber bis auf ganz wenige nicht in weiteren Kreisen eingebürgert haben. Noch immer harren wir der „allgemeinen“ Methode. Bis diese erfunden sein wird, bleibt es beim alten, d. h. ein jeder wird die seiner Ansicht nach beste Meß- und Dosierungstechnik benutzen.

Es ist ein großes Verdienst des Autors dieses Werkes, sein reiches Wissen und seine Erfahrung, die ihn zu einem der besten Kenner der Meßmethoden machen, in einer Monographie niedergelegt zu haben. Die Schwierigkeit des Stoffes wird dem Lernenden in mustergültiger Weise klar gemacht, so daß er die Grundlagen und Prinzipien, auf welchen sich ein Dosierungs- oder Meßsystem aufbaut, kennen lernt. Wenn es auch erforderlich war, im Interesse der theoretischen Gründlichkeit zahlreiche mathematische Formeln zu bringen, so wird doch infolge der Klarheit der Darstellung auch derjenige Leser, dem der mathematische Stoff weniger liegt, das Buch mit größtem Nutzen durcharbeiten. Gerade im gegenwärtigen Zeitpunkt, wo wir es erleben, daß ein Teil der Röntgentherapie von den Fachmännern auf die Frauenärzte übergeht, tritt die Notwendigkeit eines intensiveren Studiums der Meßmethoden besonders deutlich vor Augen. Vielleicht hat die Halbwertschichtmethode, deren Begründer Christen ist, Aussicht, gerade bei der Tiefentherapie eine führende Rolle zu spielen.

Die Arbeit von Christen, welche den Bedürfnissen nach einer vollständigen Zusammenstellung der so überaus umfangreichen und vielfach unklaren Literatur der letzten Jahre entgegenkommt, dient zu einem großen Teil vor allem der Klärung der theoretischen Grundlagen.

Möge die Monographie viele Leser finden, die aus ihr Belehrung und Anregung zu eigenem Forschen auf dem Messungs- und Dosierungsgebiet, zu welchem Christen die theoretische Basis geschaffen hat, empfangen.

Hamburg, März 1913.

Albers-Schönberg.



## Inhaltsverzeichnis.

	Seite		Seite
I. Einleitung . . . . .	1	F. Die primären oder elektrodynamischen Transformationen . . . . .	38
A. Das Wesen unserer Messungen . . . . .	1	1. Energie des Primärstromes . . . . .	38
B. Der Gegenstand der Messung . . . . .	3	2. Energie des Sekundärstromes . . . . .	39
II. Der Härtegrad . . . . .	7	a. Theorie . . . . .	39
A. Definition . . . . .	7	b. Messung der Sekundärspannung . . . . .	40
B. Homogene Strahlen . . . . .	8	$\alpha$ . Das Sklerometer . . . . .	40
C. Sekundärstrahlen . . . . .	9	$\beta$ . Die parallele Funkenstrecke . . . . .	40
D. „Strahlenfilter“ . . . . .	10	c. Messung der Sekundärstromstärke . . . . .	41
E. Härtemessung . . . . .	11	$\alpha$ . Theorie . . . . .	41
1. Theorie . . . . .	11	$\beta$ . Die elektromagnetischen oder Drehspulenmilliampèremeter . . . . .	41
2. Die Methoden . . . . .	12	$\gamma$ . Die Hitzdrahtmilliampèremeter . . . . .	42
a. Die Phantomhand . . . . .	12	$\delta$ . Kritik der Sekundärstrommessung . . . . .	42
b. Die Schwellenwertskalen. Walter. Beez . . . . .	12	$\epsilon$ . Das Voltmeter . . . . .	43
c. Zweimetallige Skalen . . . . .	14	$\zeta$ . Gegenströme . . . . .	44
$\alpha$ . Die Röntgenskala . . . . .	14	$\eta$ . Widerstandsdilatometer . . . . .	45
$\beta$ . Die Benoist-Skala . . . . .	14	$\theta$ . Die Gehrkesche Glimmlichtoszillographenröhre . . . . .	45
$\gamma$ . Die Benoist-Walter-Skala . . . . .	15	3. Energie der Kathodenstrahlen . . . . .	45
$\delta$ . Die Wehnelt-Skala . . . . .	15	4. Röntgenenergie . . . . .	46
d. Elektrische Härteskalen . . . . .	16	5. Bedeutung sämtlicher Transformationen . . . . .	46
$\alpha$ . Theorie . . . . .	16	6. Unrichtige Kombinationen . . . . .	47
$\beta$ . Die parallele Funkenstrecke . . . . .	19	7. Sekundäre Kathodenstrahlen . . . . .	48
$\gamma$ . Das Milliampèremeter . . . . .	19	8. Verteilungsfaktor . . . . .	48
$\delta$ . Das Sklerometer nach Klingelfuß . . . . .	20	9. Relative Messung. Technische Bestrahlungsgröße . . . . .	49
$\epsilon$ . Das elektrostatische Voltmeter nach Bergonié . . . . .	21	G. Die sekundären oder radiodynamischen Transformationen . . . . .	53
$\zeta$ . Das Qualimeter nach Bauer . . . . .	22	1. Theorie. Wirkungsgesetz . . . . .	53
e. Absolute Härtemessung . . . . .	23	2. Die einzelnen Transformationen . . . . .	57
$\alpha$ . Theorie . . . . .	23	a. Wärmewirkung der sekundären Kathodenstrahlen . . . . .	57
$\beta$ . Das Radiosklerometer nach Villard . . . . .	24	b. Die Phosphoreszenz . . . . .	57
$\gamma$ . Der absolute Härtemesser nach Christen . . . . .	26	c. Die Fluoreszenz . . . . .	57
f. Messung gehärteter Strahlen . . . . .	28	$\alpha$ . Röntgens Versuche . . . . .	57
3. Härtegrad und Sekundärspannung . . . . .	29	$\beta$ . Der Röntgenlichtmesser nach Roiti . . . . .	58
4. Härtegrad und Intensität . . . . .	30	$\gamma$ . Die Radiummethode nach Courtade . . . . .	58
5. Bewertung der einzelnen Skalen . . . . .	31	$\delta$ . Messung der Flächenenergie nach Gaiffe . . . . .	59
6. Vergleich der verschiedenen Skalen . . . . .	32		
7. Einheitsmaß . . . . .	33		
III. Intensität und Flächenenergie . . . . .	34		
A. Definition . . . . .	34		
B. Fokaldistanz . . . . .	34		
C. Flächenenergie . . . . .	35		
D. Energiemessung . . . . .	36		
E. „Direkt“ und „Indirekt“ . . . . .	37		

ε. Die Schwellenwertmethode nach Tonsey . . . . .	60	b. Die radioelektrischen Methoden	81
d. Die radioelektrischen Methoden	60	c. Die radiochemischen Methoden	81
α. Transformation in elektrische Ladung . . . . .	60	α. Das Holzknightsche Chromoradiometer . . . . .	81
1*. Strommessung . . . . .	60	β. Der Immelmansche Röntgenstrahlenmesser . . . . .	82
2*. Spannungsmessung . . . . .	60	γ. Das Kienböcksche Quantimeter . . . . .	83
a*. Methode Piffard . . . . .	61	δ. Das Lichtpapierverfahren n. Strauß . . . . .	85
b*. Methode Beez . . . . .	61	ε. Die Jodausscheidung nach Freund und Bordier & Gallimard . . . . .	85
c*. Methode Fürstenau . . . . .	61	ζ. Die Verfärbung des Ba-Pt-Cy nach Sabouraud & Noiré . . . . .	85
β. Die Selenzelle nach Forster	61	η. Die Holzknightskala . . . . .	86
γ. Die Ionisation . . . . .	61	θ. Das sensibilisierte Ba-Pt-Cy nach Bordier . . . . .	87
e. Wärme . . . . .	62	ι. Die Kalomelausscheidung nach Schwarz . . . . .	88
f. Chemische Wirkungen . . . . .	62	κ. Die Fluoreszenzermüdung nach Gaiffe . . . . .	90
α. Photographische Wirkung . . . . .	62	3. Kombinationen . . . . .	90
1*. Theorie . . . . .	62	4. Dosierung gehärteter Strahlen . . . . .	92
2*. Das Quantimeter nach Kienböck . . . . .	63	5. Vergleich und Bewertung der verschiedenen Dosierungsmethoden	92
3*. Das Lichtpapierverfahren nach Strauß . . . . .	63	G. Tiefentherapie . . . . .	97
β. Farbveränderungen in Salzen	63	1. „Filtration“ und Sekundärstrahlen	97
1*. Halogensalze . . . . .	63	2. Die Tiefenwirkung der Primärstrahlen . . . . .	99
2*. Das Barium-Platin-Cyanür (Ba-Pt-Cy) . . . . .	64	a. Theorie . . . . .	99
γ. Die Jodausscheidung . . . . .	65	b. Nutzeffekt. Halbwertregel . . . . .	102
δ. Die Kalomelausscheidung . . . . .	65	c. Hautschonung. Dosenquotient	106
IV. Die Dosis . . . . .	67	d. Biologische Dosis . . . . .	111
A. Das Wesen der Strahlenwirkung . . . . .	67	e. Sensibilisierung und Desensibilisierung . . . . .	112
B. Dosierung der Lokalwirkung . . . . .	68	f. „Homogenbestrahlung“ . . . . .	115
C. Der Begriff der Röntgendosis . . . . .	69	g. Induzierte Röntgenwirkung . . . . .	115
D. Das Dosierungsgesetz . . . . .	70	V. Schlußbemerkung . . . . .	116
E. Die Zukunft der Dosierungsfrage . . . . .	74	VI. Anhang . . . . .	117
F. Die Dosierungsmethoden . . . . .	75	A. Dosis und Härtegrad . . . . .	117
1. Die elektrodynamischen Methoden	75	B. Das Iontoquantimeter . . . . .	117
a. Die Sekundärspannung . . . . .	75	Druckfehlerverzeichnis . . . . .	119
α. Die parallele Funkenstrecke	75	Literaturnachweis . . . . .	120
β. Spannungsmessung u. Klingelfuß und nach Bergonié . . . . .	76		
γ. Die Halbwertschicht . . . . .	78		
b. Die Sekundärstromstärke . . . . .	79		
α. Milliampèremeter . . . . .	79		
β. Voltameter . . . . .	79		
2. Die radiodynamischen Methoden . . . . .	79		
a. Die Thermometerröhre nach Köhler . . . . .	80		

## I. Einleitung.

Angesichts der großen Menge dessen, was bereits über Messung und Dosierung der Röntgenstrahlen gesagt und geschrieben worden ist, könnte es als überflüssig erscheinen, noch eine neue Schrift erscheinen zu lassen. Zwei Gründe sind es indessen, die mich veranlaßt haben, trotz dieser Bedenken zur Feder zu greifen.

Einmal gibt es noch keine zusammenfassende Darstellung alles dessen, was in den letzten Jahren auf diesem Gebiete geleistet worden ist. Und zweitens gilt hier dieselbe Bemerkung, die man ja oft und viel auf die Therapeutik anwendet: Je mehr Methoden es gibt, um eine Krankheit zu behandeln, um so weniger sind die einzelnen Vorschläge befriedigend. Denn wenn es eine ganz bestimmte Methode gäbe, deren Resultate nichts zu wünschen übrig ließen, so würde man nicht so eifrig von allen Seiten an möglichen Verbesserungen arbeiten. Je weniger aber das Bestehende genügt und befriedigt, mit um so größerem Eifer wird etwas Neues und Besseres gesucht.

So steht es mit den Messungs- und Dosierungsverfahren für Röntgenstrahlen, welche uns zur Zeit zu Gebote stehen. Einerseits verfügen wir über keine Methode, welche allgemein als die beste anerkannt wäre, und niemand ist wohl schon heute der Überzeugung, daß wir nicht in Zukunft noch Besseres erwarten dürften. Andererseits besteht aber in der Bewertung der verschiedenen Methoden noch so viel Unklarheit, die sich in der Literatur der letzten Jahre widerspiegelt, daß eine zusammenfassende Darstellung des bisher Erreichten nur nützlich sein kann. Ich gebe daher der zuversichtlichen Hoffnung Ausdruck, daß diese Schrift das ihrige dazu beitragen möge, den und jenen Forscher zu weiterer Arbeit anzuregen und dem einen und andern Experimentator neue Wege zu weisen.

Damit ist es schon ausgesprochen, daß nicht nur der praktische Ausbau des Gebietes noch zu wünschen übrig läßt. Nein es sind auch die theoretischen und experimentellen Grundlagen noch gar nicht vollständig geschaffen. Es wird sich oft genug Gelegenheit finden, im Einzelfalle auf diese Tatsache aufmerksam zu machen.

### A. Das Wesen unserer Messungen.

#### 1. Energie und Energietransformation.

Wenn wir in der Pharmakotherapie dasjenige messen, was wir dem Patienten verabfolgen, so handelt es sich ausnahmslos um Bestimmung von Gewichten oder Raumgrößen. Je nach größerer Bequemlichkeit oder Zuverlässigkeit wägen wir in Grammen oder messen in Kubikzentimetern oder zählen nach Tropfen, wobei wir entweder das Gewicht oder das Volumen des einzelnen Tropfens kennen.

Ganz anders in der physikalischen Therapie. Führen wir dem Patienten Wärme zu, so erhält er eine bestimmte Kalorienzahl; lassen wir ihn eine Terrainkur machen, so leistet seine Muskulatur eine vorgeschriebene Zahl von Kilogrammetern; schicken wir durch einen Teil seines Körpers einen Strom von bekannter Spannung und Stromstärke, so führen wir ihm eine berechenbare Menge von Wattsekunden zu usw. Immer sind die Größen, welche wir messen, Energien: Wärmeenergien, mechanische Energien, elektrische Energien. Man könnte

fast versucht sein, die physikalische Therapie überhaupt zu definieren als diejenige Therapie, deren Agentien nach Energien dosiert werden.

Immerhin soviel ist sicher, daß wir auch die „Menge“ der wirksamen Röntgenstrahlen nicht besser messen können, denn als Röntgenenergie.

Man wird mir vielleicht entgegenhalten, daß wir ja gerade für die Röntgenenergie zurzeit keine einwandfreie Meßmethode besitzen. Dies ist richtig. Aber zur Bewertung aller Dosierungsmethoden, geht es gar nicht anders, als daß wir mit dem Begriff der Röntgenenergie argumentieren. Denn dies allein ist ein unzweideutiger Begriff, während z. B. unter „Strahlenmenge“ sich ein jeder etwas anderes, und niemand etwas unzweideutig Bestimmtes vorstellen kann. Wüßten wir sicher, daß die Röntgenstrahlen ausgeschleuderte Körperchen sind, deren Zahl wir im einzelnen Falle feststellen könnten, dann wäre „Strahlenmenge“ definierbar als deren Gesamtmasse. Aber auch dann noch wäre die Geschwindigkeit dieser Teilchen, die von Fall zu Fall wechseln dürfte, sicherlich von ebenso großer Bedeutung. Dazu käme vielleicht noch eine elektrische Ladung derselben — alles Komplikationen, die uns vom Hundertsten ins Tausendste führen.

Stützen wir aber unsere Betrachtungen auf die Röntgenenergie, so ist es ganz gleichgültig, ob wir an eine Undulationstheorie oder an eine Emissionstheorie oder an noch etwas anderes glauben: wir brauchen nichts als den Robert Mayerschen Satz der Erhaltung der Energie, um uns jeweilen von den in Betracht kommenden Vorgängen ein Bild zu machen.

Bei jeder Dosierung handelt es sich um Vorausberechnung der Wirkung. Jede Wirkung in der belebten wie in der unbelebten Welt ist an eine Energietransformation gebunden. Demgemäß ist eine physikalisch korrekte Beurteilung auch der biologischen Wirkungen nur möglich unter Berücksichtigung der in Betracht kommenden Energietransformationen. Einige Beispiele mögen dies erklären.

1. Liegt eine starre Masse auf einer starren Unterlage, so stellt das Gewicht dieser Masse eine Kraft dar, die wir mit der Wage messen können. Diese Kraft erzeugt zwar einen Druck, den man berechnen kann als den Quotienten der Kraft und der Unterstüztungsfläche. Aber eine Wirkung hat diese Kraft nicht.

Entfernt man dagegen die starre Unterlage, so bewegt sich der schwere Körper senkrecht nach unten. Jetzt hat die Kraft des Gewichtes eine Wirkung: Sie versetzt den Körper aus seiner ursprünglichen Ruhe in beschleunigte Bewegung. Von Sekunde zu Sekunde nimmt die „Energie der Bewegung“ des fallenden Körpers zu. Aber aus nichts entsteht bekanntlich keine Energie. Um den gleichen Betrag hat dafür die „Energie der Lage“ des Körpers gegenüber dem Erdzentrum abgenommen.

Die Wirkung der Schwerkraft besteht also in diesem Falle in der Beschleunigung des fallenden Körpers und die zugrundeliegende Transformation ist die Umwandlung von Energie der Lage des ruhenden Körpers (potentielle Energie in Energie) der Bewegung des fallenden Körpers (kinetische Energie, Wucht).

2. Denkt man sich eine horizontale Ebene, auf welcher ein Körper ohne Reibung gleiten kann, so würde auf einer solchen eine horizontal abgeschossene Kanonenkugel ins Unendliche mit unveränderter Geschwindigkeit weiter fahren, und die Wucht ihrer Bewegung hätte keine Wirkung. Fährt sie aber in einen Sandhaufen, so bleibt sie in einer gewissen Tiefe desselben stecken. Dafür hat sowohl die Kugel, wie auch der Sand, sich erwärmt, und wir können den Betrag der Wärmeerzeugung in Kalorien messen.

Die Wirkung besteht hier in einer Wärmeproduktion auf Kosten der Wucht der Kugel und die entsprechende Energietransformation ist die Verwandlung von Bewegungsenergie in Wärmeenergie, entsprechend dem mechanischen Äquivalent der Wärme.

Solche Beispiele könnten beliebig vermehrt werden.

## 2. Nutzeffekt.

Geht man aber der Sache näher auf den Grund, dann erkennt man, daß in Wirklichkeit die Verhältnisse nicht ganz so einfach liegen. Schon die reibungslose Ebene existiert höchstens in unserer Phantasie. Aber auch die bekannte Gleichung für die Fallgeschwindigkeit

$$v^2 = 2 \cdot g \cdot H$$

stimmt in Wirklichkeit nicht genau. Die Geschwindigkeit des fallenden Körpers ist stets kleiner als sie nach dieser Gleichung sein sollte. Die Abweichung ist um so größer, je länger der Körper unterwegs ist.

Dies hat seinen Grund darin, daß keine Transformation rein verläuft, und es ist gerade diese Wahrnehmung für unsere spätern Untersuchungen von größter Bedeutung. Nicht die ganze Energie der Lage wird in Wucht umgesetzt, sondern ein Teil davon dient zur Überwindung der Luftreibung. Nicht die ganze Wucht der Kanonenkugel wird in dem Sandhaufen in Wärme umgesetzt, sondern ein Teil davon dient zur Verlagerung der Sandkörner, und wohl auch zu molekulären Veränderungen in einem Teil derselben. Bei einer Elektrolyse wird nicht die ganze elektrische Energie des Stromes in chemische Arbeit umgesetzt, sondern ein Teil derselben wird für Erwärmung der Leitungen aufgebraucht. Auch hierfür könnten Beispiele in beliebiger Zahl aufgestellt werden.

Die Wirkung eines physikalischen Agens ist also immer eine vielfache. Unter diesen verschiedenen Wirkungen ist aber gewöhnlich eine bestimmte, die uns besonders interessiert, oder die wir mit den getroffenen Einrichtungen gewollt haben. Je größer der Energieanteil ist, welcher auf die gewollte Wirkung entfällt, um so zweckmäßiger ist die von uns getroffene Einrichtung. Ja, wir können die Zweckmäßigkeit unserer Maßnahmen geradezu zahlenmäßig feststellen. Wir brauchen zu diesem Zwecke nur die Energiemenge zu messen, welche auf die gewollte Wirkung entfällt, und sie mit derjenigen zu vergleichen, welche überhaupt zur Transformation kommt, so haben wir in dem Quotienten dieser beiden Größen ein unzweideutiges Maß für die Zweckmäßigkeit unserer Einrichtung. Diesen Quotienten nennt man den Nutzeffekt.

Haben wir z. B. berechnet, daß ein fallender Körper eine Endgeschwindigkeit von  $20 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$  erreichen müsse, und ergibt uns dann die Messung, daß er tatsächlich nur  $19 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$  erreicht, so ist der Nutzeffekt der Schwerkraftwirkung  $\left(\frac{19}{20}\right)^2$  oder 90 %.

Hat ein Sportsmann für eine Muskelleistung von 100 000 kgm einer Mehrzufuhr von 1180 Cal. gegenüber dem ruhenden Zustande bedurft, so entspricht diesen 1180 Cal. ein mechanisches Äquivalent von 500 000 kgm. Daraus ergibt sich, daß die Muskeln dieses Sportmannes mit einem Nutzeffekt von  $\frac{100\,000}{500\,000}$  oder 20 % arbeiten.

Von diesem Begriff des Nutzeffektes werden wir noch vielfach nützlichen Gebrauch machen, überhaupt werden uns unsere Argumente stets auf den Begriff der Energie führen. Hier sollte zunächst bloß an Hand einiger einfacher Beispiele aus bekannten Gebieten gezeigt werden, wie die Anwendung des Energieprinzipes auf die Betrachtung irgendwelcher „Wirkungen“ eine einfache, klare und unzweideutige Betrachtungsweise ermöglicht.

## B. Der Gegenstand der Messung.

Der Wunsch, in der Röntgentechnik bestimmte Maße aufzustellen, entsprang seinerzeit hauptsächlich dem Bedürfnisse, in der Therapie nicht ganz im Dunkeln zu tappen, sondern die Größe der Wirkung einer Bestrahlung zum voraus wenigstens annähernd feststellen und abstufen zu können. Wollen wir aber die Wirkung der Röntgenstrahlen beurteilen, so

müssen wir, wie eben festgestellt wurde, die solchen Wirkungen zugrundeliegenden Energie-transformationen verfolgen.

Fallen die Röntgenstrahlen auf irgend einen Körper, so tritt auf der entgegengesetzten Seite desselben ein Teil der Strahlung wieder aus. Der übrige Teil der Strahlung ist in dem Körper, wie man sagt, „absorbiert“ worden. Da aber dieser Teil eine bestimmte Energiemenge repräsentiert, welche nachher nicht mehr in Form von Röntgenenergie vorhanden ist, so muß eine Transformation dieser Energie in eine andere Energieform stattgefunden haben. Die Röntgenenergie wird bei ihrer Absorption teils in Sekundärstrahlung, teils in elektrische Ladung, teils in chemische Energie, teils in Wärme verwandelt, vielleicht noch in andere Energieformen, die wir zurzeit noch gar nicht kennen. Tatsache ist aber sicherlich, daß Energietransformationen irgend welcher Art stattgefunden haben, daß also in dem absorbierenden Körper „Wirkungen“ der Strahlung auftreten.

Ein Teil dieser Wirkungen ist nun solcher Art, daß daraus die bekannten pathologischen Veränderungen entstehen, welche wir andererseits auch therapeutisch verwerten. Wahrscheinlich handelt es sich dabei um einen Teil der chemischen Wirkungen, wenn wir auch über deren Natur noch nicht viel wissen. Auch die Größe des Anteiles an biologischer Wirkung ist uns unbekannt. Immerhin wissen wir, daß dieser Nutzeffekt in verschiedenen Organen ganz außerordentlich verschieden ist, in der Haut weit größer als im Muskel, in den Keimdrüsen viel größer als in der Haut.

Sicher ist aber so viel, daß jedenfalls der nicht absorbierte Teil der Strahlung keinen Anteil an der biologischen Wirkung haben kann. Der nicht absorbierte Anteil tritt wieder als Röntgenenergie aus dem durchstrahlten Körper aus, ist also nicht transformiert worden, hat also auch keine Wirkung. Denn jede Wirkung beruht, wie wir gesehen haben, auf einer Energietransformation.

Es ist das spezielle Verdienst Kienböcks, daß er nicht müde wurde, immer wieder auf die Tatsache hinzuweisen, daß nicht die durchgehenden, sondern die absorbierten Strahlen es sind, welche für die biologische Wirkung verantwortlich gemacht werden müssen. Die Beobachtungen, welche Kienböck zu dieser Erkenntnis geführt haben, sind so typisch und so instruktiv, daß sie hier in Kürze wiedergegeben werden sollen.

Es war zu der Zeit (1899), als man noch mit unregulierbaren Röhren arbeitete. Eine solche Röhre, die Kienböck verwendete, „fluoreszierte zuerst lebhaft, gab gutes Röntgenlicht und die Patienten begannen die gewünschten Hautveränderungen zu zeigen. Doch war dies nicht in ausreichendem Maße der Fall und die Sitzungen wurden lange fortgesetzt. Die Veränderungen gingen aber nicht nur nicht vorwärts, sondern sogar zurück. Manche Individuen hatten am 17. März 1900 bereits 80 und mehr Sitzungen erhalten, wobei die Röhre allmählich immer härter geworden war, und schließlich statt Fluoreszenz- und Röntgenlicht nur noch elektrische Entladungen in Funken oder in Büscheln abgegeben hatte. Nun schlug ein Funke durch die Röhrenwand und ich setzte vom 18. März an die Behandlung bei meinen Patienten mit einer Müllerschen Röhre mit Reguliervorrichtung fort. Die Röhre wurde ziemlich stark belastet, fluoreszierte lebhaft und gab intensives mittelweiches Röntgenlicht. Der Antikathodenspiegel kam bald in mäßige Rotglut. Nicht ganz 14 Tage später brach nun bei allen Patienten Entzündung aus, die Expositionen wurden natürlich nicht fortgesetzt, doch kam die Unterbrechung zu spät, die Entzündung schritt bis zur Bildung von Exkorationen fort . . . . In ganz analoger Weise ereigneten sich Überexpositionen bei anderen Radiotherapeuten beim Übergang von einer gebrauchten zu einer neuen Röhre. Wir sehen hierin typische Entstehungsbedingungen für Verbrennungen in der Radiotherapie.“

Diese Beobachtung ist für unsere Energiebetrachtungen höchst lehrreich. Es darf wohl angenommen werden, daß dem Kienböckschen Instrumentarium stets ungefähr die gleiche Menge elektrischer Energie im Primärkreise zugeführt worden ist. Was sich geändert hat, ist das Vakuum der Röhre, deren Gasinhalt gesunken und deren elektrischer Widerstand gewachsen

ist. Die Verhältnisse im Sekundärstromkreis haben sich also geändert, indem die Spannung gestiegen und die Stromstärke gesunken ist. Immerhin wird das Produkt der beiden annähernd konstant geblieben sein, so daß die der Röhre zugeführte elektrische Energie sich nicht um einen wesentlichen Betrag geändert haben kann. Auch bei der Transformation der elektrischen Energie des Sekundärstromes in Röntgenenergie ist der Nutzeffekt erst dann wesentlich gesunken, als die Büschelentladungen auftraten, denn diejenige Elektrizitätsmenge, welche den Sekundärkreis in Büschelentladungen verläßt, wird natürlich nicht in Röntgenstrahlen transformiert. Bevor aber dieser äußerste Härtegrad erreicht war, muß ungefähr gleich viel Röntgenenergie von der Röhre ausgegangen sein, wie zu Anfang.

Wenn nun trotzdem bei dem „Härterwerden“ der Röhre die biologische Wirkung in auffallendstem Maße abnahm, so müssen wir den Schluß ziehen, daß der Nutzeffekt der biologischen Wirkung, d. h. der Transformation der Röntgenstrahlen im Körper geringer wurde. Das dies tatsächlich so ist, stellen wir sofort fest, sobald wir hinter die Kienböckschen Patienten in Gedanken einen Leuchtschirm aufstellen. Bei Röhren von geringem oder mittlerem Härtegrad ist der Schirm verhältnismäßig dunkel. Mit fortschreitendem Härterwerden der Röhre aber wird der Schirm mehr und mehr aufleuchten. Es nimmt also der Anteil an nicht absorbiertes Strahlung zu und damit muß der Anteil an absorbiertes Strahlung, d. h. an nicht transformierter Röntgenenergie abgenommen haben. Es stimmt also die klinische Erfahrung Kienböcks vollständig mit der logisch notwendigen Tatsache, daß nur die absorbierte, nicht die durchgehende Strahlung eine Wirkung haben kann.

Es ist hier der Ort, auf eine Schwierigkeit aufmerksam zu machen, welche sich dem Verständnis aller dieser Fragen entgegenstellt und wie ein roter Faden durch die ganze Literatur sich zieht. Man nennt bekanntlich diejenigen Strahlen „hart“, welche ein großes Durchdringungsvermögen haben, während die weniger durchdringungsfähigen als „weich“ bezeichnet werden. Man darf aber nie vergessen, daß die Menge des Röntgenlichtes nach dem Durchgang durch ein absorbierendes Medium nicht nur von der Härte der Strahlen, sondern auch von deren ursprünglichen Intensität abhängt. Ein einfaches Experiment mag diese höchst wichtige Frage klären.

Schalten wir zwischen eine weiche Röhre und einen mit Metallbuchstaben belegten Leuchtschirm eine Holzplatte von 1 cm Dicke, und stellen wir uns mit dem Leuchtschirm in größere Entfernung von der Röhre, so werden wir, auch mit gut ausgeruhtem Auge, weder eine grüne Fluoreszenz noch die Schatten der Metallbuchstaben wahrnehmen. Nähern wir uns der Röhre, so kommt ein Moment, wo — infolge dieser Annäherung — die Intensität des auf den Schirm fallenden Röntgenlichtes so stark geworden ist, daß auch der kleine Bruchteil desselben, welcher durch das Holz hindurch zu dringen vermag, genügt, um eine unserm Auge sichtbare Fluoreszenz hervorzurufen, und dann erscheinen schwarze Buchstaben auf grünem Grunde. Es ist also bei Annäherung an die Röhre tatsächlich mehr Röntgenlicht durch das Holz gedrungen und auf den Leuchtschirm gefallen, ohne daß sich der Härtegrad der Röhre geändert hätte.

Dadurch ist der experimentelle Beweis geliefert, daß die absolute Größe der Intensität einer durch Absorption geschwächten Strahlung — in diesem Falle der Schwellenwert für das ausgeruhte Auge — durchaus keinen Anhaltspunkt für deren Durchdringungsfähigkeit liefern kann. Denn in unserem Experiment hat sich die Sichtbarkeit der Buchstabenschatten von der völligen Unsichtbarkeit bis zu vollkommener Deutlichkeit gesteigert, während der Härtegrad der Strahlung unverändert blieb.

Auch hier werden wir am besten mit dem Begriffe des Nutzeffektes uns einen klaren Blick in die Verhältnisse verschaffen. In der Röntgentherapie ist der Zweck die Umwandlung von Röntgenenergie in eine biologisch wirksame Form. Hierzu ist eine Absorption im Körper nötig. Der Nutzeffekt unseres Absorptionsexperimentes ist also der Quotient der absorbierten und der eindringenden Strahlung. Selbstverständlich hängt die Größe dieses Anteiles nicht nur

von dem Härtegrade, sondern außerdem von der Dicke der durchstrahlten Schicht ab, und es wird unsere Hauptaufgabe in dem entsprechenden Kapitel sein, den Zusammenhang zwischen der Dicke der absorbierenden Schicht und dem Nutzeffekt der Absorption klarzustellen. Aber durch die Einführung dieses Nutzeffektes haben wir doch wenigstens einmal den Einfluß der Intensität ausgeschaltet. Wir können zwei Strahlungen vergleichen, deren eine die hundertfache Röntgenenergie repräsentiert, wie die andere; wird aber durch eine absorbierende Schicht von diesen beiden Strahlungen der gleiche Bruchteil absorbiert, so haben sie den gleichen Härtegrad.

Greifen wir auf unser Experiment zurück und wählen wir die Strahlung so weich, daß die auffallende Röntgenenergie nach dem Durchgang durch die Holzplatte auf 30 % reduziert worden ist. Dann stellen wir uns mit dem Schirm so weit von der Röhre weg, daß die schwarzen Buchstaben auf grünem Grunde eben noch zu erkennen sind. Nehmen wir an, dies treffe zu für eine Entfernung von 5 m. Gehen wir dann noch weiter zurück, z. B. auf 7 m, so sehen wir nichts mehr, denn die Fluoreszenz, bisher an der Grenze der Wahrnehmbarkeit ist auf  $(\frac{5}{7})^2$  oder die Hälfte ihres Wertes gesunken. Wechseln wir nun die Röhre aus gegen eine härtere, deren Strahlung in 1 cm Holz auf 60 % (anstatt auf 30 %) reduziert; dann läßt das Holz doppelt so viel Röntgenenergie durch, die Fluoreszenzhelligkeit wird wieder auf ihren ursprünglichen Wert, und damit die Metallbuchstabenschatten wieder an die Grenze der Sichtbarkeit gebracht. Aus diesem Zahlenbeispiele ersieht man, daß eine bestimmte Helligkeit des Fluoreszenzlichtes hinter einem absorbierenden Körper ebenso gut durch Erhöhung des Härtegrades als durch Vermehrung der auffallenden Röntgenenergiemenge erreicht werden kann, denn das Ergebnis der Annäherung an den Schirm ist ja bekanntlich stets eine Vermehrung der in der Zeiteinheit auffallenden Röntgenenergiemenge im umgekehrten Verhältnis der Quadrate der Entfernungen von der Strahlenquelle.

Aus diesen Beispielen geht hervor, daß die Intensität einer Strahlung, d. h. die in der Zeiteinheit auf die Flächeneinheit treffende Energiemenge einerseits und die Härte oder das Durchdringungsvermögen andererseits zwei völlig verschiedene Dinge sind, die man streng auseinander halten muß, sollen nicht stets wieder neue Verwicklungen des Gedankenganges entstehen.

Aber auch die Dosis, d. h. diejenige Größe, welche uns für die Radiotherapie am meisten interessiert, ist wieder etwas ganz anderes. Wir haben ja gesehen, daß die biologische Wirkung nicht von derjenigen Energiemenge abhängt, welche auf einen Körper trifft, sondern nur von demjenigen Bruchteil derselben, welcher in diesem Körper absorbiert und damit in eine andere Energieform transformiert wird. Fallen also auf den gleichen Körper — sei es eine lebende Zelle, oder ein Reagenzkörper u. a. m. — zwei verschiedene Strahlungen, welche zwar die gleiche Intensität, aber verschiedenes Durchdringungsvermögen haben, so bleibt von der durchdringungsfähigern Strahlung ein kleinerer Bruchteil in dem Körper zurück, es wird eine kleinere Energiemenge in dem Körper umgesetzt und da muß folgerichtig die Wirkung der härteren (durchdringungsfähigern) Strahlung die geringere sein, immer unter der Voraussetzung gleicher Intensität, d. h. gleicher Energiezufuhr in der gleichen Zeit.

Nun kann aber außerdem von der absorbierten Energiemenge das eine Mal ein größerer und das andere Mal ein kleinerer Teil solche Transformationen eingehen, welche die spezifische biologische Wirkung darstellen, so daß — selbst bei gleich großer absorbiertener Energiemenge — der biologische Nutzeffekt verschieden groß ausfallen kann. Wir werden demgemäß gezwungen sein, eine physikalische und eine biologische Dosis zu unterscheiden.

## II. Der Härtegrad.

### A. Definition.

Verschiedene Bezeichnungen sind für diejenige Eigenschaft einer Röntgenstrahlung in Gebrauch, die wir bisher mit dem Namen Härtegrad<sup>1)</sup> bezeichnet haben. Die beste Bezeichnung ist wohl „Durchdringungsfähigkeit“, denn je größer der Anteil an Strahlung ist, welche in einem absorbierenden Medium von gegebenen Dimensionen nicht absorbiert wird, d. h. je härter nach unserem Sprachgebrauch die Strahlung ist, um so besser ist sie eben „durchdringungsfähig“. Man spricht auch etwa kurz von der „Strahlenqualität“, indem man den Härtegrad als die Qualität par excellence auffaßt, und ein bekanntes Instrument zur Messung des Härtegrades hat hiernach den Namen „Qualimeter“ erhalten. Weniger gut ist der Name „Penetrationskraft“. Abgesehen davon, daß er eine lateinisch-deutsche Bastardbildung ist, so sollte das Wort „Kraft“ in solchem Sinne nicht verwendet werden. Mit Kraft bezeichnet man in der Physik stets das Produkt von Masse und Beschleunigung, und es ist aus diesem Grunde sogar der vorher allgemein beliebte Ausdruck „Pferdekraft“ gestrichen und durch „Pferdestärke“ (P. S.) ersetzt worden. Wir wollen uns daher auch in der Röntgentechnik einer korrekten Namengebung befleißigen, nicht aus Pedanterie, sondern weil wir dadurch manche immer wiederkehrende Unklarheiten und Trugschlüsse aus der Literatur ein für alle Male verbannen können.

In der Einleitung haben wir gesehen, daß man die Beurteilung des Härtegrades von jedem Einfluß der Intensität befreien kann, wenn man nicht die absolute Menge der absorbierten, bzw. der nicht absorbierten Röntgenenergie als Maß wählt, sondern das Verhältnis der nicht absorbierten zur ursprünglich vorhandenen Energiemenge.

Ferner haben wir bereits darauf aufmerksam gemacht, daß die Menge des nicht absorbierten Röntgenlichtes in jedem Falle nicht nur von dem Härtegrade, sondern ebensowohl auch von der Dicke der absorbierenden Schicht abhängig ist. Man kann daher zur Beurteilung des Härtegrades die Frage in zwei verschiedenen Formen stellen:

1. Man setzt eine bestimmte Dicke der absorbierenden Schicht fest, z. B. 1 mm, und ermittelt, welcher Prozentsatz der eindringenden Strahlungsenergie von dieser Schicht absorbiert wird. Man nennt diese Größe den Absorptionskoeffizienten. Man berechnet denselben in der Regel in Prozenten pro Millimeter absorbierender Schicht. Er hat also die Dimension der reziproken Länge.

Je härter eine Strahlung, desto kleiner ist ihr Absorptionskoeffizient.

2. Man setzt einen bestimmten Prozentsatz der Strahlung fest, welcher die Schicht durchdringen soll, am einfachsten 50 % oder die Hälfte, und gibt die Dicke derjenigen Schicht an, welche gerade dieses Absorptionsverhältnis hervorbringt. Hat man die Zahl 50 % gewählt, so nennt man diese Schichtdicke „Halbwertschicht“. Man mißt sie in Zentimeter oder Millimeter.

Je härter eine Strahlung, desto größer ist ihre Halbwertschicht.

---

<sup>1)</sup> Die Bezeichnung „Härtegrad“ oder kurz „Härte“ ist schon mehr bildlich, ohne Anlehnung an einen wohl definierten Begriff. Immerhin weiß jeder, der sich praktisch mit Röntgenstrahlen abgibt, in kürzester Zeit, was mit diesem Worte gemeint ist.

An dieser Stelle beginnt nun die große Schwierigkeit, welche bei keiner andern Strahlung so ausgesprochen in Erscheinung tritt wie gerade bei der Röntgenstrahlung: die Härtung durch fortschreitende Absorption. Es ist dies eine Erscheinung, auf welche Röntgen selbst bereits aufmerksam gemacht hat und welche darin besteht, daß beim Durchdringen dicker Schichten die Strahlung fortwährend härter und härter wird.

Betrachten wir diese Erscheinung auf Grund des Begriffes des Absorptionskoeffizienten, so können wir z. B. beobachten, daß dieser Koeffizient für eine bestimmte Strahlung und ein bestimmtes Medium von seinem ursprünglichen Werte von 50 % pro Millimeter auf 30 % pro Millimeter gesunken ist.

Oder wir haben festgestellt, daß die Strahlung in 8 mm des eines Mediums auf die Hälfte reduziert wird, während sie von den folgenden 8 mm nicht etwa wieder auf die Hälfte, d. h. auf 25 % des ursprünglichen Wertes reduziert wird, sondern daß hierzu 11 anstatt 8 mm nötig sind.

D. h. je dicker die Schicht ist, welche eine Röntgenstrahlung zu durchsetzen hat, um so kleiner wird ihr Absorptionskoeffizient, um so größer wird die Halbwertschicht. Diese beiden Größen, Absorptionskoeffizient und Halbwertschicht, sind also leider keine Konstanten, sondern Funktionen der Schichtdicke.

### B. Homogene Strahlen.

Röntgen selbst hat die Vermutung ausgesprochen, daß die von ihm zuerst beschriebene „Härtung“ ihren Grund in einer Inhomogenität der Röntgenstrahlen haben möchte, d. h. daß die Strahlung ein Gemisch von Strahlen verschiedenen Härtegrades darstelle. Darunter befinden sich Strahlen, welche schon in den obersten Schichten des absorbierenden Körpers absorbiert werden, während von den härteren ein größerer Prozentsatz durchgelassen wird. Daher wird eine solche Strahlung, je weiter sie durch das absorbierende Medium vordringt, verhältnismäßig um so mehr harte und um so weniger weiche Komponenten enthalten, und deshalb wird man das Gesamtdurchdringungsvermögen des Strahlengemisches je länger desto größer finden.

Eine Analogie hierzu finden wir in unserm Sonnenlicht. Lassen wir dasselbe auf die Haut fallen, so werden die kurzwelligen Komponenten schon in den obersten Schichten der Haut zum größten Teile absorbiert, während die langwelligen relativ weit in die Tiefe vordringen. Der Prozentsatz an Lichtenergie, der in den obersten Hautschichten absorbiert wird, ist daher größer, als in den tiefern Schichten. Es findet also auch beim Sonnenlicht eine Härtung statt.

Eine Strahlung, die nicht aus verschiedenen Komponenten zusammengesetzt ist, heißt homogen. Das Sonnenlicht ist nicht homogen. Erst wenn wir es mit dem Prisma zerlegt haben, und mittelst einer schmalen Spalte eine bestimmte Lichtqualität herausgreifen, dann haben wir eine homogene Strahlung und damit einen unveränderlichen Härtegrad.

Nun hat Röntgen den umgekehrten Schluß gezogen: Weil die Röntgenstrahlung beim Durchgang durch eine dicke Schicht härter wird, so ist sie wahrscheinlich nicht homogen, denn Strahlungen, die nicht homogen sind, werden bei der Absorption in dicken Schichten gehärtet.

Will man also entscheiden, ob diese Erklärung der beobachteten Tatsache der Härtung die richtige sei, so muß man versuchen, die Röntgenstrahlen genau so, wie die Lichtstrahlen, in ihre Bestandteile zu zerlegen, mit andern Worten das Spektrum der Röntgenstrahlen herzustellen. Dies ist in der Tat durch einen sehr schönen Versuch von Adams gelungen.

Es ist bekannt, daß, je höher die Spannung an den Elektroden der Röntgenröhre ist, desto größer die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen wird, und daß bei der Transformation der Kathodenstrahlen in Röntgenstrahlen der Härtegrad der Röntgenstrahlung um so höher wird, je größer die Kathodenstrahlengeschwindigkeit ist.

Sind nun in der Röntgenröhre Kathodenstrahlen von verschiedener Geschwindigkeit vorhanden, so müssen auch Röntgenstrahlen von verschiedenen Härtegraden entstehen. Nun ist aber bekannt, daß die Kathodenstrahlen sich durch ein magnetisches Feld ablenken lassen. Dabei müssen diejenigen Strahlen, welche die geringste Geschwindigkeit haben, am stärksten abgelenkt werden. Sind also Kathodenstrahlen von sehr verschiedener Geschwindigkeit vorhanden, so werden sie dementsprechend verschieden stark abgelenkt.

Auf dieser Überlegung konnte Adams nicht nur das Spektrum der Röntgenstrahlen entwerfen, sondern gleichzeitig den Nachweis leisten, daß tatsächlich die stärker abgelenkten Kathodenstrahlen auch die weniger durchdringungsfähigen Röntgenstrahlen liefern.

Andererseits darf daraus nicht geschlossen werden, daß in solchen Gemischen Strahlen von sehr verschiedenem Durchdringungsvermögen enthalten seien. Im Gegenteil, man kann trotz der Adamsschen Versuche das Röntgenstrahlengemisch als nahezu homogen ansehen, wenigstens so homogen, daß die Abweichungen für unsere praktischen Zwecke nicht in Betracht kommen.

Man kann nämlich, wie Walter gezeigt hat, durch ein genügend kräftiges magnetisches Feld den Brennfleck einer Röntgenröhre auf der Antikathode bis an den Rand derselben verschieben, ohne daß er sich wesentlich verbreiterte, was doch unfehlbar eintreten müßte, wenn Kathodenstrahlen von sehr verschiedener Ablenkbarkeit in dem Gemische enthalten wären.

Diese Feststellung ist für unsere Messungen von größtem Werte. Denn wenn wir sicher sind, daß wir es tatsächlich mit einer fast homogenen Strahlung zu tun haben, so steht unsere Definition des Absorptionskoeffizienten und der Halbwertschicht auf viel sicherem Boden. Andererseits wird dadurch Röntgens Erklärung der Strahlenhärtung beim Durchgang durch dicke Schichten hinfällig. Denn tatsächlich bewegen sich die beobachteten Härteänderungen in solchen Dimensionen, daß nur ein Strahlengemisch aus sehr verschiedenen Komponenten zur Erklärung genügen könnte. Ein solches liegt aber tatsächlich nicht vor, wenigstens nicht bei schwacher und mittlerer Belastung der Röhre.

### C. Die Sekundärstrahlen.

Eine andere Erklärung der Strahlenhärtung hat Walter versucht. Wird eine Röntgenstrahlung in einem Medium absorbiert, so wird ein Teil der absorbierten Strahlung in Strahlen von anderm Durchdringungsvermögen transformiert. Diese führen den Namen Sekundärstrahlen. Sowohl die Menge als der Härtegrad der Sekundärstrahlen hängt von dem Härtegrad der Primärstrahlung und von der Natur des absorbierenden Materials ab. Je härter die Primärstrahlung ist, um so reichlichere und um so härtere Sekundärstrahlen entstehen unter ihrer Wirkung. Daher kommt es z. B., daß man mit sehr harten Strahlen stets verschleierte Röntgenaufnahmen erhält.

Je höher das Atomgewicht eines absorbierenden Elementes ist, um so weichere Sekundärstrahlen sendet dasselbe aus. Die Sekundärstrahlen, welche von Blei ausgehen, sind so weich, daß sie schon von einem Blatt Papier in hohem Maße absorbiert werden, während die Sekundärstrahlen, welche von Wasser oder von tierischen oder menschlichen Geweben ausgehen, bedeutend härter sind, als die Primärstrahlung. Nun hat aber Walter selbst andererseits wieder nachgewiesen, daß die Berücksichtigung der Beimischung von Sekundärstrahlen zur Erklärung der Änderung des Härtegrades nicht genügt, indem er zeigte, daß die Entfernung der Sekundärstrahlenquelle vom Leuchtschirm den Härtegrad nicht verändert. Dieses Resultat ist so überraschend, daß weitere Versuche in dieser Richtung von höchstem Interesse wären.

Dabei ist der Gedankengang Walters folgender: Schiebt man zwischen die Röhre und die Härteskala eine absorbierende Substanz, deren Sekundärstrahlen von anderem Härtegrad sind als die Primärstrahlen, so wird 1. die Primärstrahlung durch Absorption geschwächt

und 2. wird ihr eine Strahlung von anderem Härtegrad beigemischt. Der mittlere Härtegrad dieses Gemisches muß demgemäß ein anderer sein als derjenige der ursprünglichen Primärstrahlung. Die Wirkung dieser Sekundärstrahlen muß aber auch um so größer sein, je näher sich die absorbierende Schicht an der Härteskala befindet. Da aber mit wachsendem Anteil an beigemischter Sekundärstrahlung der Härtegrad des Gemisches entsprechend mehr verändern muß, so sollte durch das Experiment nachzuweisen sein, daß diese Veränderung um so beträchtlicher gefunden wird, je näher die absorbierende Substanz — also die Sekundärstrahlenquelle — sich an der Härteskala befindet.

Nun hat aber Walter konstatiert, daß bei Verschiebung der absorbierenden Substanz in der Strahlenrichtung eine Veränderung des Härtegrades nicht zu konstatieren sei. Hieraus folgert er weiter, daß deshalb sein Erklärungsversuch unzureichend sein müsse.

Dieser Schlußfolgerung kann ich nicht ohne weiteres beistimmen. Ich hege sogar die Hoffnung, daß weitere Versuche den Walterschen Erklärungsversuch, der sonst außerordentlich viel für sich hat, rechtfertigen möchten.

Zunächst darf man nicht übersehen, daß zwar mit der Entfernung der absorbierenden Schicht von der Härteskala die Wirkung der in dieser Schicht entstehenden Sekundärstrahlen auf die Skala und den dahinter liegenden Leuchtschirm bzw. photographischen Platte zunimmt, daß aber gleichzeitig der Abstand zwischen der absorbierenden Schicht und der Strahlenquelle abnimmt, so daß andererseits die Menge der erzeugten Sekundärstrahlen — infolge der vergrößerten Intensität — zunimmt. Die genaue Durchführung der Rechnung für Aufstellung dieses Zusammenhanges ist zu kompliziert, um hier wiedergegeben zu werden. Es mag genügen anzuführen, daß tatsächlich die Wirkung der Sekundärstrahlen bei Entfernung der absorbierenden Schicht von der Härteskala abnimmt und in halber Fokaldistanz ein Minimum erreicht.

Ferner muß der Unterschied des Einflusses der Sekundärstrahlen bei verschiedenen Stellungen der absorbierenden Schicht um so deutlicher hervortreten, je kleiner die Flächenausdehnung der absorbierenden Schicht ist.

Leider haben eigene diesbezügliche Versuche mir noch keine eindeutigen Resultate ergeben, so daß ich keine definitive Meinung über diese interessante Frage aussprechen kann.

Diese Dinge haben nicht etwa bloß theoretisches Interesse, sondern sie sind für eine Frage, die in der Therapie eine große Rolle spielt, von größter Bedeutung, nämlich für die Verwendung der sogenannten Strahlenfilter.

#### D. Strahlenfilter.

Die Tatsache, daß eine Strahlung nach dem Durchgang durch eine absorbierende Schicht härter geworden ist, hat dank dem Röntgenschen Erklärungsversuche zu der Vorstellung geführt, daß die absorbierende Substanz die weichen Strahlen zurückgehalten und die harten durchgelassen habe.

Abgesehen davon, daß sehr wahrscheinlich gar nicht ein Strahlengemisch von so großer Verschiedenheit der Komponenten vorliegt, wie dies für die genannte Auffassung notwendig wäre, ist jedenfalls die landläufige Vorstellung ungerechtfertigt, wonach solche „Strahlenfilter“ diejenigen Strahlen wegnehmen, welche die Haut schädigen könnten, während sie andere Strahlen durchlassen, welche eine Tiefenwirkung entfalten. Wir werden später sehen, daß jede Strahlung, auch eine „filtrierte“ stets eine größere Wirkung auf die Haut hat als auf ein subkutanes, gleich empfindliches Gewebe, wengleich allerdings das Verhältnis zwischen Hautwirkung und Tiefenwirkung um so günstiger wird, je härter die Strahlung ist. Jedes Mittel, welches den Härtegrad erhöht — also auch ein „Strahlenfilter“ — verkleinert die Hautwirkung gegenüber der Tiefenwirkung.

Trägt man aber der Tatsache Rechnung, daß das Röntgenstrahlengemisch überhaupt

nicht Komponenten von sehr verschiedenem Durchdringungsvermögen enthält, so ist auch die Auffassung der Härtung als „Filterwirkung“ nicht mehr gerechtfertigt. Gewiß sind über diese Fragen die Akten noch nicht geschlossen, aber so viel ist sicher, daß es sich bei der Härtung der Röntgenstrahlen nicht um eine einfache Filterwirkung handeln kann. Wahrscheinlich spielt die „Filterierung“, d. h. die ungleiche Absorption verschieden harter Komponenten eine ganz untergeordnete Rolle.

Dementsprechend ist es aber auch nicht gerechtfertigt, die Härtung der Röntgenstrahlen beim Durchgang durch eine absorbierende Schicht schlechthin als „Filterierung“ zu bezeichnen, und ich habe demgemäß der deutschen Röntgengesellschaft den Antrag gestellt, diese Bezeichnung als irreführend zu streichen. Es gibt aber eine Bezeichnung, welche gar nichts präjudiziert. Mag der Vorgang der Härtung so oder anders zu erklären sein, jedenfalls liegt demselben mindestens eine Energietransformation zugrunde. Man geht daher auf keinen Fall fehl, wenn man aus dem ganzen Vorgang die Tatsache dieser Transformation herausgreifen, und die Substanzen, welche zur Härtung der Röntgenstrahlen dienen, Transformatoren, nennt. Dabei wird dann wieder der Begriff des Nutzeffektes seine Bedeutung haben, denn der Transformator (alias Filter) liefert uns nicht nur Strahlen von höherem Härtegrade, sondern zugleich von geringerer Intensität.

Es ist dies zur Beurteilung der sogenannten „Filterwirkung“ von größter Bedeutung. Denn was hilft es, festzustellen, daß z. B. bei Verwendung eines Filters eine geringere Hautwirkung auftritt, wenn man nicht auseinanderhält, wie weit diese Abschwächung der Hautwirkung auf die Härtung und wie weit sie auf die Schwächung durch Absorption in dem „Filter“ zurückzuführen ist? Ist nur letzteres der Fall, so könnte man ja ebensogut die Röhre weniger belasten oder kürzere Zeit exponieren, oder eine größere Fokaldistanz wählen.

In direktem Widerspruch mit all diesen Erörterungen steht die von v. Jacksch wiederholt veröffentlichte Wahrnehmung, daß unter einer absorbierenden Silberschicht von 0,01 mm Dicke die Haut gegen Röntgenschädigungen in weitgehendem Maße geschützt ist, während dabei die Tiefenwirkung nicht beeinträchtigt werden soll. Es ist auch auf dem letzten Kongreß der deutschen Röntgengesellschaft (Berlin 1912) wieder darüber diskutiert worden. Dabei hat Dessauer sogar behauptet, daß man unter der Silberschicht bis zum Zwanzigfachen der Erythemdosis messen könne, ohne daß die Haut ein Erythem zeige, während hervorragende Physiker wie Walter und Rosenthal vom physikalischen Standpunkte schwerwiegende Bedenken äußerten.

Über die Natur dieses Problems sei nur folgendes gesagt: Je nach der Natur einer absorbierenden Schicht ist die Härtung der Strahlung verschieden. Am geringsten ist die Härtung bei den Metallen der Silbergruppe: Ag, Sn und Cd. Ob man nun die Härtung als einen Filtrationsvorgang oder als etwas anderes auffasse, immer bleibt die Tatsache bestehen, daß man zur Härtung der Röntgenstrahlen kein ungünstigeres Metall wählen kann, als gerade Silber oder Zinn (Staniol). Haben aber Silber und Staniol die hautbeschützenden Eigenschaften, die ihnen nachgerühmt werden, so müßte hierfür eine Erklärung gesucht werden, für welche uns zurzeit jeder geringste Anhaltspunkt vollkommen fehlt.

## E. Härtemessung.

### 1. Theorie.

Nachdem wir für die „Härte“ oder das Durchdringungsvermögen eine Definition gegeben haben, oder eigentlich deren zwei — Absorptionskoeffizient und Halbwertschicht — kann man nur dann streng von Messung reden, wenn eine dieser Größen zahlenmäßig festgestellt wird. Immerhin können für die Beurteilung des Härtegrades gewisse empirische oder arbiträre Zahlen festgelegt werden, welche die Möglichkeit bieten, bestimmte Härtegrade jederzeit zu erkennen.

Über die Beziehung des Absorptionskoeffizienten zur Halbwertschicht ist noch ein kurzes Wort zu sagen. So lange man mit einer homogenen Strahlung rechnen darf, ist die Ableitung sehr einfach. Die Abnahme der Energie,  $-dE$ , ist proportional dem Absorptionskoeffizienten  $h$ , proportional der Energie der einfallenden Strahlung  $E$ , und proportional der Dicke der absorbierenden Schicht,  $dx$ , also

$$-dE = h \cdot E \cdot dx \quad (1)$$

woraus

$$E = E_0 \cdot e^{-h \cdot x} \quad (2)$$

Diese Integration ist aber nur so lange korrekt, als  $h$  eine Konstante, d. h. von  $x$  unabhängig ist. Sobald wir es mit einer beträchtlichen Strahlenhärtung, also mit einer Zunahme von  $h$  mit wachsendem  $x$  zu tun haben, gilt Gleichung (2) nicht mehr streng.

Immerhin verlohnt es sich wenigstens für die homogene Strahlung noch die Bedeutung der Halbwertschicht festzustellen: Hat die Strahlung ihre Halbwertschicht durchdrungen, so ist  $E = \frac{1}{2} \cdot E_0$  geworden. Wir haben dann in Gleichung (2) diesen Wert für  $E$  einzusetzen und überdies an Stelle von  $x$  die Halbwertschicht  $a$  einzuführen.

Es ergibt sich dann die einfache Beziehung:

$$a = \frac{1}{h} \cdot \log \cdot \text{nat.} (2) = \frac{7}{10 \cdot h} \quad (3)$$

und mit Rücksicht auf Gleichung (2)

$$E : E_0 = 1 : 2^{\frac{x}{a}} \quad (4)$$

d. h. geht eine Röntgenstrahlung durch eine absorbierende Schicht von der Dicke  $x$ , in welcher sie eine Halbwertschicht  $a$  hat, so wird sie durch die Absorption geschwächt im Verhältnis von  $2^{\frac{x}{a}}$  zu 1.

Findet eine Härtung der Strahlung statt, so kann man trotzdem diese Formel gebrauchen, man muß dann nur bedenken, daß der Absorptionskoeffizient an der untern Grenze der Halbwertschicht größer ist, als an deren oberer Grenze, und daß derjenige Wert des Absorptionskoeffizienten, für welchen die Gleichung (3) Geltung hat, einen Mittelwert dieser beiden Extreme darstellt.

## 2. Die Methoden.

### a. Die Phantomhand.

Nicht einmal den Wert einer arbiträren Skala, weil überhaupt nur eine qualitative, aber keine quantitative Beurteilung möglich ist, bietet die von Schilling empfohlene Phantomhand, d. h. ein in Wachs eingebettetes Handskelett, dessen Schirmbild (an Stelle der lebenden Hand des Beobachters) eine annähernde Beurteilung des Härtegrades zuläßt. Erscheint die ganze Hand auf dem Leuchtschirm so dunkel, daß man die Knochenschatten nur schwer noch erkennen kann, so ist die Röhre sehr weich. Erscheinen die Weichteile relativ hell mit einem viel dunkleren Knochengerüst, so hat die Röhre einen mittleren Härtegrad. Erscheinen endlich die Knochen relativ hell und die Weichteile noch etwas — aber nicht viel — heller, so ist die Röhre sehr hart.

### b. Schwellenwertskalen. Walter. Beez.

Auf einem unrichtigen Grundsatz sind die Schwellenwertskalen aufgebaut. Bei diesen Skalen sind in einem Bleiblech Löcher ausgestanzt und in diese Löcher sind Substanzen von verschiedenem Absorptionsvermögen eingefügt, so bei der ursprünglichen Walterskala Platinbleche von steigender Dicke und bei der Beezskala gleich dicke Scheiben aus verschiedenen Substanzen.

Beide Skalen leiden an einem prinzipiellen Fehler, den wir in einem früheren Abschnitt (s. S. 5) bereits besprochen haben, und den übrigens Walter selbst in seiner diesbezüglichen Veröffentlichung bereits erwähnt hat. Die Vorschrift zur Benutzung dieser Skalen heißt nämlich, man soll mit dem Instrument gegen die leuchtende Röhre visieren und die Anzahl der hellen Kreise zählen, welche man erkennen könne. Nun besteht ja kein Zweifel darüber, daß man bei einer durchdringungsfähigeren, also härteren Strahlung, mehr helle Kreise sehen muß, als bei einer weniger durchdringungsfähigen oder weicheren. Aber auch, wenn man die Intensität vermehrt, indem man entweder sich der Röhre nähert oder dieselbe stärker belastet, wird man ebenfalls mehr helle Kreise erkennen können. Sieht man also viele helle Kreise, so weiß man noch nicht, ob dies auf Zunahme des Härtegrades oder der Intensität zurückzuführen ist.

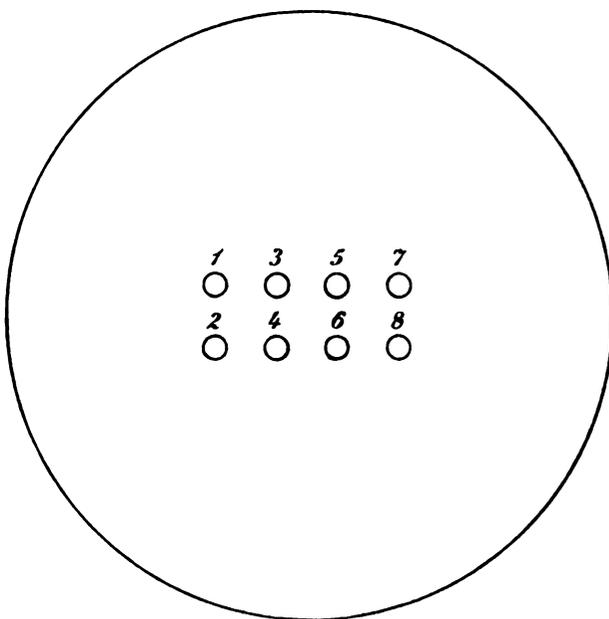


Fig. 1.

Zur Korrektur dieses Fehlers hat Walter die Vorschrift gegeben, das Instrument müsse bei der Ablesung „bis auf einige Zentimeter“ an die Röhre gebracht werden. Aber auch dann noch, und wenn man selbst von dem verschiedenen großen Röhrenradius absieht, entsteht eine Ungenauigkeit aus der verschiedenen starken Belastung der Röhre. Dies hatte zu der Zeit, als Walter seine erste Skala erfand, nur beschränkte Bedeutung, weil damals die überhaupt möglichen Intensitäten viel beschränkter waren als heute. Immerhin müßte für den Gebrauch der Walterskala nicht nur die Fokaldistanz, sondern auch die Stromstärke des Sekundärkreises angegeben werden, denn mit abnehmender Fokaldistanz und mit steigender Belastung wird man trotz gleichem Härtegrade mehr helle Felder wahrnehmen. Das Instrument ist aber in allen seinen Teilen so muster­gültig ausgedacht, daß trotz allem eine kurze Beschreibung an dieser Stelle nicht umgangen werden kann.

Vor einen Leuchtschirm ist eine Bleiplatte, *S*, geschaltet, in welche acht kreisförmige Löcher ausgestanzt sind. In diese Löcher sind Platinlamellen eingelegt, deren Dicken in geometrischer Progression steigen: 0,005 mm, 0,01 mm, 0,02 mm, 0,04 mm, 0,08 mm, 0,16 mm, 0,32 mm, 0,64 mm. Zur Ablendung seitlichen Lichtes ist über der ganzen Vorrichtung ein Hohlzylinder, *R*, angebracht. Die Bleiplatte dient gleichzeitig als Schutz des Beobachters gegen die Wirkung

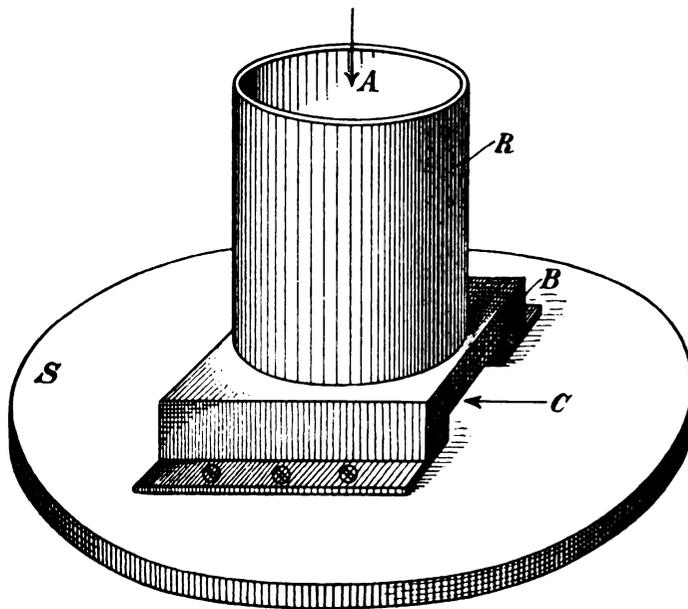


Fig. 2.

der Röntgenstrahlen. Walter hat mit Vorbedacht an Stelle der arithmetischen Progression die geometrische gesetzt, weil bei arithmetisch wachsenden Schichtdicken entweder bei weichen Strahlen zu große oder bei harten Strahlen zu kleine Helligkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Feldern gefunden würden. Es sind ferner die aufeinanderfolgenden Schichten im Zickzack angeordnet, damit überall Felder von ähnlicher Helligkeit nebeneinander liegen, und somit keine Blendung eintreten kann.

Bei der Beezskala ist über das Material nichts angegeben, aus welchem die durchlässigen Schichten bestehen. Einen Vorteil hat diese Skala: sie ist so klein, daß man sie in der Westentasche mit sich tragen und bei Aufnahmen als Kontrolle auf die Platte legen kann. Aber gerade bei der Photographie zeigt sich am deutlichsten der grundsätzliche Fehler dieser Skalen: Bestrahlt man eine photographische Platte, auf welcher eine Beez'sche Skala liegt, so werden auf der entwickelten Platte allerdings um so mehr Kreise sichtbar, je härter die Strahlung ist. Es werden aber auch um so mehr Kreise sichtbar, je länger man bestrahlt. Sind also viele Kreise sichtbar geworden, so weiß man nicht, ob dies der Härte der Strahlung oder der Länge der Exposition zu danken ist.

### C. Zweimetallige Härteskalen.

Die zweimetalligen Härteskalen stellen insofern einen Fortschritt dar, als sie auf einem richtigen Grundsatz aufgebaut sind. Es zeigen nämlich verschiedene Substanzen sogenannte selektive Absorption. Das will sagen, daß der Unterschied im Absorptionsvermögen für Strahlen verschiedenen Härtegrades bei den einen Körpern weit stärker ausgeprägt ist, als bei den anderen. Vornehmlich die Elemente der Silbergruppe, d. h. diejenigen, deren Atomgewicht bei 100 liegt, haben die Eigenschaft, daß sie die weichen Strahlen nur wenig stärker absorbieren als die harten.

Wählen wir z. B. eine Strahlung von mittlerem Durchdringungsvermögen und legen wir in deren Weg zwei Schichten aus Aluminium und aus Silber, so können wir deren Dicke so abstimmen, daß beide gleich viel Röntgenstrahlen durchlassen. Ein hinter beiden Schichten angebrachter Leuchtschirm wird dann zwei Felder von gleicher Helligkeit zeigen. Ersetzt man nun die Strahlung durch eine weichere, so wird dieselbe durch das Aluminium stärker absorbiert, als die erste. Durch das Silber aber wird die zweite Strahlung nur wenig stärker absorbiert als die erste. Das Feld hinter der Silberschicht wird also nur wenig dunkler, das Feld hinter der Aluminiumschicht dagegen beträchtlich dunkler erscheinen. Umgekehrt, wenn wir eine härtere Strahlung benutzen: dann wird das Feld hinter dem Aluminium sich wesentlich stärker aufhellen, als hinter dem Silber.

Es folgt hieraus, daß, je härter die Strahlung ist, um so dicker eine Aluminiumschicht sein muß, damit sie gleich viel Röntgenstrahlen absorbiert, wie eine Silberschicht von gegebener Dicke.

#### α. Die Röntgen-Skala.

Röntgen selbst hat bereits in seiner 3. Mitteilung (1897) eine auf diesem Prinzip aufgebaute Härteskala angegeben, nur verwendete er nicht Silber, sondern Platin zum Vergleiche mit Aluminium. Demgegenüber bedeutet also die im folgenden beschriebene Benoist'skala nichts grundsätzlich Neues, wiewohl beim Silber die Verhältnisse ungleich günstiger liegen als beim Platin.

#### β. Die Benoist-Skala.

Die Entdeckung der oben genannten Eigenschaft des Silbers verdanken wir Benoist, und Benoist ist es auch gewesen, welcher sie zuerst (1901) einer Messung des Härtegrades dienstbar gemacht hat. Er hat um ein kreisförmiges Silberblech von 0,11 mm Dicke eine

Reihe von Aluminiumschichten angeordnet, deren Dicken je um 1 mm zunehmen, und hinter dem Ganzen einen Leuchtschirm angebracht. Visiert man mit diesem Instrumente gegen eine leuchtende Röntgenröhre, so findet man rasch dasjenige Feld heraus, welches die gleiche Helligkeit zeigt wie das Mittelfeld, das dem Silberblech entspricht. Die Zahl der betreffenden Millimeter Aluminiumdicke gibt dann den „Härtegrad“ an. So bedeutet z. B. „Benoist 5“ denjenigen Härtegrad, bei welchem eine Strahlung durch 5 mm Aluminium gleich stark absorbiert wird, wie durch 0,11 mm Silber.

γ. Die Benoist-Walter-Skala.

Walter hat dann (1902) die Benoistskala wesentlich verbessert. Aus dem oben erwähnten Grunde der besseren Nuancierung hat er an Stelle der arithmetischen Progression erster Ordnung von 1 zu 1 mm die arithmetische Progression zweiter Ordnung eingeführt, so daß seine Aluminiumschichten 2 mm, 2,4 mm, 3,2 mm, 4,4 mm, 6 mm und 8 mm betragen. Außerdem hat er die gleichen Blend- und Schutzvorrichtungen angebracht, wie sie bei der ursprünglichen Walter-Skala beschrieben wurden. Die durch Walter abgeänderte Benoist-Skala wird heute allgemein als „Benoist-Walter“ bezeichnet.

Für die beiden Skalen nach Benoist und Benoist-Walter sind durchweg die Bezeichnungen B. und B.W. üblich. Auf Grund der angegebenen Aluminiumdicken ergibt sich leicht der Vergleich zwischen den beiden Skalen (Fig. 3).

Millimeter Aluminium	Härtegrad n. Benoist	Härtegrad n. Benoist-Walter
8	8	6
7	7	
6	6	5
5	5	
4	4	4
3	3	3
		2
2	2	1
1	1	

Fig. 3.

δ. Die Wehnelt-Skala.

Eine Verbesserung, über deren Wert heute noch gestritten wird, ist von Wehnelt eingeführt worden. Bei der Wehnelt-Skala ist die Aluminiumtreppe mit stufenweise ansteigender Helligkeit ersetzt durch einen Keil aus Aluminium, welcher vor einer schmalen

Spalte vorübergeführt wird. Der Beobachter sieht durch diese Spalte zwei verschieden helle Vergleichsfelder und er hat dann den Keil mit einer Triebvorrichtung so weit zu verschieben, bis die beiden Vergleichsfelder dieselbe Helligkeit aufweisen. Auch hier ist einer möglichst zweckmäßigen Nuancierung Rechnung getragen, indem die Dicke des Keiles nicht geradlinig wächst, sondern mit zunehmender Dicke rascher zunimmt, wie Fig. 4 zeigt.



Fig. 4.

Kryptoradiometer nach Wehnelt.

Instrument man sicherer arbeitet. Der Eine rühmt beim Kryptoradiometer den Vorzug, daß man nur zwei ganz eng begrenzte Felder zu vergleichen habe und nicht durch andere Felder, die für den Vergleich gar nicht in Betracht kommen, gestört werde, während der Andere gerade in der Möglichkeit, zugleich verschiedene, deutlich getrennte Helligkeiten zu übersehen, ein Mittel erblickt, welches ihm mit größter Sicherheit die Auswahl des richtigen Feldes ergibt.

Die Grade der Wehneltskala werden mit dem Zeichen Wh. bezeichnet.

Selbstverständlich sind alle diese Skalen — Benoist, Benoist-Walter und Wehnelt — rein abiträre Maße. Deshalb hat auch jeder der Erfinder eine andere Skala aufgestellt und die Praktiker müssen sich nun damit plagen, jeweilen die eine Skala in die andere umzurechnen, wenn sie in der Literatur Angaben finden, von welchen die einen nach dieser, die anderen nach einer anderen Skala gemessen sind.

#### d. Elektrische Härteskalen

##### a. Theorie.

Um durchdringungsfähige Röntgenstrahlen zu erzeugen, müssen die Kathodenstrahlen eine große Geschwindigkeit haben. Die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen ist aber um so größer, je höher die elektrische Spannung ist, unter welcher sie entstehen. Die Härte der Röntgenstrahlen geht also mit der elektrischen Spannung des Sekundärkreises parallel.

Ich sage absichtlich nicht, sie sei ihr proportional. Aber sie geht ihr parallel, d. h. je größer die Sekundärspannung, desto höher der Härtegrad der Röntgenstrahlung. Wir sind daher berechtigt, die Sekundärspannung als Maß für den Härtegrad zu verwenden.

Bevor wir aber auf die praktische Verwendung dieses Prinzipes eintreten, müssen wir kurz die Vorgänge im Sekundärkreise besprechen, welche die zeitliche Änderung der Spannung betreffen. Denn wäre die Sekundärspannung eine konstante Größe, so wäre ihre Messung sehr einfach. Dies ist nun aber durchaus nicht der Fall.

Betrachten wir zunächst, was an einem Induktor vorgeht, wenn seine beiden Pole so weit getrennt sind, daß zwischen ihnen kein Funke übergehen kann. Es entsteht dann bei jedem Induktionsstoß eine Spannungsdifferenz zwischen den Sekundärpolen, welche von Null

auf ein Maximum ansteigt und dann wieder auf Null absinkt. Es entspricht dieser Spannungsverlauf der punktierten Linie in Fig. 5.

Wird nun aber zwischen die beiden Sekundärpole des Induktors eine Röntgenröhre eingeschaltet, so verläuft die Sekundärspannung in ganz anderer Weise. Diesen Verlauf stellt die ausgezogene Linie in Fig. 5 dar. Man sieht, daß bis zum Punkte F der Verlauf beider Linien sich deckt. Sobald aber die Spannung eine solche Höhe erreicht, daß der spärliche Gasgehalt der Röhre ionisiert, d. h. leitend gemacht wird, dann beginnt die Elektrizität durch die Röhre zu fließen. Dabei ist wichtig zu wissen, daß ein Gas, wenn es einmal leitend gemacht worden ist, den Strom bei einer weit geringeren Spannung zu leiten vermag, als ursprünglich zu seiner Ionisation nötig war. Diejenige Höhe der Spannung, welche man bei dem Buchstaben F abliest, heißt auch „Funkenpotential“, weil sie dasjenige Potential darstellt, bei welchem der Funke überspringt, d. h. bei welchem die Ionisation eingetreten ist. Weil während der Durchflußzeit die an den Sekundärpolen des Induktors sich anhäufende Elektrizität stets durch die Röhre abfließen kann, bleibt die Spannung ungefähr auf der gleichen Höhe, N, und erst wenn die Induktionswirkung nachläßt, sinkt die Spannung unter denjenigen Schwellenwert, G, welcher gerade noch ausreicht, um die Stromleitung durch die Röhre aufrecht zu erhalten. Von hier an hört die Elektrizität auf, durch die Röhre zu fließen und die beiden Spannungskurven fallen daher wieder in eine zusammen.

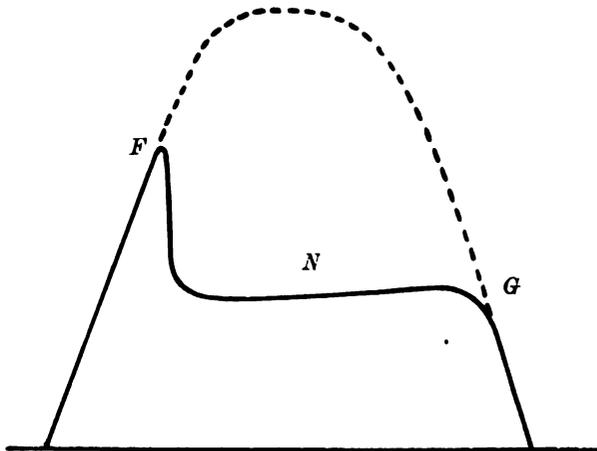


Fig. 5.

Der annähernd horizontale Verlauf der Spannungskurve auf einem mittleren Niveau N zwischen den Punkten F und G bietet uns den Vorteil, daß wir für die Zeit des Stromdurchganges durch die Röhre die Sekundärspannung als eine Konstante ansehen dürfen. Wir werden später noch ausführlich auf diesen Punkt zurückkommen müssen. Wichtig ist aber, schon jetzt festzuhalten, daß diese Spannung, unter welcher der Stromdurchgang durch die Röhre stattfindet, weit unter dem Funkenpotential liegt.

Es ist aber ferner durchaus nicht gleichgültig, wie groß die Sekundärstromstärke sei. Hat sich an den Polen des Induktors eine große Elektrizitätsmenge angehäuft, so wird dieselbe nach erfolgter Ionisierung nicht so rasch abfließen, als wenn nur eine kleine Elektrizitätsmenge da wäre. Es wird daher die Senkung der Kurve bei F keine so tiefe sein, wenn sich große Elektrizitätsmengen zum Durchgang durch die Röhre andrängen. Daraus ergibt sich mit Notwendigkeit, daß bei ein und derselben Röntgenröhre das Niveau N um so höher liegen muß, je größer die an den Sekundärpolen des Induktors angehäuften Elektrizitätsmenge, je größer die Sekundärstromstärke ist.

Zur besseren Erklärung dieser wichtigen Dinge läßt sich eine hübsche Analogie aus der Hydrodynamik anführen. In Fig. 6A stellen M und N zwei Mauern eines Wasserreservoirs dar. In die Mauer M ist eine Holzwand, H, eingelassen. Läßt man in das Reservoir rasch Wasser einfließen, so wird bei einem bestimmten Drucke die Holzwand eingedrückt und das Wasser fällt über die Mauer M nach rechts herunter. Dabei senkt sich sofort der Wasserspiegel, wie dies in Fig. 6B angedeutet ist. Er senkt sich aber um so weniger, je stärker der Zufluß zu dem Reservoir ist. Läßt man dann den Zufluß abnehmen, so hört der Wasseraustritt bei H auf, sobald der Wasserstand in dem Reservoir auf die entsprechende Höhe gesunken ist. Dann steht auch der Aufrichtung einer neuen Holzwand nichts mehr im Wege.

Die Analogie läßt sich in jedem einzelnen Punkte durchführen. Die Wassermenge

im Reservoir entspricht der an den Sekundärpolen des Induktors angehäuften Elektrizitätsmenge. Der Druck, bei welchem die Holzwand bricht, entspricht dem Funkenpotential, die Höhe, aus welcher das Wasser bei H nach rechts herunterfällt, entspricht dem Niveau N der Spannungskurve. Die Höhe der Wand M entspricht dem Schwellenwert der Spannung, G, und

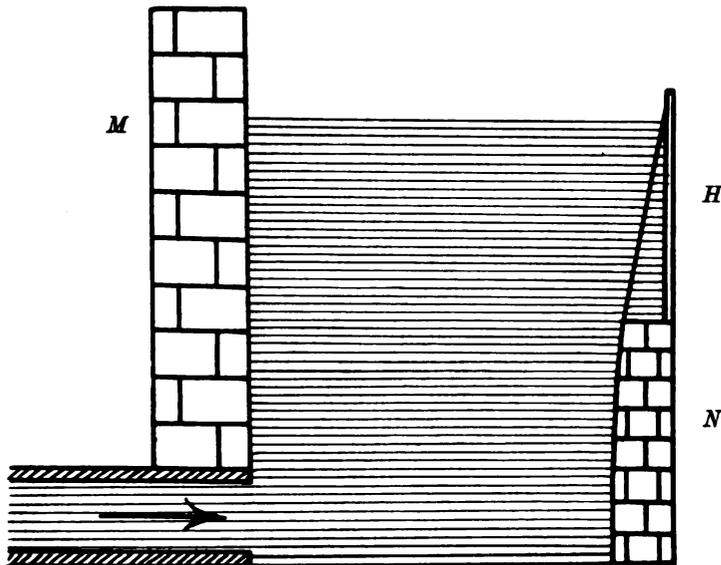


Fig. 6A.

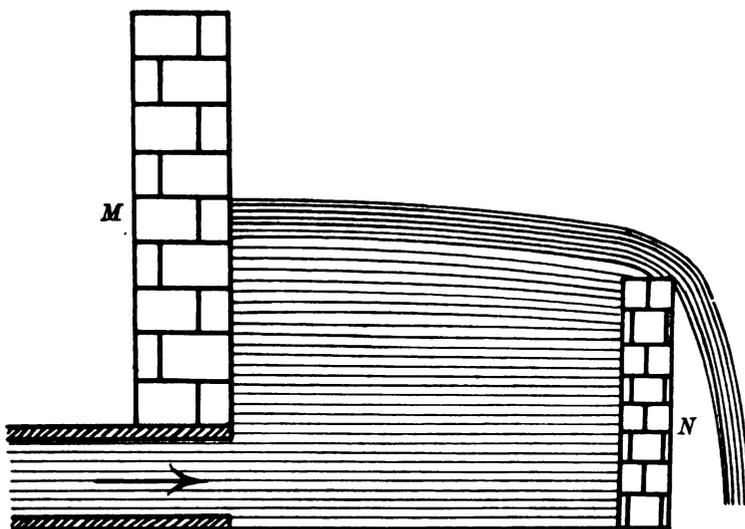


Fig. 6B.

die Wiederaufrichtung der Holzwand H entspricht der Desionisation nach Aufhören des Stromdurchganges. Die Fallhöhe des Wassers bei H ist aber um so größer, je stärker der Wasserzufluß zum Reservoir, je größer also auch der Erguß bei H ist. Dementsprechend ist unter sonst gleichen Verhältnissen das Spannungsniveau N um so höher, je größer die Sekundärstromstärke ist.

Diese Auffassung wird neuerdings gestützt durch die schönen Versuche Walters, welche über die Härteänderungen der Röntgenröhren bei verschiedener Betriebsweise Aufschluß geben. Von besonderem Interesse ist die Feststellung, daß bei gleichem Wert des Strommittels

$$\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i \cdot dt$$

die Stromkurve (nicht Spannungskurve!) mit dem höchsten Gipfel auch den höchsten Härtegrad ergibt.

Dies stimmt vollkommen mit unseren Ausführungen insofern, als bei der höchsten Stromkurve die größte Elektrizitätsmenge sich an der Kathode anstaut und infolgedessen der Abfluß durch die Röhre ein geringeres Sin-

ken der Spannung und somit ein höheres Mittelniveau (N in Fig. 5) erzeugt.

Dies gibt uns die Erklärung einer Erscheinung, welche jederzeit leicht zu beobachten ist. Photographiert man eine zweimetallige Skala, zuerst unter schwacher Belastung und während einer längeren Expositionszeit, und das zweite Mal unter hoher Belastung und mit entsprechend verkürzter Expositionszeit, so zeigt das zweite Bild einen beträchtlich höheren Härtegrad.

Dies ist für die Röntgenphotographie sehr wichtig. Denn den Härtegrad einer Röhre wird man doch stets bei geringer Belastung ausprobieren. Wird dann aber die Röhre für eine

kurzzeitige Exposition hoch belastet, so muß man damit rechnen, daß sie eine Strahlung von beträchtlich höherem Härtegrad abgeben wird, als man bei der schwachen Belastung gefunden hatte.

Ferner geht aus diesen Betrachtungen hervor, daß das Funkenpotential, selbst wenn man es unanfechtbar richtig messen könnte, kein richtiges Maß für den Härtegrad darstellen kann. Denn ob man stark oder schwach belastet, das Funkenpotential muß in beiden Fällen das gleiche sein, indem der Einfluß der größeren oder kleineren Elektrizitätsmenge erst beim Durchgang des Stromes durch die Röhre in Erscheinung tritt, also zu einer Zeit, da das Funkenpotential seine Rolle bereits ausgespielt hat. Trotzdem müssen wir eine Einrichtung kurz beschreiben, welche den Zweck haben soll, das Funkenpotential zu messen.

### β. Die parallele Funkenstrecke.

Die parallele Funkenstrecke, in älteren Publikationen etwa auch „Spintermeter“ genannt, besteht aus einer Spitze und einer Platte, welche einander auf beliebige Entfernung genähert werden können. Die Spitze ist mit dem positiven, die Platte mit dem negativen Sekundärpole des Induktors verbunden. Diese Vorrichtung ist also zur Röntgenröhre parallel geschaltet; daher der Name parallele Funkenstrecke.

Zur Messung der Sekundärspannung und damit des Härtegrades werden, während die Röhre im Betrieb ist, die Spitze und die Platte einander so weit genähert, bis zwischen beiden Funken überspringen, und das Fluoreszenzlicht der Röhre auslischt.

Man sagt sich dann: Sobald der Funke überspringt und die Röhre erlischt, muß der Widerstand der Luftstrecke zwischen Spitze und Platte kleiner geworden sein, als der Widerstand der Röntgenröhre, sonst würde der Funke durch die Röhre und nicht durch die Luftstrecke gehen. An der Grenze, bei welcher der Funkenübergang eintritt, müssen also die beiden Widerstände einander gleich sein. Diejenige Spannung, welche die Luftstrecke von der abgelesenen Länge zu ionisieren vermocht hat, muß also das Funkenpotential sein.

So bestechend diese Argumentation auf den ersten Blick erscheint, so ist sie doch nicht richtig, weil man — wie so oft in den medizinischen Hilfswissenschaften — vergessen hat, daß man statische Betrachtungen selten ungestraft auf dynamische Vorgänge anwenden kann.

So bequem und zuverlässig die Angaben der parallelen Funkenstrecke ein und desselben Apparates bei stets gleicher Einstellung sind, so vollständig unbrauchbar werden sie, wenn man die Frequenz oder die Belastung oder die Länge der Kabel oder die Form der Pole der parallelen Funkenstrecke wechselt, oder gar, wenn man von einem System von Röntgenapparaten zu einem andern übergeht.

Die Angabe der parallelen Funkenstrecke in Publikationen hat daher für den Leser keinerlei Wert, es sei denn, daß über alle obengenannten Details genaue Angaben gemacht werden. Es ergibt sich daraus, daß die parallele Funkenstrecke zur Beurteilung des Härtegrades nur unter stets gleichen Versuchsbedingungen Verwendung finden kann. Dann allerdings hat sie vor all den bisher genannten Härtemeßvorrichtungen den einen großen Vorzug, daß man, hinter der Schutzwand stehend, jederzeit einen Funken übergehen lassen kann, so daß man während therapeutischen Bestrahlungen, wo dies von ganz besonders hervorragender Bedeutung ist, eventuelle Veränderungen des Härtegrades nicht nur rasch entdecken, sondern auch ihrem Betrage nach annähernd abschätzen kann.

### γ. Das Milliampèremeter.

Das Milliampèremeter hat zwar in erster Linie den Zweck, die Stromstärke des Sekundärkreises zu messen, während der Härtegrad nicht direkt mit der Stromstärke, sondern mit der Sekundärspannung zusammenhängt. Dennoch haben wir in den Angaben des Milliampèremeters ein Mittel, um während eines länger dauernden Betriebes die Änderungen des Härtegrades zu beurteilen.

Lassen wir während des Betriebes die Einstellung der ganzen Apparatur unverändert, so können wir voraussetzen, daß auch bei Veränderung des Härtegrades und der damit verbundenen Änderung der Sekundärspannung die im Sekundärkreis umgesetzte elektrische Energiemenge annähernd unverändert geblieben ist. Es ist also in diesem Falle das Produkt aus Sekundärspannung und Sekundärstromstärke unverändert geblieben. Ist dann die Röhre z. B. weicher geworden, so hat die Sekundärspannung um einen bestimmten Betrag abgenommen. In dem gleichen Verhältnis muß aber die Sekundärstromstärke zunehmen, wenn das Produkt aus Spannung und Stromstärke unverändert bleiben soll. Diese Zunahme der Sekundärstromstärke zeigt uns das Milliampèremeter. Entsprechend zeigt das Milliampèremeter eine geringere Stromstärke an, wenn die Sekundärspannung steigt und der Härtegrad höher wird.

Man kann sogar den Betrag der Erhöhung der Sekundärspannung ungefähr abschätzen: denn wenn die Sekundärstromstärke um 20 % zugenommen hat, so muß die Sekundärspannung um 20 % abgenommen haben, soll anders das Produkt aus diesen beiden Größen konstant bleiben. Eine größere Genauigkeit muß aber dieser Methode abgesprochen werden, denn die Konstanz des genannten Produktes ist eben nicht streng erwiesen. Es könnte ja bei verändertem Widerstand im Sekundärkreis der Nutzeffekt des Induktors sich verändern. Dies gilt in erhöhtem Maße für die Anlagen, welche mit elektrolytischen Unterbrechern arbeiten, weil durch jede Änderung der Verhältnisse im Sekundärkreis die Frequenz des elektrolytischen Unterbrechers beeinflußt wird.

#### δ. Das Sklerometer nach Klingelfuß.

Nachdem der Versuch einer Bestimmung des Funkenpotentials vermittelt der parallelen Funkenstrecke zu keiner allgemein brauchbaren Lösung geführt hatte, scheint es Klingelfuß gelungen zu sein, diejenige Spannung zu messen, welche dem Niveau N in Fig. 5 entspricht. Damit mißt Klingelfuß die wirksame Spannung, d. h. diejenige Spannung, unter welcher der Stromdurchgang durch die Röhre stattfindet. Es ist gerade diese Feststellung von grundlegender Bedeutung, denn nur diese Spannung hat für alle folgenden Entwicklungen einen Wert.

Wie wir bereits gesehen haben, ist die wirksame Spannung stets niedriger als das Funkenpotential. Und zwar gibt uns die Fig. 5 die Verhältnisse quantitativ nicht richtig wieder; sie ist nur eine schematische Zeichnung. In Wirklichkeit ist der Unterschied zwischen dem Funkenpotential und der wirksamen Spannung weit größer, wie sich aus den Messungen von Klingelfuß ergibt.

Wer die Klingelfußschen Schriften liest, stößt dort wiederholt auf den Ausdruck „Spannung der gedämpften Welle“ und „Spannung der ungedämpften Welle“. Diese Bezeichnungen beziehen sich auf Vorgänge beim Funkenübergang, wobei die Potentialschwankungen an den Sekundärpolen des Induktors in zwei Komponenten zerlegt werden können, von welchen die eine nur schwach, die andere dagegen stark gedämpft ist. Näher auf diese Details einzugehen, hätte hier keinen Zweck. Es genüge zu erwähnen, daß die Spannung der nach Klingelfuß sogenannten „ungedämpften“, in Wirklichkeit schwach gedämpften Welle dem Funkenpotential, die Spannung der gedämpften Welle dagegen dem Niveau N in unserer Fig. 5, also der wirksamen Spannung entspricht<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Streng genommen hat es überhaupt keinen Sinn, bei dem Stromdurchgang durch eine Röntgenröhre von „gedämpften“ und „ungedämpften Wellen“ zu reden. Nur solange die Röhre ausgeschaltet ist, und die Funken zwischen den Polen des Induktors überspringen, verläuft die Sekundärspannung unter dem Bild einer zusammengesetzten Welle, bestehend aus einer stark gedämpften und einer schwach gedämpften Komponente. Sobald aber die Röhre eingeschaltet ist, fällt dies dahin, denn von nun an hat die Spannungskurve die Form, welche Fig. 5 schematisch wiedergibt, ohne daß man darin zwei verschieden gedämpfte Wellen nachweisen könnte. Spricht man aber von „Funkenpotential“ und von „wirksamer Spannung“, so weiß nach dem Vorausgehenden jeder Leser, was gemeint ist.

Für den Zusammenhang zwischen dem Funkenpotential und der wirksamen Spannung ergibt sich aus den Klingelfußschen Messungen folgende Tabelle:

Funkenpotential	89 000	133 000	178 000	222 000	267 000 Volt
Wirksame Spannung	13 600	220 000	24 500	30 600	36 200 Volt
Quotient	7	6,7	7,2	7,2	7,5
Härtegrad	5	6,2	6,8	7,8	8,2 Benoist.

Man sieht, daß bei der von Klingelfuß getroffenen Disposition das Funkenpotential durchweg ca. siebenmal größer ist als die wirksame Spannung.

Weil nun einer bestimmten Sekundärspannung ein bestimmter Härtegrad entspricht — Klingelfuß hat dies mittelst der Benoistskala nachgewiesen — ist der Autor berechtigt, seinem Instrument den Namen Sklerometer (*σκληρός*, hart) zu geben.

Das Prinzip der Messung beruht darauf, daß um den Induktor eine kleine Anzahl Windungen aus dünnem Draht geführt werden, aber nur in der Mitte zwischen den Sekundärpolen. Die Spannungen, welche an den Enden dieser Wicklung entstehen, hängen natürlich von deren Anzahl ab. Aber bei Änderungen der wirksamen Spannung an den Induktorpolen ändert sich die Spannung an den Meßpolen im gleichen Verhältnis, da ja die induzierte Spannung stets der gleichen Anzahl Windungen proportional ist.

Die Hauptsache an der Einrichtung ist aber, daß die hohe Spannung des Funkenpotentials nicht auf die Meßvorrichtung übergeht, wie Klingelfuß durch einen hübschen Versuch demonstriert hat. Da die Spannungen der Funkenpotentials stets weit höher sind als die wirksamen Spannungen, so entstehen an den Stellen, wo diese Spannungen auftreten, Büschelentladungen, welche im verdunkelten Raume deutlich zu sehen sind.

Läßt man nun bei einem Induktor einige Windungen in der Mitte und an den Enden frei, so sieht man die Büschelentladungen stets nur an den Polen und an den Windungen an den Enden der Spule, nicht aber an den in der Mitte gelegenen Windungen auftreten.

Fußend auf diesem Versuchsergebnis verbindet Klingelfuß die Enden der Meßwindungen mit einem Elektrometer, dessen Angaben ihm eine der wirksamen Sekundärspannung proportionale Größe liefern.

Dabei ist allerdings zu bedauern, daß das Sklerometer nicht direkt in Volt geeicht ist, was ja ein Leichtes sein muß, wenn die Angaben des Sklerometers der wirksamen Spannung proportional sind. Anstatt dessen weist das Instrument eine arbiträre Skala auf, die nun merkwürdigerweise von Klingelfuß doch wieder als „absolut“ bezeichnet wird, wenn er von einer „Dosierung in absoluten Einheiten“ spricht.

Allerdings kann man den absoluten Wert der wirksamen Sekundärspannung jederzeit berechnen, indem man den Klingelfußschen Skalenwert mit 226 Volt multipliziert. Bezeichnet man also nach Klingelfuß mit  $H$  die Skalenzahl des Sklerometers, so ist die wirksame Sekundärspannung

$$s = H \cdot 226 \text{ Volt.} \quad (4)$$

#### ε. Das elektrostatische Voltmeter nach Bergonié.

Das Instrument von Bergonié (1907) beruht auf einem ähnlichen Gedanken wie das Sklerometer, insofern auch hier die Sekundärspannung als Maß für den Härtegrad gebraucht wird. In der folgenden Tabelle habe ich nicht nur den Zusammenhang zwischen den Härtegraden und den Spannungen, wie sie das Bergoniésche Instrument gibt, sondern zugleich noch die Sklerometerzahlen und die entsprechenden Werte des Funkenpotentials aufgestellt.

Härtegrad	2	3	4	5	6	7 Benoist
Funkenpotential				89 000	126 000	189 000 Volt
Sekundärspannung nach Bergonié	12 000	20 000	25 000	30 000	35 000	42 000 Volt
Sekundärspannung nach Klingelfuß	7 700	8 800	10 400	13 600	19 000	26 000 Volt
Quotient	1,62	2,27	2,40	2,21	1,84	1,62

Hieraus ergibt sich folgendes: Liefert das Sklerometer wirklich die wirksame Spannung, so gibt das Voltmeter nach Bergonié nicht die wirksame Spannung, sondern einen  $1\frac{1}{2}$  bis  $2\frac{1}{2}$  mal höhern Wert. Es gibt aber auch nicht das Funkenpotential, denn dieses hat einen noch weit höhern Wert.

Die Angaben zeigen aber nicht einmal relative Übereinstimmung. Denn wenn wir z. B. die Härtegrade 4 und 7 Benoist vergleichen, so ist die Spannung für den höhern Grad 2,5 mal größer, wenn wir nach Klingelfuß messen, und 1,7 mal größer, wenn wir nach Bergonié messen. Bei so großen Abweichungen kann selbstverständlich höchstens eines der beiden Instrumente richtig zeigen. Daß der Fehler eher an dem Bergoniéschen Instrumente liegen dürfte, scheint mir aus den folgenden Bemerkungen Walters hervorzugehen: Nach Ansicht des Referenten muß jedoch der Verfasser . . . erst noch den Nachweis führen, daß die Angaben des Instrumentes auch von der Zahl der Unterbrechungen des Stromes unabhängig sind, Bedingungen, die vom Verfasser nicht berücksichtigt wurden, und die auch von den in Frage kommenden Instrumenten nach Angaben der fabrizierenden Firma selbst nicht erfüllt werden, so daß daher die Methoden des Verfassers schwerlich auf allgemeine Einführung rechnen können.“ (Fortschritte a. d. G. d. Rtg. XI. p. 71). Zwei andere Wahrnehmungen dagegen, welche wir auf S. 57 und 154 ff. besprechen werden, lassen eher einen Fehler beim Sklerometer vermuten.

#### §. Das Qualimeter nach Bauer.

Das Prinzip des von Bauer erfundenen Qualimeters (1909) beruht auf der Messung des Potentialabfalles innerhalb eines Kondensators. Das Instrument ist ein Horizontalelektrometer mit Magnetdämpfung, und zwar unipolar, so daß es an irgend einem stromführenden Teile aufgehängt werden kann. Durch diese Aufhängung ist dann auch die horizontale Lage gesichert. Nach der Vorschrift Bauers soll das Qualimeter an der Kathode angebracht werden.

Aus den Versuchen des Erfinders ergab sich, daß bei Verwendung verschiedener Röntgenapparate eine für die Praxis genügende Übereinstimmung erreicht wurde.

Was man in erster Linie an den Bauerschen Qualimeter tadeln muß, ist die grundsätzlich falsche Konstruktion seiner Skala. Nicht nur das Auftauchen einer neuen Teilung (wir hatten bereits die Einteilungen nach Walter, Beez, Benoist-Walter und Wehnelt) ist eine unnötige Komplikation, sondern es ist hauptsächlich das Teilungsprinzip unrichtig. Ich zitiere wörtlich nach Bauer:

„ . . . jeder Grad bedeutet ein zehntel Millimeter Bleiblech, so daß bei einer Stellung des Zeigers beispielsweise auf vier der Ausschlag besagt, daß die von der Röhre ausgesandten Strahlen bei vier zehntel Millimeter Bleiblech absorbiert sind.“

Es gibt nun aber bekanntlich keine bestimmte Dicke eines Materiales, welche eine gegebene Strahlung vollständig absorbiert, während eine etwas geringere Dicke dies noch nicht tut. Mit zunehmender Dicke der absorbierenden Schicht wird die durchtretende Strahlenmenge stets kleiner. Gleich Null wird sie aber erst, wenn die Schicht unendlich dick geworden ist. Durch Schichten von endlicher Dicke geht stets eine kleine Strahlenmenge durch, wenn wir sie auch nicht mehr nachzuweisen vermögen.

Natürlich gibt es einen Punkt, bei welchem die durchgehende Strahlenmenge so gering geworden ist, daß wir sie eben nicht mehr nachweisen können. Auf diese Grenze hat nun Bauer sein Kriterium abgestellt. Diese Grenze hängt aber nicht nur von der Strahlenqualität, sondern auch von der Belastung der Röhre, d. h. von der Intensität der Strahlung ab.

Wir haben diese Tatsache schon in der Einleitung ausführlich besprochen; weil sie aber immer wieder vergessen wird, so mag sie noch in exakter Form dargestellt werden.

Nennen wir  $F^*$  diejenige Fluoreszenzhelligkeit, welche gerade an der Grenze der Wahr-

nehmbarkeit liegt, ferner  $F$  diejenige Fluoreszenzhelligkeit, welche man wahrnehmen würde, wenn keine Bleiplatte zwischen Röhre und Schirm liegen würde, und  $b$  die Halbwertschicht der Strahlung im Blei, und wählt man nach Bauer diejenige Bleidicke,  $p$ , welche die Fluoreszenzhelligkeit  $F$  gerade auf den Grenzwert  $F^*$  bringt, so muß gelten

$$p = b \cdot \frac{\log(F) - \log(F^*)}{\log(2)} \quad (5)$$

Aus dieser Gleichung ersieht man ohne weiteres, daß die Dicke des Bleibleches, welches die Helligkeit  $F$  auf  $F^*$  reduziert, nicht nur von der Durchdringungsfähigkeit (Halbwertschicht  $b$ ) abhängt, sondern auch von der Fluoreszenzhelligkeit ( $F$ ), welche ohne vorgeschaltetes Bleiblech vorhanden wäre, also mit andern Worten von der Belastung der Röhre.

Wenn man also die Eichung des Qualimeters nach Bauers Vorschrift mit Bleiblechen verschiedener Dicke vornimmt, so erhält man völlig verschiedene Resultate, je nach der Fokaldistanz (weil  $F$  wächst, wenn die Fokaldistanz abnimmt) und je nach der Belastung (weil  $F$  wächst, wenn die Belastung zunimmt).

Dies ist eines der Beispiele von Verquickung der Einflüsse von Intensität und Härtegrad, worauf ich bereits ausführlich eingetreten bin. Es ist aber sehr nötig, auf diese äußerst wichtige Tatsache bei jeder Gelegenheit wieder hinzuweisen, wenn selbst hervorragende Konstrukteure, wie Bauer, sie übersehen.

Walter hat mit dem Bauerschen Qualimeter ausführliche Versuche angestellt und dabei nachgewiesen, daß man bei verschiedener Betriebsweise nicht nur verschiedene absolute Werte erhält, sondern daß auch die relativen Beträge von Härteänderungen verschieden angezeigt werden. Allerdings, wenn man sich mit relativen Angaben begnügt, d. h. so lange es sich nur darum handelt, festzustellen, ob — und allenfalls noch ungefähr um wie viel — die Röhre während des Betriebes weicher oder härter geworden ist, dann liefert das Qualimeter Angaben, welche für die Bedürfnisse des Röntgenlaboratoriums genügen, und zwar stets bei Verwendung von Induktoren, bei Hochspannungsgleichrichtern dagegen nur für Strahlen mittlern und hohen Härtegrades. Für weiche Strahlen versagt das Qualimeter bei den Hochspannungsgleichrichtern.

Ferner ergibt sich aus Walters Versuchen, daß das Qualimeter um so kleinere Werte anzeigt, je näher es an dem negativen Leitungsdraht angebracht wird. Eine Entfernung von mindestens 85 cm ist unbedingt erforderlich.

Wichtig ist außerdem die Feststellung, daß die Angaben des Qualimeters in hohem Masse von der Belastung abhängig sind, auch wenn der Härtegrad unverändert bleibt. In Wirklichkeit steigt ja stets der Härtegrad bei zunehmender Belastung. Das Qualimeter aber steigt unverhältnismäßig viel stärker. Dies ist ein weiterer Grund, um dem Qualimeter den Wert eines absoluten Instrumentes abzuspochen.

Dementsprechend hat die Aufnahme der Bauerskala in die Vergleichstabelle auf S. 33 in Fig. 10 und in das Schema Tafel II wenig Wert. Sie erfolgte nur der Vollständigkeit halber, gestützt auf die Angaben ihres Erfinders, dem auch die Verantwortlichkeit für deren Richtigkeit überlassen werden muß.

#### e. Absolute Härtemessung.

##### α. Theorie.

„Härte“ und „Durchdringungsfähigkeit“ sind nicht genau gleichbedeutend. Eine gegebene Strahlung hat einen bestimmten Härtegrad. Sie hat aber für verschiedene Substanzen verschiedenes Durchdringungsvermögen. Für unsere praktischen Zwecke ist es in erster Linie notwendig, daß wir das Durchdringungsvermögen einer Strahlung für diejenigen Substanzen kennen, welche bei unsern Arbeiten von Röntgenstrahlen durchdrungen werden. Dies sind

wohl beinahe ausnahmslos menschliche oder tierische Körperteile, und zwar kommt es dabei vorwiegend auf die Durchdringungsfähigkeit der Strahlen gegenüber den Weichteilen an.

Nun bestehen ja unsere Körperteile zum weitaus größten Teile aus Wasser, und wenn wir die verschiedenen Gewebe auf ihr Absorptionsvermögen gegenüber Röntgenstrahlen untersuchen, so finden wir in der Tat, daß sie in dieser Eigenschaft dem Wasser sehr nahe stehen. Die Haut absorbiert etwas stärker, das Fettgewebe etwas weniger als das Wasser.

Erinnert man sich überdies, daß sowieso in der Physik bei der Festsetzung von Masseinheiten in der Regel das destillierte Wasser als Vergleichssubstanz gewählt wird, so kann kaum ein Zweifel bestehen, daß wir auch für die Messung der Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlen keine passendere Substanz als das destillierte Wasser wählen können.

Wir haben ferner bereits darauf hingewiesen, daß eine korrekte Messung der Durchdringungsfähigkeit von der Intensität (Belastung der Röhre) unabhängig sein müsse, und im Anschluß daran haben wir nachgewiesen, daß sich hierzu der Begriff der Halbwertschicht eignet. Er eignet sich besser als der Absorptionskoeffizient, weil mit der Halbwertschicht, die man in Zentimetern messen kann, sich leicht eine konkrete Vorstellung verknüpft, während man von einem Absorptionskoeffizienten, welcher die Dimension einer reziproken Länge hat, sich nicht so leicht einen Begriff machen kann.

Nun ist natürlich die Halbwertschicht einer Strahlung in Blei kleiner als in Wasser und in Wasser kleiner als in Luft usw. Deshalb müssen wir zur Definition der Härtegrade nach Halbwertschichten eine bestimmte Normalsubstanz haben, und als solche wurde aus den oben genannten Gründen das destillierte Wasser gewählt.

Dadurch haben wir nicht nur ein absolutes Maß bekommen. Es wird außerdem die Namengebung präzisiert. Wir setzen einfach die Dicke der Halbwertschicht als Vorsilbe: Sprechen wir also von einer 6-mm-Strahlung, so verstehen wir darunter eine Strahlung von solchem Härtegrad, dass ein Weg von 6 mm durch destilliertes Wasser genügt, um von der Strahlung die Hälfte zu absorbieren und die Hälfte durchzulassen. Gerade wie ein 6-mm-Geschoß einen Durchmesser von 6 mm hat, so hat eine 6-mm-Strahlung eine Halbwertschicht von 6 mm.

#### β. Das Radiosklerometer nach Villard.

Villard hat seinen absoluten Härtemesser (1908) auf folgendem Prinzip konstruiert: Der Zeiger des Instrumentes steht mit der Nadel eines Quadrantelektrometers in Verbindung, die ihrerseits mit dem mittlern Blatte eines Doppelluftkondensators verbunden ist, der aus drei dünnen, einander gleichen und parallelen Metallblättern besteht, und dessen beide äußern Blätter mit den Quadranten des Elektrometers und den Polen einer Elektrizitätsquelle (z. B. eines Gleichstromnetzes) verbunden sind. Wenn dann die Röntgenstrahlen diese Blätter senkrecht durchsetzen, so wird die Luft in den beiden Räumen zu beiden Seiten des mittlern Blattes verschieden stark ionisiert, und zwar in einem Verhältnis, welches nur von der Durchlässigkeit dieses Blattes abhängt. Verschiedene Erzeugungsart der Strahlen, auch verschiedene Intensität derselben soll nur die Raschheit der Einstellung, nicht aber deren definitiven Stand beeinflussen. Die Feinheit und Genauigkeit soll diejenige der Benoistskala weit übertreffen.

Selbstverständlich muß das Instrument in den Strahlenkegel gebracht und senkrecht zu der Strahlenrichtung orientiert werden. Es gibt dann die Durchdringungsfähigkeit der Strahlung für dasjenige Material an, aus welchem das genannte Mittelblatt besteht. Nimmt man hierzu irgendein Metall, so muß natürlich eine Tabelle zur Umrechnung auf destilliertes Wasser beigelegt werden. Auch gibt das Instrument, weil es auf eine konstante Schichtdicke eingestellt ist, nicht die Halbwertschicht, sondern den Absorptionskoeffizienten.

Unrichtig ist es jedenfalls, den Villardschen Apparat als ein „Differentialinstrument“ zu bezeichnen, wie dies mitunter geschieht. Folgende Überlegung wird dies klar machen:

Wir bezeichnen die Intensität der Strahlen in der vordern Kammer des Apparates

mit  $I_1$  und in der hintern mit  $I_2$ . Ferner sei  $x$  die Dicke des Mittelblattes und  $b$  die Halbwertschicht der Strahlung in dem Material des Mittelblattes. Dann ist

$$I_1 = I_2 \cdot e^{\frac{x}{b}}. \quad (6)$$

Ein Differentialinstrument würde nun die Differenz

$$I_1 - I_2 = I_2 (e^{\frac{x}{b}} - 1) \quad (6^*)$$

anzeigen, also eine Größe, die sicherlich nicht von der Intensität abhängig wäre. Tatsächlich mißt aber das Villardsche Instrument eine von dem Quotienten

$$\frac{I_1}{I_2} = e^{\frac{x}{b}} \quad (6^{**})$$

abhängige, also von der einfallenden Intensität unabhängigen Wert, wie im folgenden gezeigt werden soll.

Die beiden äußern Blätter des Instrumentes werden auf den konstanten Spannungen  $A$  und  $B$  gehalten. Werden durch die Röntgenstrahlen die Luftkammern zu beiden Seiten des Mittelblattes ionisiert, so entsteht ein Strom durch die beiden Lufträume, welcher, nachdem sich ein stationärer Zustand eingestellt hat, das Mittelblatt auf die Spannung  $V$  bringt, für die folgende Bedingung gelten muß

$$A - V : V - B = w_2 : w_1, \quad (7)$$

nach dem Prinzip der Wheatstoneschen Brücke. Sieht man von der Sekundärstrahlenbildung im Mittelblatt ab, so verhalten sich die Widerstände umgekehrt wie die Intensitäten in den beiden Luftkammern, also:

$$w_2 : w_1 = I_1 : I_2 = e^{\frac{x}{b}}. \quad (7^*)$$

Die Spannung,  $V$ , angezeigt durch die Nadel des Villardschen Instrumentes, hat also nach den Gleichungen (7) und (7\*) den Wert

$$V = \frac{A \cdot e^{\frac{x}{b}} + B}{e^{\frac{x}{b}} + 1}. \quad (8)$$

Aus dieser Gleichung ersieht man zunächst, daß für die weichsten Strahlen, die das Mittelblatt kaum zu durchsetzen vermögen, d. h. deren Halbwertschicht im Mittelblatt sehr klein ist, der Exponent von  $e$ , und damit auch die Potenz selbst sehr groß wird. Dann nähert sich die Spannung dem Wert

$$V = A.$$

Ist im Gegenteil die Strahlung sehr hart, so daß ihre Halbwertschicht  $b$  sehr groß

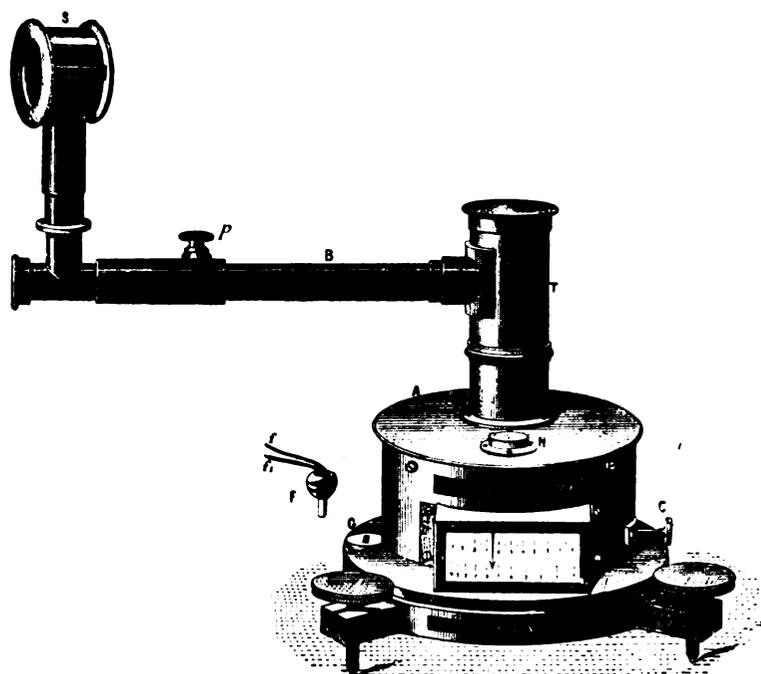


Fig. 7.  
Radiosklerometer nach Villard.

wird, dann wird der Exponent von  $e$  sehr klein, die Potenz nähert sich dem Werte 1 und die Spannung dem Wert

$$V = \frac{A+B}{2}.$$

Zwischen diesen beiden Werten bewegt sich die Nadel des Instrumentes für alle zwischen diesen Extremen liegenden Härtegrade.

Endlich kann aber auch aus der Spannung,  $V$ , die Halbwertschicht der Strahlung für das Material des Mittelblattes berechnen: Es wird nämlich aus Gleichung (8)

$$b = \frac{x}{\log \frac{A-V}{V-B}} \quad (8^*)$$

Das Villardsche Instrument muß sich also direkt nach Halbwertschichten für das Material des Mittelblattes eichen lassen. Leider läßt es sich nicht leicht ausdenken, wie hierfür ein Material zu gewinnen wäre, welches gleichzeitig ein guter Leiter für Elektrizität wäre und dabei die gleichen Halbwertschichten hätte wie das Wasser.

### γ. Der absolute Härtemesser nach Christen.

Die Abweichung der Absorptionsfähigkeit der menschlichen und tierischen Gewebe für Röntgenstrahlen von derjenigen des Wassers ist so gering, daß wir sie neben andern Fehlerquellen ruhig vernachlässigen können. Wir bestimmen deshalb die Absorptionsfähigkeit des Wassers für Röntgenstrahlen, oder, was dasselbe ist, wir messen das Durchdringungsvermögen der Röntgenstrahlen für Wasser.

Weil man nun aber mit Wasser nicht bequem hantieren kann, so wurde als Testmaterial eine feste Substanz ausgewählt, welche sich gegenüber Röntgenstrahlen gleich verhält

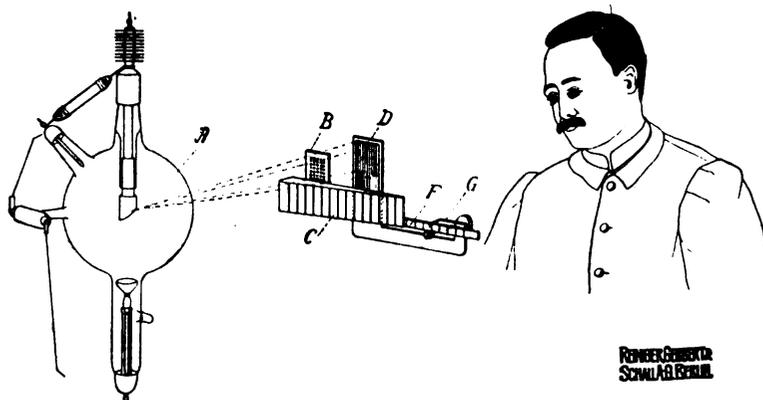


Fig. 8.

Schematische Darstellung der Messung der Halbwertschicht.

A Röntgenröhre, B Halbwertscheibe, C Bakelitstufe, D Leuchtschirm,  
F Skala, G Zeiger.

wie das destillierte Wasser. Am geeignetsten hierfür hat sich der Bakelit erwiesen. Sein Absorptionsvermögen für Röntgenstrahlen stimmt mit demjenigen des destillierten Wassers so gut überein, daß ein Bakelitstück, in destilliertes Wasser eingelegt und über einer photographischen Platte bestrahlt, auf der entwickelten Platte seine Form entweder gar nicht oder nur ganz schwach erkennen läßt. Dies ist ein außerordentliches feines Kontrollverfahren, welches wir Perthes verdanken. Es können damit schon ganz leichte Dichtigkeitsunterschiede, wie z. B. Eis gegen Wasser, deutlich zur Anschauung gebracht werden.

Es geht hieraus hervor, daß alle Messungen von Absorptionsgrößen, welche am Bakelit gewonnen werden, ohne weiteres auf das destillierte Wasser übertragbar sind.

Um nun im einzelnen Falle festzustellen, wie dick eine Bakelitschicht sein muß, damit

sie von einer gegebenen Strahlung gerade die Hälfte wegnimmt, müssen wir eine Vorrichtung haben, welche uns gestattet, von jeder Strahlung — unabhängig von deren Härtegrad — stets die Hälfte wegzunehmen. Dies wird am besten erreicht, mit einer Scheibe aus undurchlässigem Material, in welcher viele kleine Löcher regelmäßig verteilt sind. Das Verhältnis der Durchmesser dieser Löcher zu den Abständen ihrer Mittelpunkte muß so berechnet sein, daß die Summe der Flächen aller Löcher gleich ist der Gesamtfläche des stehengebliebenen Scheibenmaterials.

Bringt man diese Scheibe in etwelcher Entfernung von einem Leuchtschirm an, so erkennt man auf demselben nicht die Bilder der einzelnen Löcher, sondern eine gleichmäßige Helligkeit, welche der halben Intensität der Strahlung entspricht. Man sieht auch ohne weiteres ein, daß durch diese Einrichtung jede Strahlung, ob hart oder weich, stets auf die Hälfte ihrer Intensität reduziert wird.

Und nun braucht man nur noch Bakelitstücke von verschiedener Dicke neben diese „Halbwertscheibe“ zu setzen und unter ihnen dasjenige auszusuchen, welches auf dem Schirm die gleiche Helligkeit erzeugt, wie die Halbwertscheibe. Dann wissen wir, daß die ausgesuchte Bakelitschichtdicke die gegebene Strahlung auf die Hälfte ihrer Intensität reduziert hat, sie ist also gleich der Halbwertschicht der Strahlung für Bakelit, und somit auch für destilliertes Wasser.

Wichtig ist dabei, gleich wie bei dem Villardschen Instrument, daß die Orientierung richtig sei. Denn wenn die Strahlen nicht genau in die Axenrichtung der Löcher fallen, so dringt zu wenig Röntgenlicht durch die Halbwertscheibe, es erscheint deren Bild zu dunkel und wir finden dann einen zu hohen Härtegrad. Nun befindet sich aber, wie schon erwähnt, die Halbwertscheibe nicht in unmittelbarer Nähe des Leuchtschirmes. Wenn also das Instrument schief gehalten wird, so müssen sich die Schatten der Halbwertscheibe und des Bakelites entweder teilweise überdecken, oder es wird zwischen den beiden ein freier Raum offen bleiben. Man wird also das Instrument so halten müssen, daß zwischen den beiden Vergleichsfeldern weder ein heller noch ein dunkler Streifen auftritt. Dies wird erreicht durch kleine Drehbewegungen um die horizontale Achse des Instrumentes. Bei Drehungen des Instrumentes um seine vertikale Achse verschmälern sich die beiden Vergleichsfelder in horizontaler Richtung. Auch dadurch wird natürlich der gleiche Fehler hervorgerufen. Man muß also gleichzeitig darauf achten, daß die Vergleichsfelder in ihrer größtmöglichen Breite erscheinen. Diese Einstellung wird nach einiger Übung in kürzester Zeit ganz automatisch vorgenommen.

Um das Aufsuchen derjenigen Bakelitdicke, welche die Strahlung halbiert, möglichst zu erleichtern, ist der Bakelit in Form einer Treppe angeordnet, welche vermitteltst Zahntrieb an der Halbwertscheibe vorbeigeführt werden kann. Dabei ist, wie bei der Wehneltskala, eine kleine Spalte herausgeblendet, so daß man durch keine andern Helligkeiten abgelenkt oder sonst gestört wird, sondern gerade nur die beiden Vergleichsfelder vor Augen hat, die nun mit Hilfe des Zahntriebes auf gleiche Helligkeit zu bringen sind. Da der Farbenton der beiden Felder genau der gleiche ist, so gestaltet sich der Vergleich sehr genau und sicher. Auch die Abblendung des Tageslichtes wird in der gleichen Weise vollzogen, wie bei dem Wehneltschen Instrument.

Die verschiedenen Bakelitschichten sind in Form einer Treppe angeordnet mit Stufen von 0,2, 0,4 usw. bis 3,0 cm Höhe. Damit geht der Härtemesser weit über diejenigen Härtegrade hinaus, welche für die Photographie Verwendung finden. Schon eine 2,0-cm-Strahlung kann direkt nur unter Gefährdung der Röhre (Durchschlagen) erhalten werden. Dagegen sind, bei Verwendung eines

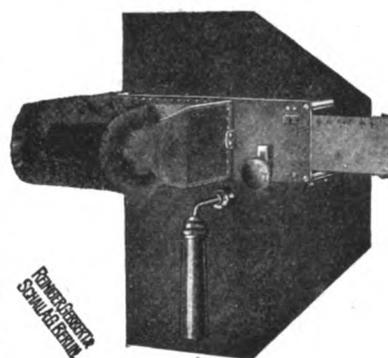


Fig. 9.

Absoluter Härtemesser nach Christen.

Aluminiumtransformators („Filters“) noch höhere Härtegrade erhältlich welche dann an den höchsten Stufen des Apparates gemessen werden.

#### f. Messung der gehärteten Strahlen.

Haben wir in den vorhergehenden Abschnitten mehrmals die Tatsache erwähnen müssen, daß eine Röntgenstrahlung beim Durchgang durch ein absorbierendes Medium gehärtet wird, so müssen wir noch untersuchen, ob dadurch nicht gewisse Fehler in unsern Härtemessungen entstehen.

Auch wenn wir es einstweilen unentschieden lassen, ob die Härtung mehr ein Filtrationsvorgang sei oder mehr auf Beimischung von harten Sekundärstrahlen beruhe, oder noch anderer Erklärung bedarf, so bleibt immerhin die Tatsache bestehen, daß in den absorbierenden Medien Sekundärstrahlen entstehen und den primären Röntgenstrahlen beigemischt werden. Gleichzeitig müssen wir das Gesetz berücksichtigen, welches aussagt, daß die Sekundärstrahlen stets für dasjenige Material, in welchem sie entstehen, ein besonders großes Durchdringungsvermögen haben, oder mit andern Worten, daß die Sekundärstrahlen von demjenigen Medium, in welchem sie entstehen, ganz besonders schwach absorbiert werden.

Die richtige Würdigung dieser Tatsache erklärt uns manche Beobachtungen, welche sich an die zufällige Verwendung von Aluminium und Silber als „Filter“ angeschlossen haben. Es sind dies ja gerade die beiden Metalle, aus denen auch unsere zweimetallinen Härteskalen hergestellt sind. Gerade hier zeigt es sich aber, wie wenig geeignet die Metalle sind, wo es sich um Beurteilung der Durchdringungsfähigkeit einer Strahlung gegenüber Wasser, bzw. Körpergeweben handelt.

Am deutlichsten zeigt sich dies bei dem Silber: Die Sekundärstrahlen des Silbers sind weich, d. h. sie haben für die Körpergewebe ein geringes Durchdringungsvermögen. Sie sind aber dem Silber gegenüber hart, denn sie haben für Silber ein ausgezeichnetes Durchdringungsvermögen.

Legt man ferner über eine zweimetallige Härteskala ein Silberblech, so entstehen in demselben Silbersekundärstrahlen. Diese dringen mit großer Leichtigkeit durch das Silber der Härteskala und erhellen deshalb das entsprechende Feld auf dem Leuchtschirm beträchtlich mehr, als die Primärstrahlung, welche durch die gleiche Silberdicke der Skala gedungen ist. Dadurch erscheint das Silberfeld der Skala so hell, daß es einem niedrigen Aluminiumfeld der Vergleichungsschicht entspricht und deshalb findet man mit einer zweimetallinen Härteskala so bedeutende Erniedrigungen des Härtegrades als Folge von „Filtrierung“ durch Silber.

Führt man das Kontrollexperiment mit dem absoluten Härtemesser aus, so ist von einer solchen Erniedrigung des Härtegrades keine Rede. Ob überhaupt eine Erniedrigung besteht, habe ich bisher nicht mit Sicherheit entscheiden können.

Das zurzeit gebräuchlichste Härtungsmittel ist das Aluminium. Schalten wir vor die Röhre eine Aluminiumschicht, so entstehen in derselben um so mehr Sekundärstrahlen, je dicker sie ist. Es nimmt mit steigender Aluminiumdicke aber auch der Härtegrad zu. Messen wir diese Zunahme mit einer zweimetallinen Härteskala, so finden wir stets wachsende Werte der Härte, je dickere Schichten wir vorschalten. Führen wir das gleiche Experiment mit dem absoluten Härtemesser aus, so stellen wir ein merklich geringeres Anwachsen des Härtegrades fest. Woher kommt diese Diskrepanz?

Die Erklärung scheint mir einfach: Je dicker die Aluminiumschicht ist, um so mehr Sekundärstrahlen gehen von ihr aus, und diese durchdringen die Aluminiumschichten der zweimetallinen Härteskala gauz besonders leicht, so daß die entsprechenden Felder besonders hell erscheinen. Dadurch wird ein höherer Härtegrad vorgetäuscht, als in Wirklichkeit besteht, denn wir wollen ja nicht das Durchdringungsvermögen für Aluminium, sondern für Wasser

und Körpergewebe bestimmen. Für diese aber hat das Durchdringungsvermögen eben längst nicht in dem Maße zugenommen, wie für das Aluminium selbst, welches die in Frage kommenden Sekundärstrahlen erzeugt hat.

Daraus ergibt sich, daß für die Beurteilung der Härtung der Röntgenstrahlen durch Aluminium, ebenso wie für die angebliche Erniedrigung des Härtegrades durch Silber, die zweimetalligen Härteskalen nicht verwendet werden dürfen. Nur eine Meßvorrichtung, welche direkt das Absorptionsvermögen der in Betracht kommenden Substanzen mißt, kann richtigen Aufschluß geben.

Mit dem zweitbeliebtesten Härtungsmittel, dem Leder, steht es wieder anders. Die vom Leder ausgehenden Sekundärstrahlen haben wahrscheinlich die gleichen oder doch sehr ähnliche Eigenschaften, wie die von den Körpergeweben ausgehenden. Sie werden also voraussichtlich in den Körpergeweben selbst nur wenig absorbierbar. Gegenüber den zweimetalligen Härteskalen aber kommt von dieser Eigenschaft selbstverständlich nichts zur Geltung. Die mit den Ledersekundärstrahlen vermischte Röntgenstrahlung erscheint also nach dem Urteil der zweimetalligen Härteskalen weicher, als sie für die Körpergewebe tatsächlich sein muß. Immerhin wird dieser Fehler weniger ins Gewicht fallen, als beim Aluminium, weil die Ledersekundärstrahlen nicht so genau mit den Körpersekundärstrahlen übereinstimmen, daß sie das gleich hohe Durchdringungsvermögen für Körpergewebe erreichen, wie die Aluminiumsekundärstrahlen für Aluminium.

### 3. Härtegrad und Sekundärspannung.

Es war bereits mehrfach davon die Rede, daß die Strahlen einer Röntgenröhre um so härter sind, je größer die Spannung an den Polen der Röhre ist. Es erübrigt jetzt nur noch, diese qualitative Feststellung durch eine quantitative Messung zu ergänzen. Wir müssen wissen, welcher Härtegrad einer bestimmten Sekundärspannung entspricht. Natürlich müssen wir uns auch daran erinnern, daß die Sekundärspannung keine Konstante ist, sondern eine äußerst rasch steigende und fallende Größe. Deshalb müssen wir einen ganz bestimmten Wert dieser Spannung als denjenigen bezeichnen, welcher das Objekt unserer künftigen Überlegungen und Messungen werden soll.

Da wir später auf Grund der Härtemessungen die Wirkungen der Röntgenstrahlen beurteilen wollen, so werden wir gut tun, nicht auf das Funkenpotential, sondern auf die wirksame Spannung abzustellen, d. h. auf diejenige Spannung, unter welcher der Strom durch die Röhre fließt. Daß dies eine annähernd konstante Größe ist, geht sowohl aus den Messungen von Klingelfuß hervor, welcher zu jeder Sekundärspannung stets den gleichen Härtegrad findet, als auch aus der Tatsache, daß die Röntgenstrahlung ziemlich homogen ist.

In der folgenden Tabelle sind diejenigen Vergleichswerte zwischen Sekundärspannung und Benoistskala zusammengestellt, welche wir den Messungen von Klingelfuß verdanken. Andererseits sind die Absorptionszahlen, welche den verschiedenen Graden der Benoistskala entsprechen, schon mehrfach bestimmt worden, so daß wir daraus den Zusammenhang zwischen der Sekundärspannung und der Halbwertschicht für destilliertes Wasser entnehmen können.

Wirksame Spannung	7700	8800	10 400	13 600	19 000	26 000	34 000	Volt
Härtegrad	2	3	4	5	6	7	8	Benoist
Halbwertschicht	0,3	0,57	0,64	0,68	0,75	0,83	0,94	cm.

Dieser Zusammenhang ist in Tafel I (obere Kurve) graphisch dargestellt. Es ergibt sich dabei die merkwürdige Wahrnehmung, daß oberhalb 6 mm Halbwertschicht die Zunahme der Halbwertschicht der Zunahme der Sekundärspannung proportional ist, indem die sämtlichen Punkte (außer den beiden ersten) ziemlich genau auf einer geraden Linie liegen.

Nicht etwa ist die Halbwertschicht der Sekundärspannung proportional, denn die gerade Linie geht nicht durch den Nullpunkt. Die Gleichung derselben heißt:

$$a = 0,52 \text{ cm} + \frac{1,24 \text{ cm}}{100000 \text{ Volt}} \cdot s \quad (9)$$

worin  $a$  die Halbwertschicht der Strahlung im Wasser und  $s$  die wirksame Sekundärspannung bedeutet. Die Gleichung ist gültig für Härtegrade von mehr als 6,4 mm Halbwertschicht und für Spannungen von mehr als 10 000 Volt.

Man kann sich aus dieser Figur ferner Rechenschaft geben, warum bei den höhern Härtegraden die wirksame Sekundärspannung so außerordentlich rasch steigt. Geht man z. B. von einer 3 mm-Strahlung zu einer 4 cm-Strahlung über, so muß die wirksame Sekundärspannung von 7700 Volt auf 8800 Volt steigen, also nur um 1100 Volt. Will man dagegen eine 7 mm-Strahlung durch eine 8 mm-Strahlung ersetzen, so braucht es hierzu eine Erhöhung der wirksamen Sekundärspannung von 26 000 auf 34 000 Volt, also um 8000 Volt.

Soll Gleichung (9) in Worten ausgedrückt werden, so kann man sagen, daß für mittlere und hohe Härtegrade die um 5,2 mm verminderte Halbwertschicht der Sekundärspannung proportional sei, indem jede Erhöhung der Halbwertschicht um 1 mm eine Vermehrung der wirksamen Sekundärspannung um 8000 Volt erfordert.

Worauf diese Regelmäßigkeit des Zusammenhanges begründet und wodurch die auffallende Abweichung bei den untern Härtegraden hervorgerufen wird, ist mir unbekannt. Wäre es denkbar, daß bei schwächern Spannungen die Angaben des Sklerometers unzuverlässig werden, indem bei genügendem Sinken des Funkenpotentials doch eine Beeinflussung der mittlern Windungen durch dasselbe stattfände? Dann würde man in der Tat um so höhere Spannungswerte messen, je tiefer die Spannung sinkt, und damit fände man einen zu kleinen Differentialquotienten nach der Halbwertschicht. Dem oben beschriebenen Klingelfußschen Beweis mit den Büschelentladungen würde die Untersuchung allerdings entgehen, weil sehr niedrige Funkenpotentiale auch keine Büschelentladungen mehr geben.

Haben wir vorhin (S. 42) festgestellt, daß die Messungen der Sekundärspannung nach Klingelfuß und nach Bergonié keine übereinstimmenden Resultate liefern, so müssen wir nun auch noch den Zusammenhang zwischen dem Härtegrad und der Sekundärspannung aufsuchen, wie er sich aus den Angaben des elektrostatischen Voltmeters von Bergonié ergibt. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls in Fig. 7 (untere Kurve) dargestellt.

Ferner muß die für das Klingelfußsche Instrument geltende Gleichung (9) für das Bergoniésche Instrument ersetzt werden durch:

$$a = 0,42 \text{ cm} + \frac{s \cdot 0,98 \text{ cm}}{100000 \text{ Volt}} \quad (9^*)$$

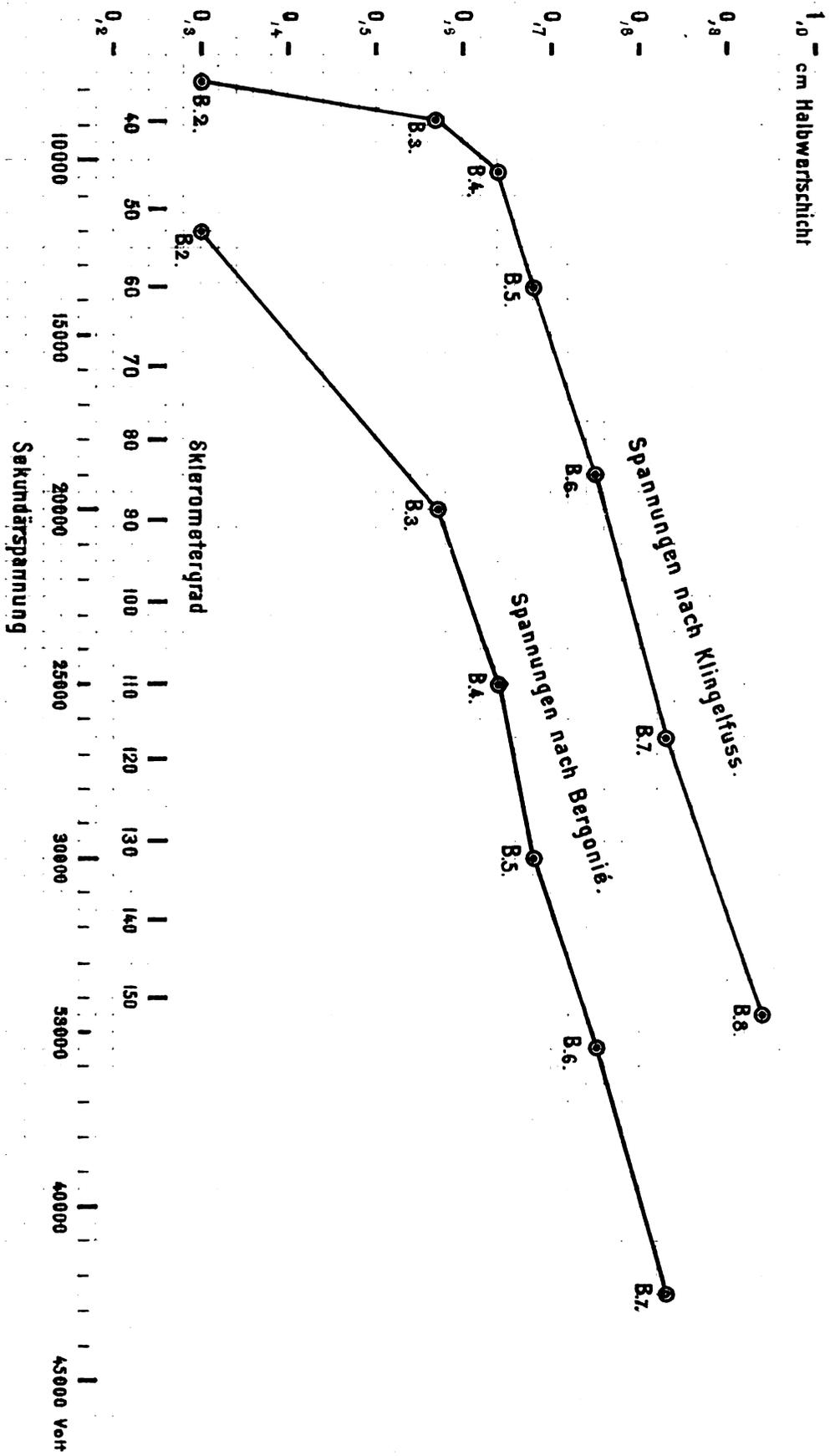
Dieselbe ist gültig für Härtegrade von mehr als 5,8 mm Halbwertschicht und Spannungen von mehr als 20 000 Volt.

In Fig. 7 fällt uns nicht nur die Tatsache auf, die wir ja schon früher festgestellt haben, daß die Spannungen nach Bergonié weit höher gefunden werden, als nach Klingelfuß, sondern der Charakter der Kurve ist ein anderer. Auch die Bergoniékurve biegt am linken Ende etwas nach unten ab, aber längst nicht in dem Masse wie die Klingelfußkurve. Schon vom zweiten Punkte an ist der Verlauf fast geradlinig, und der erste Punkt, welcher ja auch unter dieser Geraden liegt, verursacht doch eine weit geringere Abknickung.

Ob man daraus den Schluß ziehen darf, daß die Messung nach Bergonié zuverlässiger sei, wage ich hieraus allein nicht zu entscheiden. Man vergleiche aber weiter S. 76.

#### 4. Härtegrad und Intensität.

Wir haben von Anbeginn hervorgehoben, daß unsere Härtemessungen von der Intensität der gegebenen Strahlung durchaus unabhängig sein müssen, und es hat sich daraus ergeben, daß solche Skalen, wie z. B. die alte Walterskala, die Beezskala und die Bauerskala schon aus diesem Grunde ausgeschaltet zu werden verdienen. Wird dieses wichtige Postulat nicht be-





achtet, so wird man bei zwei Strahlungen, welche gleichen Härtegrad, aber verschiedene Intensität haben, stets die größere Härte bei der größeren Intensität finden. Begründet man aber eine Skala auf der prozentualen Abnahme der Intensität infolge Absorption, so ist das Intensitätsmoment grundsätzlich ausgeschaltet. Es war dann nur ein Schritt zu der bequemsten aller Prozentzahlen, 50 %, welche uns auf den Begriff der Halbwertschicht geführt hat.

Eine ganz andere Frage, welche unsere Untersuchungen etwas schwieriger macht, ist die, ob nicht tatsächlich ein Zusammenhang bestehe, zwischen der Intensität und dem Härtegrad. In der Tat, wer hat nicht schon bemerkt, daß nach Einstellung einer Röhre auf einen bestimmten Härtegrad unter schwacher Belastung, nachher bei der Aufnahme unter starker Belastung ein Bild entstand, welches einem beträchtlich höheren Härtegrad entsprach?

Diese Frage läßt sich sehr gut mit dem Sklerometer beantworten, wie dies Klingelfuß auch bereits getan hat. Dabei hat es sich durchweg gezeigt, daß mit steigender Belastung (gemessen am Milliampèremeter) der Härtegrad zunimmt. Und wenn wir uns an die Betrachtungen erinnern, welche wir über das Funkenpotential und die wirksame Sekundärspannung (S. 33) angestellt haben, so sehen wir auch leicht ein, warum diese so sein muß. Je größer die Elektrizitätsmengen sind, welche sich an den Sekundärpolen des Induktors anhäufen, um so höher steigt die Spannung an den Polen der Röhre an, um so höher wird der Härtegrad.

Es hängt nun selbstverständlich von dem Widerstand der Röhre und von den Kapazitätsverhältnissen im sekundären Stromkreis ab, in welcher Weise diese Anhäufung von Elektrizität und damit die Änderung der Sekundärspannung und des Härtegrades mit der Belastung sich äußern wird. Sicherlich werden z. B. die Metallmassen der Röhrenelektroden die Kapazität des Sekundärkreises wesentlich beeinflussen, und es kann daher nicht wundernehmen, wenn man für verschiedene Röhren andere Zusammenhänge zwischen Belastung und Härtegrad findet. Klingelfuß nennt die diesem Zusammenhang entsprechende Kurve die „Charakteristik“ der Röhre.

Die genaue Bedeutung dieser Kurve für die Beurteilung der einzelnen Röhren ist, so viel mir bekannt, noch nicht klargestellt. Eines dagegen scheint mir, wenigstens theoretisch, richtig zu sein: Je steiler diese Kurve verläuft, d. h. je rascher der Härtegrad bei wechselnder Belastung sich ändert, desto weniger homogen wird das Strahlengemisch sein. Es ergibt sich dies aus folgender Überlegung: Die wirksame Spannung verläuft voraussichtlich nicht genau in einer horizontalen geraden Linie (Fig. 2). Sie wird während des Stromdurchganges durch die Röhre gewissen Schwankungen unterworfen sein. Diesen Schwankungen entsprechen verschiedene Härtegrade, und verschiedene Härtegrade während eines einzigen Stromstoßes erzeugen ein Strahlengemisch, das um so weniger homogen sein kann, je stärker die Härtegrade der einzelnen Komponenten untereinander abweichen.

### 5. Bewertung der einzelnen Skalen.

Die Bewertung eines Meßinstrumentes muß nach verschiedenen Gesichtspunkten geschehen: nach dem Grundsatz des Meßverfahrens, nach der Genauigkeit der Ergebnisse, nach der Bequemlichkeit der Handhabung und nach dem Preis.

1. Was das Meßprinzip betrifft, so sind unter allen Umständen die absoluten Härtemesser den andern vorzuziehen. Zu den absoluten Instrumenten gehören diejenigen, aus deren Angaben man die Durchdringungsfähigkeit der gemessenen Strahlung in einem korrekten Masse ableiten kann. Und hier muß wieder gesagt werden, daß für die medizinischen Anwendungen der Röntgenstrahlen die Durchdringungsfähigkeit für irgend ein Metall weit weniger Wert hat, als für Wasser oder eine ihm nahestehende Substanz. Dies ist von ganz besonders großer Bedeutung für die Beurteilung der sogenannten „Strahlenfilter“, über deren Einfluß auf die Tiefenwirkung am menschlichen oder tierischen Körper die zweimetalligen Härteskalen ganz unbrauchbare Angaben liefern.

Aus didaktischen und andern Gründen ist das Maß der Halbwertschicht dem Absorptionskoeffizienten vorzuziehen.

Ganz besonders aber sind alle Härtemesser, die nicht absolute Werte liefern, deshalb vom Übel, weil erfahrungsgemäß jedes neue System uns wieder eine neue Skala beschert, so daß wir schließlich es als ein besonderes Glück bezeichnen müssen, wenn wir einmal einen Kollegen treffen, welcher die gleiche Skala gebraucht, wie wir selbst, wobei uns dann ausnahmsweise einmal die übliche Umrechnung erspart bleibt. Dies fällt dahin, sobald einmal alle Apparate nach Halbwertschichten für Wasser geeicht sind.

2. Was die Genauigkeit betrifft, so dürfen wir unsere Ansprüche nicht allzu hoch schrauben. Ist es doch kaum möglich, während eines länger dauernden Betriebes, z. B. in der Therapie, den Härtegrad so konstant zu halten, daß nicht die Halbwertschicht sich um einen oder einige Millimeter ändere. Wenn wir an unsere Instrumente die Forderung stellen, daß man die Halbwertschicht auf 1—2 mm genau ablesen könne, so ist damit allem billigen Verlangen Genüge getan. Selbstverständlich darf der absolute Betrag der Ungenauigkeit bei weichern Strahlen weniger hoch sein als bei härtern, denn unterhalb 1 cm Halbwertschicht macht jeder Millimeter einen Fehler von über 10% aus, während über 1 cm Halbwertschicht der Millimeter Fehler weniger als 10% ausmacht. Wir werden später sehen, daß sich die Oberflächendosis im gleichen Verhältnis ändert, wie die Halbwertschicht. Sinkt die Halbwertschicht um 10%, so nimmt — unter sonst gleichen Umständen — die Dosis um 10% zu. Wird man aber die Dosis auch mit den besten der heute üblichen Verfahren auf 10% genau bestimmen?

Viel genauer, als bis auf 10%, ist die Ablesung an den elektrischen Härteskalen. Können dieselben dann auch mit der gleichen Präzision nach Halbwertschichten geeicht werden, so übertreffen sie an Genauigkeit die optischen Härtemesser. Andererseits haben sie den Nachteil, daß sie die Absorption der Strahlen im Glas der Röntgenröhre und in einem etwa vorgeschalteten „Strahlenfilter“ nicht berücksichtigen.

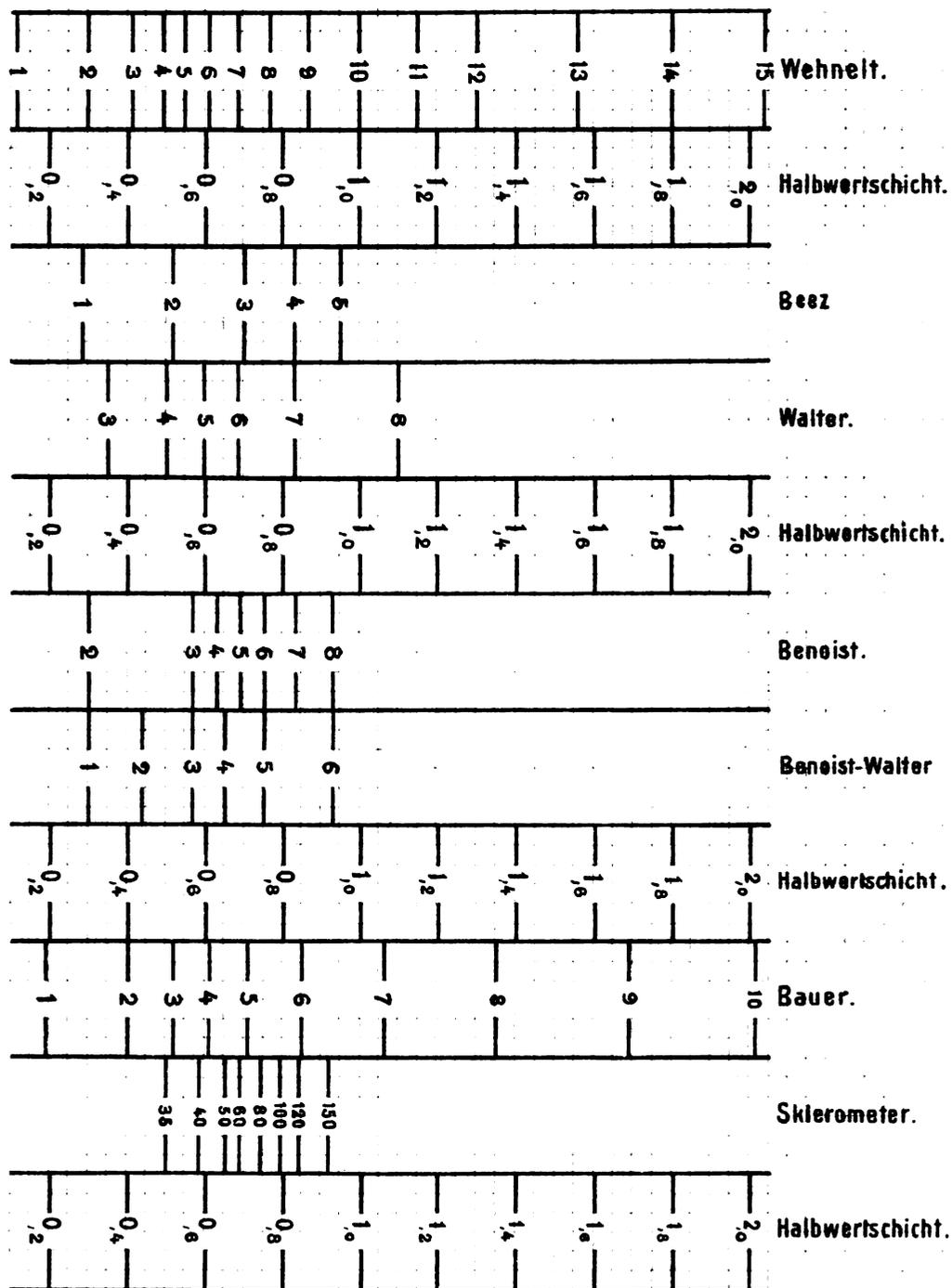
Überhaupt sind von allen Apparaten zur Messung des Härtegrades von „filtrierten“ Strahlen, d. h. solchen, welche durch eine absorbierende Schicht gedungen sind, nur die absoluten Härtemesser zu gebrauchen, weil die Metalle, aus welchen die konventionellen Skalen angefertigt sind, sich gegenüber den Sekundärstrahlen ganz anders verhalten, als die Körpergewebe und das Wasser, auf die allein es für unsere Aufgaben ankommt.

3. In der Bequemlichkeit der Handhabung sind entschieden die Zeigerinstrumente den andern überlegen: Ein Blick auf die Skala gibt uns den gewünschten Aufschluß. Den Vorzug in dieser Hinsicht verdienen die Instrumente von Klingelfuß und Bauer: Nur sollten dieselben nach Halbwertschichten geeicht werden. Dabei wird sich dann auch zeigen, ob ihre Angaben tatsächlich von der Belastung, der Frequenz und den Konstanten der verschiedenen Röntgenapparate unabhängig sind.

4. Was endlich den Preis der Apparate betrifft, so steht als das Billigste die parallele Funkenstrecke obenan. Da hier auch die Einstellung und Ablesung sehr bequem ist, so ist es wohl verständlich, wenn, trotz ihrer ausführlich beschriebenen Mängel, heute noch viel mit dieser Einrichtung gearbeitet wird. Die Angaben sind ja auch für ein und denselben Röntgenapparat bei bestimmter Belastung und Frequenz recht zuverlässige. Nur darf man nicht der Versuchung erliegen, die damit gemachten Erfahrungen auf einen andern Apparat anzuwenden oder in irgendeiner Weise verallgemeinern zu wollen.

### 6. Vergleich der verschiedenen Skalen.

Endlich ist auf die numerischen Beziehungen zwischen den verschiedenen Skalen hinzuweisen. Es geschieht dies am besten dadurch, daß alle bisherigen konventionellen Skalen auf das absolute Maß der Halbwertschicht bezogen werden. Diesen Zusammenhang gibt zunächst folgende Reduktionstabelle:





Halbwertschicht in cm	Wh.	B.	W.	B.-W.	Bauer	Beez	Sklerometer
0,2	1,3	2.	—	1.	0,8	1.	—
0,4	2,9	2.	3.	2.	2,0	1.	85
0,6	5,6	3.	5.	3.	3,7	2.	41
0,8	8,3	6.	7.	5.	5,6	4.	102
1,0	10,0	8.	8.	6.	6,4	5.	168
1,2	11,2	—	—	—	7,5	—	—
1,4	12,3	—	—	—	8,1	—	—
1,6	13,2	—	—	—	8,7	—	—
1,8	14,0	—	—	—	9,3	—	—
2,0	14,8	—	—	—	9,9	—	—

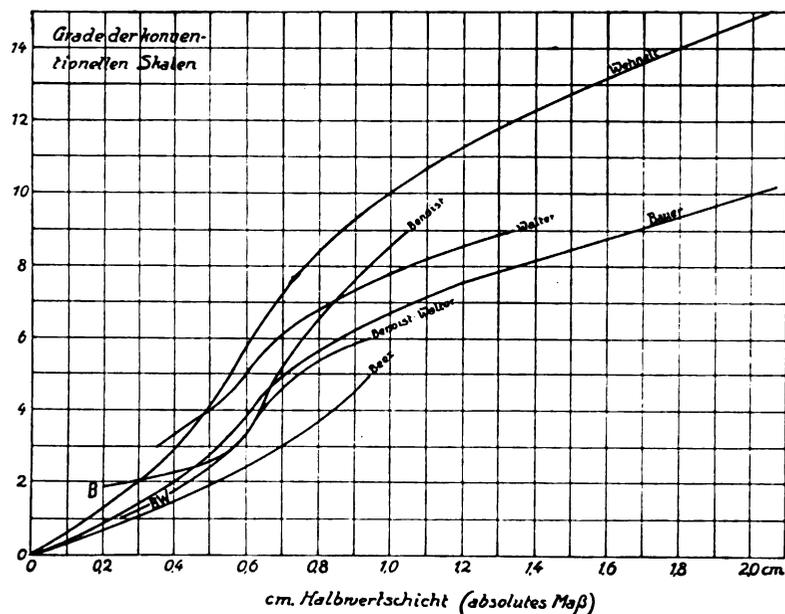


Fig. 10.

Die Punkte oben und unten an den Zahlen bedeuten Abrundungen. So heißt zum Beispiel 5. „etwas kleiner als 5“ und 5. „etwas größer als 5“.

Anschaulicher noch ist die graphische Darstellung, wie sie in Fig. 10 wiedergegeben ist. Hier sind die Halbwertschichten als Abszissen und die konventionellen Skalen als Ordinaten aufgetragen. Man sieht, daß keine dieser Skalen sich als gerade Linie abbildet. Die Kurven verlaufen alle in mehr oder minder eigensinnigen Krümmungen. Die Sklerometerkurve ist nicht eingezeichnet, da sie in einer besondern Figur (Tafel I) dargestellt wurde.

Ein Mittelding endlich zwischen Tabelle und graphischer Darstellung ist das Schema Tafel II, welches einer weitem Erklärung wohl nicht bedarf.

### 7. Einheitsmaße.

Zum Schluß dieses Abschnittes möchte ich aber nochmals allen Konstrukteuren ans Herz legen, doch ja recht bald mit dem unnützen Ballast von sechs verschiedenen Härteskalen aufzuräumen, und alle Instrumente nach dem absoluten Maß der Wasserhalbwertschicht zu eichen. Ist aber ein Härtemeßapparat einer solchen Eichung nicht fähig, so ist er überhaupt unbrauchbar; denn in diesem Falle sind seine Angaben nicht nur von dem Härtegrad, sondern noch von andern Faktoren abhängig, deren Einfluß grundsätzlich sollte ausgeschlossen sein.

### III. Intensität und Flächenenergie.

#### A. Definition.

Bevor wir auf die Möglichkeiten der Intensitätsmessung eingehen, müssen wir vorerst genau definieren, was wir unter dem Begriff der Intensität verstehen. Wie oft findet man in der Literatur Angaben, aus welchen zu entnehmen ist, daß der Experimentator die Wirkung von Röntgenstrahlen auf irgendeinen Reagenzkörper beobachtet und dann aus gleichen Wirkungen auf gleiche Intensität geschlossen hat!

Um hier nach Möglichkeit Klarheit zu schaffen, greifen wir wieder zurück auf den Begriff der Energie und stellen zunächst fest, daß bei jeder Strahlung in einem gegebenen Zeitabschnitt eine bestimmte Energiemenge ausgesandt wird. Im Falle einer Röntgenstrahlung wird man von Röntgenenergie reden. Für eine solche Betriebszeit, während welcher die Röhre gleichmäßig arbeitet, ist die ausgesandte Energiemenge der Betriebszeit proportional. Dividiert man also die ausgesandte Röntgenenergiemenge durch die Betriebszeit, so muß man eine Zahl erhalten, welche — gleichmäßigen Betrieb vorausgesetzt — von der Betriebszeit unabhängig ist. Diese Zahlung stellt die Leistung der Röhre dar.

Als Analogie erinnere ich an die mechanische Energiegröße, welche derjenigen Arbeit entspricht, die nötig ist, um ein Kilogramm auf die Höhe eines Meters zu heben; es ist dies die technische Arbeitseinheit eines Kilogrammeters. Wird diese Arbeit in einer Sekunde geleistet, so ist die Leistung von ein Kilogramm pro Stunde vollbracht worden.

Als weitere Analogie seien die elektrischen Einheiten erwähnt, von denen das Watt die Leistung mißt, während das Produkt aus Wattzahl und Stromzeit, das Joule (oder nach technischem Sprachgebrauch die Wattstunde) die Arbeitseinheit darstellt.

Aber Leistung ist noch nicht gleichbedeutend mit Intensität. Allerdings, je größer die Leistung der Röhre, je größer also die in der Zeiteinheit ausgesandte Röntgenenergie, desto größer auch die Intensität. Wir wissen aber, daß die Intensität außerdem sich ändert je nach der Entfernung von der Röhre. Je mehr ein Körper sich einer Strahlenquelle nähert, desto größer ist die ihn treffende Intensität der Strahlung. Das gilt nicht nur für die Röntgenröhre, sondern bekanntlich für jede punktförmige Strahlenquelle.

Und doch, ob wir uns nahe an der Strahlenquelle befinden oder fern von derselben, die Leistung der Strahlenquelle ist stets dieselbe. Geändert hat sich aber etwas anderes: die Größe der Fläche, auf welche eine bestimmte Strahlungsenergiemenge sich verteilt. Dies führt uns auf die Bedeutung der Fokaldistanz und deren Einfluß auf die Intensität.

#### B. Fokaldistanz.

Stellen wir irgendwo im Raum ein kleines, ebenes, durch eine beliebige Linie begrenztes Flächenstück auf. (Fig. 11.) Es ist nicht einmal nötig, daß dasselbe zu der Strahlenrichtung senkrecht stehe. Sein Flächeninhalt soll  $f$  sein.

Verbindet man die Grenzlinie dieses Flächenstückes mit der punktförmigen Strahlenquelle  $S$  durch gerade Linien (Strahlen), so entsteht ein Kegelmantel. Alle innerhalb dieses Kegelmantel ausgestrahlte Energie trifft das Flächenstück  $f$ .

Nun schneidet man den Kegelmantel mit irgendeiner Ebene, welche zu dem Flächenstück  $f$  parallel ist. Nach den Gesetzen der Stereometrie ist die Schnittlinie des Kegelmantels mit dieser Ebene „ähnlich“ der Begrenzung des erst gegebenen Flächenstückes  $f$ . Das will

sagen: Wenn die Punkte X und Y\*, sowie die Punkte Y und Y\* je auf ein und demselben Strahle liegen, so ist stets

$$\frac{XY}{X^*Y^*} = \frac{SX}{S^*X^*} = \frac{SY}{S^*Y^*} \quad (10)$$

Daraus ergibt sich aber weiter für die Flächen f und f\*

$$\frac{f}{f^*} = \frac{(SX)^2}{(S^*X^*)^2} = \frac{(SY)^2}{(S^*Y^*)^2} = \frac{r^2}{r^{*2}} \quad (11)$$

wenn man mit r und r\* die Abstände irgendzweier entsprechenden Punkte von der Strahlenquelle bezeichnet.

Das ist, wie mir scheint, die einfachste Anleitung des Satzes, daß die Strahlungsenergiemenge, welche auf die Flächeneinheit fällt, dem Quadrate des Abstandes von der Strahlenquelle umgekehrt proportional ist. Denn auf beide Flächenstücke fällt die gleiche Strahlungsenergiemenge, nämlich die, welche innerhalb des abgegrenzten Strahlenkegels ausgesandt wird. Dagegen sind die Flächenstücke, f und f\*, auf welche sich diese Energiemenge verteilt, verschieden groß; sind sie parallel, so verhalten sie sich wie die Quadrate der Abstände irgendzweier entsprechender (d. h. auf dem gleichen Strahle liegender) Punkte von der Strahlenquelle.

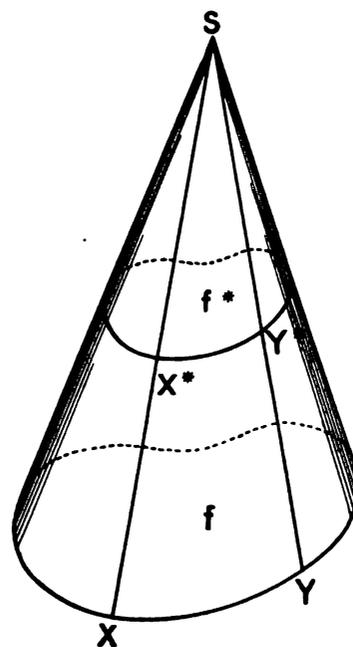


Fig. 11.

#### Definition der Intensität.

Und damit ist die Definition der Intensität gegeben:

Intensität ist diejenige Strahlungsenergiemenge, welche in der Zeiteinheit auf die Flächeneinheit fällt; oder in Form einer Gleichung

$$I = \frac{E}{T \cdot f} \quad (12)$$

worin, wie üblich, die Zeit mit T bezeichnet ist.

Eine Ausnahme von dieser Regel bilden die Sekundärstrahlen, welche in absorbierenden Medien entstehen, insofern als sie nicht von einem Punkte ausgehen. Die Sekundärstrahlung ist keine Punktstrahlung und je größer die Ausdehnung des absorbierenden und Sekundärstrahlen aussendenden Materiales in den Richtungen senkrecht zu den Strahlen ist, um so größer sind die Abweichungen von der umgekehrten Proportionalität zwischen der Intensität und dem Quadrat der Entfernung. Natürlich: denn es handelt sich ja überhaupt nicht mehr um eine einzige Fokaldistanz.

#### C. Flächenenergie.

Nun ist es für unsere Röntgenarbeiten — handle es sich um Photographie oder um Therapie — stets wichtig zu wissen, wie groß die Röntgenenergiemenge ist, welche auf die Flächeneinheit fällt. In welcher Zeit und mit welcher Intensität dies geschehe, das ist innerhalb weiter Grenzen vollständig gleichgültig.

Ein weiteres höchst wichtiges Moment ist, wie wir später noch ausführlich besprechen werden, die gleichzeitige Berücksichtigung des Härtegrades, der seinerseits wieder zu der Intensität in ganz bestimmter Beziehung steht (s. S. 30 ff.). Aber wenn wir hievon zunächst absehen, so ist es durchaus gleichgültig, ob wir durch Vergrößerung der Intensität oder Verlängerung der Bestrahlungszeit eine gewollte Vergrößerung der Wirkung erzielen. Verdoppelt man die Intensität (ohne zugleich den Härtegrad zu verändern) und halbiert man zugleich die Bestrahlungszeit, so muß die Wirkung unverändert bleiben. Ergibt ein diesbezüglicher Versuch trotzdem verschiedene Wirkungen, so ist damit nur bewiesen, daß entweder die Messung der Intensität unrichtig war oder daß bei dem Versuche noch andere Faktoren sich geändert haben.

Aber an der Tatsache, daß bei konstantem Produkt aus Intensität und Bestrahlungszeit die auf die Flächeneinheit fallende Strahlungsenergiemenge unverändert bleibt, läßt sich nicht rütteln.

Weil es nun in der Röntgentechnik nicht auf die einzelnen Werte der Intensität und der Bestrahlungszeit ankommt, sondern stets nur auf deren Produkt, so muß für die Bezeichnung dieser Größe ein bequemer und leicht verständlicher Ausdruck gefunden werden. Wir nennen diese Größe die „Flächenenergie“ der Strahlung.

Diese Namengebung, welche ich der deutschen Röntgengesellschaft vorgeschlagen habe, schließt sich an den bekannten Ausdruck „Sekundenliter“ an. Beträgt der Erguß einer Quelle so und so viele Liter in der Sekunde, so sagt man, die Quelle liefere so viele „Sekundenliter“. Und hat eine Strahlenquelle eine bestimmte Energiemenge auf die Flächeneinheit geworfen, so hat sie die Fläche mit einer entsprechenden „Flächenenergie“ bestrahlt.

So kann man z. B. eine Flächenenergie von  $500 \frac{\text{gr}^1}{\text{cm}}$  mit einer Intensität von  $50 \frac{\text{gr}}{\text{sec. cm}}$  in 10 Sekunden oder mit  $5 \frac{\text{gr}}{\text{sec. cm}}$  in 100 Sekunden erzeugen. Die auf die Flächeneinheit geworfene Energiemenge ist in beiden Fällen die gleiche. Allgemein bezeichnen wir die Flächenenergie mit  $F$ , und schreiben gemäß unserer Definition:

$$F = \frac{E}{f} \quad (13)$$

oder nach Gleichung (12)

$$F = I \cdot T \quad (14)$$

Auf Grund dieser Gleichungen kann man jederzeit die Flächenenergie zurückführen entweder auf den Quotienten aus der Strahlungsenergiemenge und der Fläche, auf welche dieselbe geworfen wurde, oder auf das Produkt aus Intensität und Bestrahlungszeit. Aber die einzelnen Begriffe müssen, entsprechend ihrer Definition, streng auseinandergelassen werden. Ein gewissenhaftes Befolgen dieser Forderung wird sicherlich bald manche Unklarheiten aus der Welt schaffen, die bis heute in Gedrucktem und Gesprochenem immer wieder aufgetaucht sind. Aber auch zur Bewertung der verschiedenen Vorschläge für Meßverfahren muß stets genau untersucht werden, ob man eine Intensität oder eine Flächenenergie oder am Ende noch etwas anderes mißt.

#### D. Energiemessung.

Wir mögen eine Meßmethode irgend welcher Art aufstellen, stets wird man mit der Messung einer Energiegröße zu rechnen haben. Es muß daher an dieser Stelle eine allgemeine Bemerkung über Messung von Energiegrößen<sup>2)</sup> vorausgeschickt werden.

So wie z. B. eine Länge, kann man Energiegrößen nicht messen. Alle mir bekannten Meßverfahren beruhen darauf, daß man die Energie in zwei oder mehr Faktoren zerlegt, diese Faktoren einzeln mißt, und die gefundenen Werte mit einander multipliziert. Beispiele:

Die Energie der Lage eines Stausees findet man, indem man das Gewicht seines Wassers multipliziert mit der Höhe seines Schwerpunktes über dem Abfluß.

Die potentielle Energie eines unter Druck eingeschlossenen Gases ergibt sich als das Produkt aus seinem Volumen und dem Überdruck gegenüber seiner Umgebung.

Die in einem elektrischen Gleichstromkreise umgesetzte Energie berechnet man als das Produkt aus Stromstärke, Spannung und Betriebszeit.

<sup>1)</sup> Die Energie wird gemessen in gr. cm, also die Intensität in  $\frac{\text{gr. cm}}{\text{sec. cm}^2} = \frac{\text{gr}}{\text{sec. cm}}$  und die Flächenenergie in  $\frac{\text{gr. cm}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{gr}}{\text{cm}}$ .

<sup>2)</sup> Wie außerordentlich wichtig die gründliche Kenntnis dieser Dinge ist, hat sich ganz besonders auffallend in der dynamischen Pulsdiagnostik gezeigt. Ich verweise die Interessenten auf meinen diesbezüglichen Aufsatz in der Zeitschrift für klin. Med. Bd. 73, H. 1 u. 2.

Jede derartige Messung ist eine **direkte Energiemessung**. Es gibt aber auch eine indirekte Energiemessung, welche darin besteht, daß man eine nicht direkt meßbare Energiemenge mit einer andern, direkt meßbaren, vergleicht.

Dies ist natürlich nicht, wie bei einer Längemessung, möglich durch Nebeneinanderhalten, sondern nur durch Energietransformation.

Bei zwei Längen wissen wir, daß sie gleich sind, wenn ihre Endpunkte aufeinander fallen.

Zwei Lichtintensitäten sind gleich, wenn auf einem Papier zwischen den beiden Lichtquellen der Ölfleck verschwindet.

Zwei Gewichte sind gleich, wenn sie den Wagebalken in horizontaler Lage halten.

Zwei Energien sind gleich, wenn die eine in die andere restlos transformiert wird.

Darum ist z. B. die Energie der Lage gleich der Energie der Wucht am Ende des Falles aus dieser Lage (abgesehen von der Luftreibung). Darum sind 425 kg m gleich einer Kalorie nach Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme. Darum enthält ein Gramm Fett 9 Kalorien, nämlich für den Fall der Transformation seiner chemischen Energie in Wärme.

Wollen wir also eine Röntgenenergiemenge messen, so müssen wir sie entweder in Faktoren zerlegen und diese miteinander multiplizieren oder wir müssen sie restlos in eine andere, direkt meßbare Energieform transformieren und sie auf diesem indirekten Wege messen.

Der erste Weg ist leider für die Röntgenenergie einstweilen nicht gangbar. Wir verfügen zur Zeit über kein Mittel, um sie in Faktoren zu zerlegen. Die Röntgenenergie ist also nicht direkt meßbar. Wir müssen sie deshalb indirekt messen, indem wir sie restlos in eine andere Energie transformieren. Auch hierfür besitzen wir zurzeit noch keine einwandfreie Methode, indem die Bedingung der Restlosigkeit bisher stets unerfüllt blieb.

Diesem Mangel kann bis zu einem gewissen Grade abgeholfen werden, wenn man sich an Stelle einer absoluten mit einer relativen Messung begnügt.

Wir haben ja schon öfters den Begriff des Nutzeffektes mit Vorteil angewandt. Verläuft eine Energietransformation restlos, so ist ihr Nutzeffekt gleich 100%. Je kleiner der Nutzeffekt ist, um so größer ist der nicht meßbare Rest. Eine relative Messung ist aber möglich, so lange man annehmen darf, daß der Nutzeffekt sich nicht verändere. Die Anwendung dieser Betrachtung auf die Röntgenstrahlen wird deren Bedeutung verständlicher machen.

#### E. „Direkt“ und „Indirekt“.

Lassen wir die verschiedenen Energieformen Revue passieren, welche im Röntgenbetriebe in Erscheinung treten, so sind es die folgenden: Elektrische Energie des Primärstromes, elektrische Energie des Sekundärstromes, mechanische und elektrische Energie der Kathodenstrahlen, Röntgenenergie.

Aber auch die Röntgenenergie wird wieder in andere Energieformen transformiert und zwar überall da, wo die Röntgenstrahlen absorbiert werden. Diese Transformationen sind mannigfachster Art.

Es entstehen dabei Sekundärstrahlen, elektrische Ladungen, Ionisation, Fluoreszenz, Verfärbungen und andere chemische Reaktionen, biologische Wirkungen, Wärme. Jede dieser neuen Energieformen repräsentiert auch eine bestimmte Energiemenge, und wenn wir den jeweiligen Nutzeffekt kennen, oder als konstant voraussetzen dürfen, so ist die Messung der Röntgenenergie auf Grund einer Transformation aus dieser zweiten Kategorie ebenso korrekt, wie bei den erstgenannten.

Wir wollen nun, der bequemerer Ausdrucksweise und der leichtern Verständigung zuliebe, die beiden Gruppen je mit einem Namen belegen. Wenn wir dabei an das zeitliche Moment denken, so müssen wir die erste Gruppe die primären Transformationen nennen.

Durch die primären Transformationen werden gewisse Energieformen in Röntgenenergie übergeführt. Die zweite Gruppe bilden dann die sekundären Transformationen. Durch die sekundären Transformationen entstehen aus der Röntgenenergie gewisse andere Energieformen.

Man kann aber auch die Art der Energie berücksichtigen, aus welcher die Röntgenenergie entsteht, bzw. in welche die Röntgenenergie transformiert wird. Dann ist die erste Gruppe als die elektrodynamischen Transformationen und die zweite Gruppe als die radiodynamischen Transformationen zu bezeichnen, weil im ersten Falle eine dynamische Wirkung der Elektrizität und im zweiten eine dynamische Wirkung einer Strahlung vorliegt.

Da es nun auf Grund unserer heutigen Kenntnisse unmöglich ist, die Röntgenenergie direkt zu messen, so müssen wir irgend eine oder mehrere dieser Transformationen zu Hilfe nehmen und somit die Röntgenenergie in jedem Falle indirekt messen.

Ob wir hierzu eine der primären, elektrodynamischen Transformationen oder eine der sekundären, radiodynamischen wählen, ändert nichts an dieser Tatsache. Stets muß auf irgend eine Energietransformation abgestellt werden, und damit wird jede Messung eine indirekte sein.

Die bisher übliche Unterscheidung zwischen „direkten“ und „indirekten“ Meßmethoden war also grundsätzlich unrichtig. Man hat die primären Methoden als indirekt, die sekundären als direkt bezeichnet. Und doch besteht der einzige Unterschied darin, daß bei den sogenannten „direkten“ Methoden von den sekundären Transformationen Gebrauch gemacht wurde, wobei die Röntgenenergie in eine andere Energieform umgesetzt wurde. Man hat sich lediglich durch ein Wort blenden lassen, indem man sagte, man messe dabei direkt die Wirkung der Strahlen. Gewiß, aber diese Wirkung ist doch nichts anderes als eine Energietransformation und eine solche ist auch die Entstehung der Strahlen. Grundsätzlich macht es aber für die Vorzüglichkeit und Brauchbarkeit einer Meßmethode durchaus keinen Unterschied, ob man sie auf eine primäre oder eine sekundäre Energietransformation aufbaue. Die Güte der Methode hängt nur ab von der Konstanz des Nutzeffektes der betreffenden Transformation und von der Sicherheit der Messung der meßbaren Energieform. Direkt ist aber keine dieser Methoden, denn in beiden Fällen liegt zwischen der gemessenen Energie und der gesuchten Röntgenenergie eine Transformation.

Wir werden daher in Zukunft nur von den primären oder elektrodynamischen und von den sekundären oder radiodynamischen Methoden sprechen.

## F. Die primären oder elektrodynamischen Transformationen.

### 1. Energie des Primärstromes.

Hat eine Röntgenbestrahlung unter bestimmten Versuchsbedingungen stattgefunden, so ist zunächst im Primärstromkreis des Apparates eine bestimmte Menge elektrischer Energie umgesetzt worden. Sie ist leicht zu berechnen: Man bezeichnet mit  $p$  die Primärstromstärke, mit  $q$  die Primärspannung und mit  $T$  die Betriebszeit. Dann ist die Primärstromenergie:

$$P = p \cdot q \cdot T \quad (15)$$

Genauer müßte man allerdings schreiben

$$P = q \cdot \int_0^T p \cdot dt \quad (16)$$

weil infolge der Tätigkeit des Unterbrechers der Primärstrom kein Gleichstrom, sondern ein Sinusoidalstrom ist. Aber das Primäramperemeter, ein Drehspuhleninstrument, gibt ja stets die Größe

$$\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p \cdot dt$$

an, so daß das Produkt aus der Primärvoltzahl, der Primärrampèrezahl und der Betriebszeit stets die gesuchte Energiegröße liefert.

Man kann aber selbstverständlich ebensogut einen Wattmesser verwenden.

## 2. Energie des Sekundärstromes.

### a. Theorie.

Für die Größe des Nutzeffektes, d. h. des Verhältnisses zwischen den Energien des Primärstromes und des Sekundärstromes ist die Berücksichtigung der Unterbrecherzahl von grundlegender Bedeutung. Ja, man hat sogar eine Methode darauf begründet, daß dem Induktor eine bestimmte Primärleistung (gemessen mit dem Wattmeter) zugeführt wurde, und daß nach einer bestimmten Zahl von Unterbrechungen der Strom automatisch ausgeschaltet wurde. Diese Methode soll in Frankreich und England für die Dosierung in Gebrauch gewesen sein.

Es ist hiegegen der Einwand zu erheben, daß die Resultate dieser Methode von der Frequenz nicht unabhängig sein können, denn der induzierte Strom hängt nicht ab von der Menge der mit dem Wattmesser gemessenen Primärleistung, sondern

1. von der Stromstärke im Augenblick der Unterbrechung, und
2. von der Raschheit der Unterbrechung.

Nun steigt ja allerdings bei langsamern Unterbrechungen sowohl die mittlere Primärstromstärke als auch deren Maximum im Augenblick der Unterbrechung. Aber Proportionalität besteht zwischen diesen beiden Größen nicht.

Jede Verwendung der Primärenergie zur Messung der Röntgenenergie muß sich deshalb streng an die Forderung stets gleicher Bedingungen (Frequenz, Belastung, Härtegrad) halten. Mit andern Worten: man kann die Primärenergie nicht eigentlich als Maß der Röntgenenergie, sondern nur als Kontrolle für deren Konstanthaltung, bzw. Reproduktion gleicher Mengen verwenden.

Die Energie des Primärstromes ( $P$  in Gleichung 16) wird nun durch Induktion in Energie des Sekundärstromes,  $S$ , umgesetzt, aber nicht rastlos. Namentlich bei Verwendung des Wehneltunterbrechers wird ein beträchtlicher Teil der Primärenergie in Wärme und auf elektrolytischem Wege in chemische Energie umgesetzt. Der Nutzeffekt

$$n = \frac{S}{P} \quad (17)$$

wird also bei den verschiedenen Apparaten und bei verschiedener Einstellung des gleichen Apparates von sehr verschiedener Größe sein, am geringsten beim elektrolytischen Unterbrecher am größten bei den Hochspannungstransformatoren (Snook, Ideal usw.). Gleich wie beim Primärstrom, so ist auch die im Sekundärstrom umgesetzte elektrische Energie gleich dem Produkte aus Spannung, Stromstärke und Betriebszeit. Nur sind hier die einzelnen Faktoren noch in höherem Maße veränderlich als beim Primärstrom. Wir dürfen deshalb nicht ohne weiteres die Formel für einen endlichen Zeitabschnitt ableiten, ohne vorher die Verhältnisse für den unendlich kleinen Zeitabschnitt geprüft zu haben. Wir betrachten also ein Zeitelement,  $dt$ , welches so klein sein soll, daß wir die Sekundärstromstärke,  $i$ , und die Sekundärspannung,  $s$ , als konstant annehmen dürfen. Dann ist die in dieser kurzen Zeit im Sekundärstrom umgesetzte Energie

$$ds = s \cdot i \cdot dt. \quad (18)$$

Hieraus schließen wir auf den endlichen Zeitabschnitt  $T$ :

$$S = \int_0^T s \cdot i \cdot dt. \quad (19)$$

Die richtige Beurteilung dieser Gleichung wird uns im Folgenden manche dunkle Frage klären und vor manchem voreiligen Schluß bewahren. Wir werden namentlich feststellen,

unter welchen Bedingungen die Sekundärstromenergie mit unsern üblichen Apparaten überhaupt meßbar ist.

Unter bestimmten Voraussetzungen läßt sich Gleichung (19) wesentlich vereinfachen. Erinnern wir uns an die Spannungskurve, welche Fig. 5 (S. 17) darstellt, so wissen wir, daß erst beim Punkte F der Stromdurchgang durch die Röhre beginnt. Vor diesem Momente ist also  $i = 0$  und damit wird auch der entsprechende Teil des Integrales (19) gleich Null<sup>1)</sup>.

Nachher senkt sich die Spannungskurve sehr rasch von der Höhe F des Funkenpotentials auf das Niveau N, d. h. auf die Höhe der wirksamen Spannung, welche nun mit guter Annäherung als Konstante angesehen werden darf. Wir nehmen damit an, daß für die Zeit des Stromdurchganges durch die Röhre die Sekundärspannung sich auf konstanter Höhe halte, und erinnern uns zugleich, daß diese Bedingung gleichbedeutend ist mit der Forderung einer homogenen Röntgenstrahlung (s. S. 17 und 29). Wir haben somit ein Mittel, um die Zulässigkeit unserer Forderung einer annähernden Konstanz der wirksamen Spannung zu kontrollieren. Trifft diese Voraussetzung zu, so tritt die Größe  $s$  als Konstante vor das Integral, und wir schreiben:

$$S = s \cdot \int_0^{\tau} i \cdot dt. \quad (20)$$

Die Energie des Sekundärstromes wird dadurch direkt meßbar, sobald wir imstande sind, die beiden Faktoren zu messen, in welche es sich entsprechend Gleichung (20) zerlegen läßt.

#### b. Messung der Spannung.

##### α. Sklerometer und elektrostatisches Voltmeter.

Die sekundäre Spannung,  $s$ , d. h. nach unsern eben aufgestellten Bedingungen die wirksame Sekundärspannung, nicht etwa das Funkenpotential, läßt sich mit dem Sklerometer nach Klingelfuß oder mit dem elektrostatischen Voltmeter nach Bergonié messen. Aber auch jeder zuverlässige Härtemesser kann hierfür Verwendung finden, denn zwischen seinen Angaben, falls sie absoluter Natur sind, und den Sekundärspannungen besteht eine ganz bestimmte Beziehung, die in der Tabelle Seite 29, ferner auf Tafel I und endlich (für mittlere und hohe Härtegrade) in Gleichung (9) niedergelegt ist. Auf Grund dieser Beziehungen kann jeder zuverlässige Härtemesser auch als Meßapparat für die wirksame Sekundärspannung geeicht werden. Ist ein Meßapparat solcher Eichung nicht fähig, so beweist dies, daß er auch keine zuverlässigen Werte des Härtegrades zu liefern vermag.

Für Strahlen mittlern und hohen Härtegrades kann man Gleichung (9) benützen, und an Stelle der wirksamen Sekundärspannung die Halbwertschicht,  $a$ , der Strahlung in Gleichung (20) einführen, wie folgt

$$S = 100\,000 \text{ Volt} \cdot \frac{a - 0,52 \text{ cm}}{1,24 \text{ cm}} \cdot \int_0^{\tau} i \cdot dt. \quad (21)$$

##### β. Parallele Funkenstrecke.

Bei der großen Bequemlichkeit im Gebrauch der parallelen Funkenstrecke konnte es nicht ausbleiben, daß der Vorschlag gemacht wurde, für die Berechnung der Sekundärstromenergie als Maß der Spannung die Länge des parallelen Funkens einzuführen. Scheint auch nach den Klingelfußschen Zahlen (s. S. 29) eine ziemlich weitgehende Proportionalität zwischen dem Funkenpotential und der wirksamen Sekundärspannung zu bestehen, so darf man andererseits nicht vergessen, daß das Verhältnis zwischen Funkenlänge und Sekundärspannung keine

<sup>1)</sup> Die vor dem Zeitpunkt F umgesetzte Energie des Primärstromes wird nicht in Röhrenstrom, sondern in Ionisationsarbeit transformiert.

Konstante ist, sondern von einer ganzen Reihe von Veränderlichen beeinflusst wird: von der Belastung, den Dimensionen und Kapazitäten im Sekundärkreis und von der Form der Pole.

### c. Messung der Sekundärstärke.

#### α. Theorie.

Der zweite Faktor der rechten Seite in Gleichung (20), das Stromintegral nach der Zeit, bedarf einer ausführlicheren Besprechung. Es ist damit eine Frage verknüpft, welche schon mehr als einmal zu Kontroversen Veranlassung gegeben hat, nämlich die Frage nach der Art des Milliampèremeters, welches für Röntgenapparate zu verwenden sei.

Es gibt zwei Typen von Milliampèremetern: Die elektromagnetischen oder Drehspulen- und die Hitzdrahtinstrumente. Außerdem kommt das elektrolytische Voltmeter in Betracht.

#### β. Die elektromagnetischen oder Drehspulenmilliampèremeter.

Bei diesen Instrumenten wird die Stromstärke durch ihre ablenkende Wirkung auf einen Magneten gemessen. Einen Apparat dieser Art hat zuerst Gaiffe mit Erfolg auf den Markt gebracht. Nach dem Konstruktionsprinzip dieses Instrumentes wird die Größe

$$\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i \cdot dt$$

gemessen, weil die Ablenkung der ersten Potenz der Stromstärke proportional ist.

Will man die Frage entscheiden, ob man diese Milliampèremeter zur Berechnung der Sekundärstromenergie verwenden dürfe, so sind zwei verschiedene Fragen streng auseinander zu halten:

1. Sind die Angaben des Apparates wirklich dem Stromintegral proportional?
2. Ist die Anwendung der Gleichung (20) für die Berechnung der Sekundärenergie zulässig?

Daraus ergibt sich, daß eine Nichtübereinstimmung noch nicht beweist, daß das elektromagnetische Milliampèremeter unzuverlässig ist, sie kann ebensogut auf allzugroßer Veränderlichkeit der Sekundärspannung beruhen, infolge deren die Gleichung (19) nicht in der vereinfachten Form (20) geschrieben werden darf.

Soviel ich aus Literatur ersehen kann, sind die Akten über diese Frage noch nicht geschlossen. Nach den Versuchen von Gaiffe und von Walter sind die elektromagnetischen Milliampèremeter für die Zwecke der Röntgentechnik brauchbar, während Wertheim-Salomonson nachgewiesen hat, daß bei hohen Stromstärken — auch unter konstantem Härtegrad — das elektromagnetische Milliampèremeter am Snookapparate im Vergleich mit dem Induktorapparat relativ zu hoch zeigt, und zwar hat sich bei einer größeren Versuchsreihe eine regelmäßige Differenz von 25%<sub>0</sub> des Wertes ergeben.

Immerhin ist es nicht sehr wahrscheinlich, daß der Fehler an dem elektromagnetischen Meßprinzip liege. Viel eher ist anzunehmen, daß bei der hohen Belastung der Abfall der Spannungskurve vom Funkenpotential auf das Niveau N nicht so rasch erfolge, daß man die wirksame Spannung als konstant betrachten darf. Dann ist aber Gleichung (20) überhaupt nicht anwendbar und das Stromintegral nach der Zeit verliert seine Bedeutung für die Messung.

Andrerseits sind die Messungen von Energie-, Intensitäts- und ähnlichen Größen vornehmlich für die Dosierung von Bedeutung. Hier aber wird man stets von hohen Belastungen absehen:

1. weil man einen konstanten Härtegrad erhalten muß, und dies bei hoher Belastung erfahrungsgemäß auf die Dauer nicht geht, und
2. weil jede bedeutende Abweichung der Spannungskurve vom horizontalen Verlauf während des Stromdurchganges durch die Röhre notwendig auch die Homogenität

der Strahlung aufhebt, welche wiederum eine wichtige Voraussetzung für eine rationelle Dosierung darstellt.

Da wir also bei der Dosierung hohe Belastungen sowieso vermeiden müssen, so dürfen wir die Gleichung (19) durch die bequemere Gleichung (20) ersetzen und das darin vorkommende Stromintegral mit dem elektromagnetischen Milliampèremeter messen. Mit andern Worten, für diejenigen Messungen im Sekundärstromkreis, welche zu Zwecken der Dosierung in Betracht kommen, sind die Angaben des elektromagnetischen Milliampèremeters zuverlässig.

#### γ. Die Hitzdrahtmilliampèremeter.

Ganz anders stellt sich die Frage bei den Hitzdrahtinstrumenten. Hier beruht die Messung der Sekundärstromstärke auf der Transformation der elektrischen Energie des Sekundärstromes in Wärme. Dabei ist aber nach dem Jouleschen Gesetze die Wärmeproduktion nicht der ersten, sondern der zweiten Potenz der Stromstärke proportional. Wir messen also mit einem Hitzdrahtinstrument nicht das Stromintegral (20), sondern die Größe

$$\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2 \cdot dt.$$

Natürlich kann man das Instrument stets so teilen, daß man auf der Skala nicht dieses Integral, sondern dessen Quadratwurzel abliest. Sobald aber eine Stromkurve von stark unregelmäßiger Form vorliegt, so kann der Wert dieser Quadratwurzel bedeutend größer werden, als das Stromintegral in Gleichung (20). Dem entspricht dann auch eine große Abweichung in den Angaben der beiden Typen von Instrumenten.

Könnte man beim elektromagnetischen Instrument darüber im Zweifel sein, ob seine Anwendung auf Grund von Gleichung (20) gestattet sei, so wissen wir beim Hitzdrahtinstrument von vornherein, daß die von ihm gemessene Größe in unsern Gleichungen überhaupt gar nicht vorkommt, es müßte denn sein, daß die Spannungskurve zufällig einen solchen Verlauf hätte, daß das Integral in Gleichung (19) gleich würde dem Produkt aus dem Spannungsintegral und dem Stromquadratintegral, eine immerhin entfernte Möglichkeit, für deren Wahrscheinlichkeit wir den Befürwortern des Hitzdrahtmilliampèremeters den Beweis überlassen wollen.

Damit soll nicht gesagt sein, daß nicht auch die Angaben der Hitzdrahtinstrumente zu verwenden wären, nur muß hierfür der Beweis geleistet werden, daß die Stromkurve nicht allzu asymmetrisch ist. Ist zum Beispiel die Stromkurve eine Sinuskurve, so zeigt das Hitzdrahtinstrument 12% zu hoch. Ist sie eine Sinusquadratkurve, so beträgt der Fehler 23% usw. Da wir aber kaum in den Fall kommen, die Kontrolle an Hand solcher Kurven auszuführen, so werden wir uns kurz dahin fassen, daß die Hitzdrahtinstrumente für alle diejenigen Einstellungen der Röntgenapparate brauchbare Werte liefern, bei welchen ihre Angaben von denjenigen der elektromagnetischen Milliampèremeter nicht merklich abweichen.

#### δ. Kritik der Sekundärstrommessung.

Was nun die praktischen Versuchsergebnisse anbelangt, so stehen auch da wieder zwei anscheinend gleichwertige Behauptungen in direkten Gegensatz. Während Walter in einer ausführlichen und gemeinverständlichen Arbeit (Verh. V, S. 53) dargetan hat, daß mit steigender Belastung die Angaben des Hitzdrahtinstrumentes mehrere hundert Prozent zu hoch ausfallen, versichert Wertheim-Salomonson (Kommissionsbericht, Verh. III.), daß innerhalb 1 und 5 Milliampères die Hitzdrahtinstrumente zuverlässige Angaben liefern.

Wertheim-Salomonson geht soweit, beizufügen: „Das Milliampèremeter (nämlich das elektromagnetische: der Verf.) ist also ein vorzügliches Hilfsmittel bei Installationen mit fester Frequenz, unter anderm bei Wechselstrombetrieb. Bei dem Motorunterbrecher mit veränderlicher Frequenz und bei dem Wehneltunterbrecher ist die Angabe völlig wertlos.“

Im Gegensatz dazu kommt Walter auf Grund seiner Versuche zu dem Ergebnis, daß die Angaben des elektromagnetischen Milliampèremeters von genügender Zuverlässigkeit und unabhängig von Belastung und Frequenz sind.

Solange zwei der hervorragendsten Forscher auf diesem Gebiete noch diametral entgegengesetzter Ansicht sind, läßt sich ein definitives Urteil nicht fällen. Es wäre daher höchst wünschbar, daß diese Frage durch eine möglichst große Versuchsreihe endgültig entschieden würde. Immerhin möchte ich auf meinen Versuch der Erklärung dieser Widersprüche nochmals hinweisen, wobei es sich in erster Linie um die Frage handelt, ob man Gleichung (19) durch (20) ersetzen darf oder nicht. Diese Erklärung hat um so mehr Wahrscheinlichkeit für sich, als die Spannungskurve sowohl wie die Stromkurve beim Induktorapparat sicherlich eine sehr verschiedene sein kann gegenüber dem Snook (s. S. 41).

Eine andere Erklärung für beobachtete Abweichungen der Sekundärstrommessungen an verschiedenen Apparaten trotz gleicher Flächenenergie gibt Wertheim-Salomonson.

Er sagt: „Da die Stromleitung in der Röhre selbst durch Elektronen geschieht, von denen jedes eine bestimmte elektrische Ladung, nämlich  $0,115 \cdot 10^{-18}$  Coulomb besitzt, so kann mit dem Milliampèremeter die Anzahl dieser Elektronen per Sekunde bestimmt werden: Sie beträgt bei einer Stromstärke von einem Milliampère  $8,7 \cdot 10^{15}$  Elektronen per Sekunde. Da ferner die Röntgenstrahlen durch den Anprall der Elektronen gegen die Antikathode entstehen, so wurde angenommen, daß bei dem Durchgang von 1 Milliampère durch die Röhre auch  $8,7 \cdot 10^{15}$  Ätherstöße, d. h. Röntgenimpulse oder Röntgenstrahlen per Sekunde abgegeben werden.

. . . Bei einer eingehenden Betrachtung dieser Argumentation ergibt sich indessen, daß hierbei eine Reihe von unerwiesenen Voraussetzungen als selbstverständlich angenommen ist:

1. daß die Elektrizitätsleitung durch die Röhre ausschließlich durch die Elektronen vor sich gehe
2. daß jedes Elektron nur einen Ätherstoß verursache.

Ferner wird darauf aufmerksam gemacht, daß sicherlich nicht zur Bildung von Röntgenstrahlen derjenige Teilstrom beiträgt, welcher von der Hilfsanode ausgeht, wenn wir auch nicht wissen, ob es sich um einen positiven Ionenstrom oder einen negativen Elektronenstrom handelt.

„Die Folgerung aus obigem ist also, daß das Milliampèremeter in der Regel mehr Strom anzeigt, als von den Elektronen auf der Strecke zwischen Kathode und Antikathode übertragen wird. Falls man nun beweisen könnte, daß unter allen Umständen, unter welchen die Röhre gebraucht wird, auch derjenige Stromanteil, der als Elektronenstrom von der Kathode zur Antikathode übergeht, eine konstante Ratio der totalen Elektrizitätsmenge betrage, dann wäre die Sache einfach genug. Leider ist dies nicht möglich, so daß wir uns bezüglich dieses Punktes noch im Dunkeln befinden.“

Auch die zweite Forderung ist nicht erfüllt, da nach den Untersuchungen von van der Wals „bei dem Anprallen des Elektrons gegen die Antikathode nicht eine einmalige Geschwindigkeitsänderung stattfindet, sondern daß das Elektron zahlreiche Stöße erteilt, und erleidet, ehe es seine Geschwindigkeit verloren hat. So wird also nicht ein einziger Ätherimpuls, sondern eine ganze Reihe von Ätherimpulsen bei jedem Anprall eines Elektrons ausgesandt werden. Außerdem geschieht es sehr oft, daß ein Elektron bei der anprallenden, hin- und hergehenden Bewegung von der Antikathode fortgeschleudert wird, so daß also von dem primären Kathodenstrahl ein sekundärer Kathodenstrahl gebildet wird, der dann meistens die Glaswand trifft, und daselbst eine kleinere Reihe Röntgenimpulse hervorruft. Es ist hinreichend bekannt, daß stets auch die Glaswand an den Stellen, wo sie grün fluoresziert, Röntgenstrahlen abgibt“.

In einfachster Weise läßt sich diese letzte kritische Erörterung ausdrücken, wenn wir wieder von dem Begriff des Nutzeffektes Gebrauch machen: Wertheim-Salomonson zweifelt, daß bei der Transformation der Sekundärstromenergie in Kathodenstrahlenenergie und weiter in Röntgenenergie der Nutzeffekt konstant sei. Die Erörterung dieser Frage gehört aber eigentlich nicht mehr in diesen Abschnitt.

#### ε. Voltmeter.

Als ein weiteres Mittel zur Messung der Energie des Sekundärstromes ist noch das Voltmeter zu nennen, welches unter zwei Formen, dem Knallgasvoltmeter und dem Wasserstoffvoltmeter bekannt ist. Bei diesen Instrumenten dient die Menge des durch

den Strom zersetzten Wassers als Maß, wobei man entweder die Gesamtmenge des gebildeten Gases (Knallgas) oder nur den Wasserstoff messen kann. Die letztere Messung ist genauer; weil der Sauerstoff in der verdünnten Schwefelsäure, welche in das Instrument eingefüllt wird, in ziemlich beträchtlichem Maße löslich ist. Will man trotzdem das ganze Knallgas messen, so muß man vor Beginn der Messung den Strom so lange einschalten, bis die Flüssigkeit sich mit Sauerstoff gesättigt hat.

Einen bestimmten Vorteil bietet das Voltameter. Bei konstanten Strömen mißt die ausgeschiedene Gasmenge nicht die Stromstärke, sondern das Produkt aus Stromstärke und Betriebszeit; man erhält also direkt ein Maß für die Größe

$$i \cdot T$$

und damit fällt eine Multiplikation weg. Das gleiche gilt auch bei oszillierenden Strömen, wie wir sie im Sekundärkreis des Röntgenapparates haben, indem in diesem Falle das Voltameter die Größe

$$\int_0^T i \cdot dt$$

mißt, während die Milliampèremeter die Größe

$$\frac{1}{T} \int_0^T i \cdot dt$$

messen, wodurch auch wieder eine Multiplikation mit T nötig wird, um das Stromintegral zu berechnen, während dies nicht nötig ist bei dem Voltameter, welches uns direkt das Stromintegral gibt.

Andererseits werden selbstverständlich die Angaben des Voltameters ebenso unzuverlässig, wie diejenigen der Milliampèremeter, sobald wegen ausgesprochener Veränderlichkeit der wirksamen Spannung die Gleichung (20) hinfällig wird und durch Gleichung (20) ersetzt werden muß.

#### ζ. Gegenströme.

Es ist hier die beste Gelegenheit, um auf die Bedeutung der Gegenströme, d. h. der verkehrt gerichteten Stromimpulse einzutreten.

Abgesehen davon, daß durch diese Schädlinge die Röntgenröhren rasch verdorben werden, so fälschen sie außerdem die Angaben der Strommeßapparate. Die Energie der verkehrt gerichteten Ströme wird nicht in Röntgenenergie transformiert. Trotzdem liefert sie uns eine gewisse Gasmenge im Voltameter. Wir würden also aus den Angaben des Voltameters die in Röntgenenergie umgesetzte elektrische Energie zu groß berechnen.

Umgekehrt liegt die Sache beim elektromagnetischen Milliampèremeter. Hier wirkt der Gegenstrom dem richtigen Strome entgegen und erniedrigt dadurch die Angabe des Instrumentes, und zwar um den doppelten Betrag dessen, welcher dem einfachen Ausfall an elektromagnetischer Wirkung entsprechen würde. Man würde demgemäß die in Röntgenenergie transformierte elektrische Energie aus den Angaben des elektromagnetischen Milliampèremeters zu klein berechnen.

Arbeitet man mit dem Knallgasvoltameter, so ist der richtige Stromwert gerade das arithmetische Mittel zwischen den Angaben dieses Instrumentes und des elektromagnetischen Milliampèremeters. Hat man aber ein Wasserstoffvoltameter benützt, so muß man bei der Berechnung daran denken, daß von Wasserstoff das doppelte Volumen gegenüber Sauerstoff ausgeschieden wird.

Es hätte aber nicht viel Zweck, zu solchen Versuchen ein Wasserstoffvoltameter zu verwenden, denn die vorherige Sättigung der Schwefelsäure mit Sauerstoff könnte man doch nicht umgehen, weil die Gegenströme nicht Wasserstoff, sondern Sauerstoff liefern.

Da aber sowieso in jedem geordneten Röntgenbetriebe die Gegenströme sorgfältig auszuschalten sind, so brauchen wir uns mit dieser Komplikation nicht weiter aufzuhalten.

### 7. Widerstandsdilatometer.

Den gleichen Vorteil, wie die Voltmeter, gewähren die Widerstandsdilatometer, indem auch sie die Multiplikation mit der Betriebszeit unnötig machen. Doch messen sie nicht das Stromintegral, welches wir für Gleichung (20) brauchen, sondern das Stromquadratintegral

$$\int_0^T i^2 \cdot dt$$

weil sie, gleich den Hitzdrahtinstrumenten, auf der Transformation elektrischer Energie in Wärme beruhen.

Ein solches Instrument beschreibt Wertheim-Salomonson. Dasselbe besteht aus einem Schieferwiderstand, der in eine mit Paraffin gefüllte Glasröhre eingeschlossen ist. Beim Stromdurchgang erwärmt sich der Widerstand, dehnt sich aus, und das Paraffin steigt in einer Steigröhre in die Höhe. Die Angaben dieses Apparates sollen für kurze Betriebszeiten ziemlich genau sein. Bei stärkerer Erwärmung dagegen fallen die Werte zu klein aus, infolge von Wärmeverlust.

Es ist aber auch hier, wie beim Hitzdrahtinstrument nicht zu vergessen, daß wir nicht das Stromquadratintegral, sondern das Stromintegral aus Gleichung (20) nötig haben, und daß deshalb die Angaben des Widerstandsdilatometers nur so lange verwendet werden können, als die beiden Größen

$$\int_0^T i \cdot dt \quad \text{und} \quad \sqrt{T \cdot \int_0^T i^2 \cdot dt}$$

nicht allzuverschiedene Werte haben.

### 9. Die Gehrkesche Glimmlichtoszillographenröhre

sei hier nur erwähnt, weil sie Wertheim-Salomonson zur Sekundärstrommessung empfohlen hat. Es ist mir unbekannt, ob seither in der Röntgentechnik davon Gebrauch gemacht worden ist.

### 3. Energie der Kathodenstrahlen.

Die dritte Phase unseres Experimentes zeigt uns die Energie des Sekundärstromes S umgewandelt in Energie der Kathodenstrahlen K, wobei auch wieder nicht die ganze Energiemenge S restlos in die Energiemenge K umgesetzt wird. Auch hier haben wir also mit einem Nutzeffekt

$$m = \frac{K}{S} \quad (22)$$

zu rechnen, welcher sicherlich kleiner als Eins ist. Derjenige Energieanteil, welcher für die Ionisierung des Gasinhaltes der Röntgenröhre verbraucht wird, ist bereits dadurch aus der Rechnung weggefallen, daß wir den Wert des Integrales in Gleichung (19) vor dem Punkte F gleich Null gesetzt haben. Aber auch der Strom, welcher von der Kathode zur Hilfsanode geht, mag, wie Wertheim-Salomonson bemerkt hat (s. S. 43), einen Teil der Sekundärstromenergie der Kathodenstrahlenbildung entziehen.

Leider ist auch für die Energie der Kathodenstrahlen keine direkte Messung möglich. Diese Energiegröße besteht aus der Summe von zwei Energien: der potentiellen Energie der elektrischen Ladung der Elektronen und der kinetischen Energie derselben. Nur verfügen wir zurzeit noch über keine Methode, um alle die einzelnen Faktoren zu bestimmen, aus welchen diese Energiegrößen sich zusammensetzen. Eine indirekte Methode zur Messung der Energie der Kathodenstrahlen wird bei der Besprechung der sekundären Kathodenstrahlen (S. 57 Thermometerröhre) erörtert werden.

## 4. Röntgenenergie.

Als Viertes wird die Kathodenstrahlenenergie umgesetzt in Röntgenstrahlenenergie oder kurz Röntgenenergie. Wiederum ist bei dieser Transformation der Nutzeffekt, wie wir bestimmt wissen, beträchtlich kleiner als Eins. Wir kennen vornehmlich zwei Energietransformationen, welche neben der Röntgenstrahlenbildung einhergehen. So hat Walter nachgewiesen, daß von der Antikathode nicht nur Röntgenstrahlen, sondern außerdem auch sekundäre Kathodenstrahlen ausgehen. Sie sind die Ursache der Fluoreszenz des Glases, wobei aber der Hauptanteil der Sekundärkathodenstrahlenenergie nicht in Fluoreszenz, sondern in Wärme umgesetzt wird, wie sich durch Befühlen der Glaswand ja ohne weiteres ergibt.

Ferner ist jedem Röntgenologen, namentlich aus der frühern Zeit, als man noch die dünnen Antikathoden hatte, bekannt, daß unter der Wirkung der Kathodenstrahlen eine ganz bedeutende Wärmeentwicklung auf der Antikathode stattfindet. Es muß also ein beträchtlicher Anteil an Kathodenstrahlenenergie in Wärmeenergie umgesetzt werden, und dadurch für die Erzeugung von Röntgenenergie verloren gehen. Deshalb muß, wie oben bemerkt, der Nutzeffekt.

$$k = \frac{R^*}{K} \quad (23)$$

beträchtlich kleiner als Eins sein.

In Gleichung (23) haben wir absichtlich die Energie der von der Antikathode ausgehenden Röntgenstrahlen nicht mit  $R$ , sondern mit  $R^*$  bezeichnet. Denn diejenige Energiemenge, auf welche es uns ankommt, ist die Röntgenenergie außerhalb der Röntgenröhre, und diese bezeichnen wir daher mit  $R$ . Um den Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen aufzufinden, müssen wir die Absorption der Röntgenstrahlen in der Glaswand der Röntgenröhre berücksichtigen. Dazu bezeichnen wir die Dicke des Glases mit  $g$  und die Halbwertschicht der gegebenen Strahlung im Glas mit  $c$  und finden nach Gleichung (4)

$$R : R^* = 1 : 2^{\frac{g}{c}} \quad (24)$$

Auf Grund dieser Gleichung sind wir in den Stand gesetzt, den Zusammenhang zwischen der Röntgenenergie innerhalb der Röhre  $R^*$  und derjenigen außerhalb der Röhre  $R$ , jederzeit aufzufinden, nachdem wir durch die Bestimmungen Walters über die Größe der Halbwertschichten  $c$ , für verschiedene Härtegrade orientiert sind. Aus den Ergebnissen der Walterschen Versuche lassen sich folgende Zahlen entnehmen:

Härtegrad	2	3	4	5	B. W.
$c =$	0,40	0,47	0,52	0,67	mm.

Vergleicht man diese Zahlen mit den Halbwertschichten für destilliertes Wasser, wie sie sich aus Fig. 10 oder aus dem Schema Tafel II ergeben, so erkennt man, daß die letztern mit ziemlicher Regelmäßigkeit etwas mehr als elfmal größer sind. Für die Schwierigkeit der Messung ist die Übereinstimmung eine sehr gute.

## 5. Bedeutung sämtlicher Transformationen.

Gehen wir jetzt die verschiedenen Transformationen nochmals durch, welche die elektrische Energie des Primärstromes untergehen mußte bis zu ihrer Umwandlung in Röntgenenergie, so finden wir zunächst zwischen der Kathodenstrahlenenergie und der Röntgenenergie außerhalb der Röhre auf Grund der Gleichungen (23) und (24) folgende Beziehung

$$R = \frac{k \cdot K}{2^{\frac{g}{c}}} \quad (25)$$

Zur Beurteilung der Beziehung zwischen der Röntgenenergie und der elektrischen Energie des Sekundärstromes dividieren wir Gleichung (25) durch Gleichung (22) und erhalten

$$R = \frac{m \cdot k \cdot S}{2^{\frac{g}{c}}} \quad (26)$$

Wollen wir endlich noch die Beziehung zwischen der Röntgenenergie und der elektrischen Energie des Primärstromes auffinden, so müssen wir die letzte Gleichung noch durch Gleichung (21) dividieren, woraus

$$R = \frac{n \cdot m \cdot k \cdot P}{2^{\circ}} \quad (27)$$

Hieraus ergibt sich zunächst, daß man um so mehr Faktoren auf der rechten Seite dieser Gleichungen erhält, je mehr Transformationen zwischen die beiden verglichenen Energieformen geschaltet sind. Das ist ja auch selbstverständlich, weil jede neue Transformation ihren Nutzeffekt als neuen Faktor hinzufügt. Wollen wir also die Röntgenenergie aus der Energie des Primärstromes ableiten, so müssen wir drei Nutzeffekte berücksichtigen, von denen uns keiner seinem numerischen Werte nach bekannt ist.

Einen Punkt allerdings dürfen wir nicht vergessen: Von allen diesen Energiegrößen P, S, K, R\* und R ist keine mit so großer Leichtigkeit und Genauigkeit meßbar, wie gerade P. Weil die Primärspannung einen annähernd konstanten Wert hat (außer vielleicht beim Wehneltunterbrecher), so ist die Energie P, wie wir gesehen haben, stets gleich dem Produkt aus den Angaben des Primärvoltmeters, des Primärampèremeters und der Betriebszeit.

Dafür müssen wir aber den Nutzeffekt n in Kauf nehmen, welcher leider nicht nur bei verschiedenen Apparaten sehr verschieden ist, sondern bei ein und demselben Apparate mit der Belastung, der Unterbrechungszahl und dem Härtegrad der Röhre wechseln kann. Eingehende Untersuchungen über diesen Gegenstand sind meines Wissens nicht veröffentlicht worden, wahrscheinlich weil die Ergebnisse, je nach Betriebsverhältnissen, allzusehr wechselnde sind.

Da wir ferner für die Größen K und R\* überhaupt keine Meßmethode besitzen (über indirekte Messung von K vergleiche den folgenden Abschnitt 7. auf S. 48), so bleibt nur noch eine Möglichkeit übrig, nämlich die Zurückführung der Röntgenenergie auf die elektrische Energie des Sekundärstromes, unter Benutzung von Gleichung (26).

Damit haben wir den fatalen Faktor n aus der Welt geschafft und müssen nur noch mit den Faktoren m und k rechnen. Numerische Werte dieser beiden Nutzeffekte sind, so viel mir bekannt, nicht veröffentlicht worden. Man hat dagegen gewisse Gründe anzunehmen, daß diese Zahlen konstant, d. h. vom Härtegrad, von der Frequenz und von der Belastung unabhängig seien, wenigstens innerhalb gewisser Grenzen, welche wir uns mit Bezug auf andere Fehlerquellen sowieso stecken müssen.

Andererseits darf nicht außer acht gelassen werden, daß bei sehr hohen Härtegraden, bzw. hohen Sekundärspannungen, eine beträchtliche Energiemenge des Sekundärstromes durch Büschelentladungen an den Zuleitungen verloren geht, so daß der Nutzeffekt mit zunehmendem Härtegrad abnehmen muß. Wir dürfen also in der Transformationsgleichung (26) die Größe m nicht mehr als Konstante gelten lassen, wenn die Röhre sehr hart geworden ist.

#### 6. Unrichtige Kombinationen.

Als ganz verfehlt sind indessen solche Versuche zu bezeichnen, die zur Beurteilung der Röntgenenergie ein Produkt aus elektrischen Größen bilden, welche nicht dem gleichen Stromkreis angehören. So hat z. B. Jirotko eine Größe eingeführt, die man erhält durch Multiplikation von Primärspannung, Sekundärstromstärke und Betriebszeit. Als Einheit dient die Größe 1 Volt. 1 Milliampère. 1 Sekunde; sie führt den Namen „1 Vlast“. In einer spätern Publikation ist die Einheit umgetauft worden in „Röntgen-Watt-Sekunden“, aber mit der ausdrücklichen Hinzufügung: „Das Messen der sekundären Spannung ist nun zu kostspielig, deshalb empfehle ich die Messung primär, und zwar direkt am Kern des Induktors.“

Jirotko behauptete damals, daß bei gleicher Anzahl „Vlast“ die photographische Wirkung der Strahlung auch bei verschiedenen Härtegraden stets die gleiche sei. Konnten schon die damals veröffentlichten Photographien von der Richtigkeit dieser Behauptung nicht

überzeugen, so geht aus den vorstehenden Überlegungen mit jeder wünschbaren Deutlichkeit hervor, warum dies nicht richtig sein kann.

### 7. Sekundäre Kathodenstrahlen.

Beim Auftreten der Kathodenstrahlen auf die Antikathode entstehen nicht nur Röntgenstrahlen und Wärme, sondern auch sekundäre Kathodenstrahlen, d. h. solche Strahlen, welche im großen und ganzen die gleichen Eigenschaften haben, wie die Kathodenstrahlen, mit dem Unterschied, daß sie nicht von der Kathode, sondern vom Fokus auf der Antikathode ausgehen, gleich wie die Röntgenstrahlen. Sie werden vom Glas der Röntgenröhre vollständig absorbiert unter Transformation in Röntgenstrahlen, Fluoreszenz und Wärme. Jedermann weiß ja, daß das Glas der arbeitenden Röhre sich erwärmt und elektrisch geladen wird.

Wenn man nun annimmt, daß derjenige Anteil an Kathodenstrahlenenergie, welcher auf die Bildung der sekundären Kathodenstrahlen verwandt wird, einen konstanten Anteil der ganzen Kathodenstrahlenenergie ausmacht, so kann man die Energie der sekundären Kathodenstrahlen als Maß für die Energie der primären Kathodenstrahlen, und somit für die Röntgenstrahlen benutzen.

Köhler hat hierauf ein Meßverfahren begründet. Er hat in die Glaswand der Röhre ein Thermometer versenkt und mit Metallpulver umgeben. Unter der Wirkung der sekundären Kathodenstrahlen erwärmt sich das Metallpulver je länger desto höher, und aus dem Betrage dieser Temperaturerhöhung läßt sich ein Rückschluß auf die gleichzeitig entstehende Röntgenenergie ziehen.

Für die praktischen Zwecke der Dosierung soll sich diese Meßmethode bewährt haben, und es läßt sich sehr wohl denken, daß sie für diesen Zweck völlig genügende Angaben liefert. Immerhin ist dabei Folgendes zu bedenken: Es liegen drei Energietransformationen zwischen der gesuchten und der gemessenen Energie.

1. Die Röntgenenergie geht hervor aus der Energie der primären Kathodenstrahlen.
2. Die Energie der primären Kathodenstrahlen wird transformiert in die Energie der sekundären Kathodenstrahlen.
3. Diese Energieform endlich wird wieder transformiert, und zwar in Wärme und erst die unter dieser letzten Transformation entstehende Temperaturerhöhung in der Messung zugänglich.

Soll also die gemessene Temperaturerhöhung ein brauchbares Maß für die Röntgenenergie sein, so ergibt sich als notwendige Voraussetzung, daß die Nutzeffekte aller dieser drei Transformationen konstant sein müssen, oder, daß schlimmsten Falles wenigstens ihr Produkt konstant sei. Es kann dies ja sehr wohl innerhalb der zulässigen Fehlergrenzen richtig sein; aber es ist doch einstweilen eine Hypothese, die allerdings um so mehr an Wahrscheinlichkeit gewinnt, je mehr sich mit der Zeit eine Übereinstimmung mit den Ergebnissen der andern Methoden herausstellt.

Selbstverständlich teilt die Köhlersche Messung mit allen elektrodynamischen Methoden die Eigenschaft, daß sie zunächst nur für die „Innenstrahlung“ der Röhre gebraucht werden kann. Will man sie auf die „Außenstrahlung“ anwenden, so muß man den Reduktionsfaktor  $R:R^*$  in Rechnung ziehen, dessen Bedeutung auf Seite 92 besprochen worden ist.

Näheres über die praktische Verwertung des Köhlerschen Meßprinzipes findet sich auf Seite 80.

### 8. Verteilungsfaktor.

Da es sich in der Röntgentechnik nie darum handelt, die Energie der ganzen von der Röhre ausgesandten Strahlung zu messen, sondern stets nur die in einem beschränkten Strahlenkegel enthaltene, so muß zur Berechnung dieses Energieanteiles die Größe  $R$  mit einem Verteilungsfaktor multipliziert werden.

Ist dieser Faktor eine Konstante, so kann man ihn einfach mit den übrigen Konstanten der Transformationsgleichungen vereinigen. Ist er dagegen vom Härtegrad oder von der Frequenz abhängig, so erfordert die Frage eine weitere Untersuchung.

Daß die Verteilung der Strahlung nicht nach allen Seiten eine gleichmäßige ist, und in welchen Verhältnissen sich die Intensität nach verschiedenen Richtungen ändert, das hat Kienböck durch eingehende Versuche zahlenmäßig nachgewiesen.

Darauf hat aber Walter durch mathematisch-physikalische Entwicklung sowohl wie durch sorgfältige Experimente den Beweis erbracht, daß die Verteilung — abgesehen von den äußersten Randzonen — eine durchweg gleichmäßige ist und daß die scheinbare Ungleichmäßigkeit der Strahlung in verschiedenen Richtungen voll und ganz, d. h. nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ, durch die verschieden starke Glasdicke und dementsprechend verschieden starke Absorption der Strahlen erklärt wird.

Ist aber die Verteilung der Strahlen nach allen Richtungen grundsätzlich eine gleichmäßige, so ist der Verteilungsfaktor eine Konstante, und somit von der Belastung, von dem Härtegrade und von der Frequenz unabhängig.

### 9. Relative Messung. Technische Bestrahlungsgröße.

Die Schwierigkeiten, welche sich der absoluten Messung der Sekundärstromenergie entgegenstellen, legen uns die Frage nahe, ob es nicht in manchen Fällen von Vorteil sein könnte, wenigstens eine relative Messung vorzunehmen. Da ist nun vornehmlich darauf hinzuweisen, daß für manche Aufgaben eine Veränderliche vorläufig ausgeschaltet werden kann, nämlich die Sekundärspannung.

Es wird später ausführlich die Rede davon sein, daß und warum wir heute noch keine Dosierungsmethode besitzen, welche für alle Härtegrade gültig wäre. Da nun alle Messungen sowieso bei einem bestimmten Härtegrade vorzunehmen sind, so vereinigt sich die Sekundärspannung einfach mit den übrigen Konstanten. Wir haben im folgenden zu prüfen, wie sich dadurch die Messung der Sekundärstromenergie vereinfacht.

Sehen wir von den höchsten Belastungen ab, welche uns eine merklich inhomogene Strahlung erzeugen würden und die wir deshalb auf jeden Fall in der Röntgentherapie vermeiden müssen, so dürfen wir Gleichung (19) durch Gleichung (20) ersetzen und, wie eben bemerkt, den Faktor  $s$  als Konstante behandeln, d. h. bei einer relativen Messung einfach weglassen. Es verbleibt dann als Maß für die Energie des Sekundärstromes nur noch das Integral

$$\int_0^T i \cdot dt,$$

dessen Wert wir den Angaben des Voltameters entnehmen, oder durch Multiplikation der Milliampèrezahl mit der Betriebszeit berechnen.

Zur Beurteilung der Dosis brauchen wir aber nicht die Energie des Sekundärstromes, sondern die Flächenenergie, d. h. den Quotienten aus der Röntgenenergie, und der Fläche, auf welche dieselbe sich verteilt. Zur Berechnung der Röntgenenergie wäre zwar noch die Multiplikation der Sekundärstromenergie mit den beiden Nutzeffekten  $m$  und  $k$  notwendig. Da wir aber beide mit großer Wahrscheinlichkeit als konstant<sup>1)</sup> voraussetzen dürfen, so können auch diese zwei Faktoren, gleich dem Faktor  $s$ , einfach wegbleiben. Es erübrigt somit nur noch die Division durch die Größe der bestrahlten Fläche. Da wir aber wissen, daß dieselbe dem Quadrate der Fokaldistanz proportional ist, so dividieren wir lieber durch das Quadrat der (viel leichter meßbaren) Fokaldistanz.

<sup>1)</sup> Nach v. Kowalski soll bei hohen Härtegraden der Nutzeffekt  $k$  zunehmen. Wie groß diese Zunahme ist, und ob sie durch den gleichzeitigen Energieverlust infolge Büschelentladung ungefähr kompensiert wird, ist mir nicht bekannt.

r =	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
0,6	2 min. 47 sec.	4 min. — sec.	5 min. 27 sec.	6 min. 20 sec.	6 min. 45 sec.	7 min. 40 sec.	8 min. 43 sec.	9 min. 51 sec.	11 min. 15 sec.	12 min. 32 sec.	14 min. 49 sec.
0,8	2 min. 05 sec.	3 min. — sec.	4 min. 05 sec.	5 min. 16 sec.	6 min. 24 sec.	7 min. 33 sec.	8 min. 43 sec.	9 min. 51 sec.	11 min. 15 sec.	12 min. 32 sec.	14 min. 49 sec.
1,0	1 min. 40 sec.	2 min. 24 sec.	3 min. 16 sec.	4 min. 16 sec.	5 min. 20 sec.	6 min. 24 sec.	7 min. 33 sec.	8 min. 43 sec.	9 min. 51 sec.	11 min. 15 sec.	12 min. 32 sec.
1,2	1 min. 28 sec.	2 min. — sec.	2 min. 43 sec.	3 min. 33 sec.	4 min. 30 sec.	5 min. 33 sec.	6 min. 43 sec.	7 min. 51 sec.	9 min. 15 sec.	10 min. 32 sec.	12 min. 49 sec.
1,4	1 min. 11 sec.	1 min. 43 sec.	2 min. 20 sec.	3 min. 08 sec.	4 min. 51 sec.	5 min. 46 sec.	6 min. 43 sec.	7 min. 51 sec.	9 min. 15 sec.	10 min. 32 sec.	12 min. 49 sec.
1,6	1 min. 02 sec.	1 min. 30 sec.	2 min. 02 sec.	2 min. 40 sec.	3 min. 20 sec.	4 min. 10 sec.	5 min. 02 sec.	6 min. — sec.	7 min. 15 sec.	8 min. 32 sec.	10 min. 49 sec.
1,8	55 sec.	1 min. 20 sec.	1 min. 49 sec.	2 min. 22 sec.	3 min. — sec.	3 min. 42 sec.	4 min. 29 sec.	5 min. 20 sec.	6 min. 15 sec.	7 min. 32 sec.	9 min. 49 sec.
2,0	50 sec.	1 min. 12 sec.	1 min. 38 sec.	2 min. 08 sec.	2 min. 42 sec.	3 min. 20 sec.	4 min. 02 sec.	4 min. 48 sec.	5 min. 38 sec.	6 min. 32 sec.	8 min. 49 sec.
2,2	45 sec.	1 min. 05 sec.	1 min. 30 sec.	2 min. 56 sec.	2 min. 28 sec.	3 min. 02 sec.	4 min. 40 sec.	5 min. 22 sec.	6 min. 07 sec.	7 min. 27 sec.	9 min. 44 sec.
2,4	42 sec.	1 min. — sec.	1 min. 22 sec.	2 min. 47 sec.	2 min. 15 sec.	3 min. 20 sec.	4 min. — sec.	4 min. 42 sec.	5 min. 42 sec.	6 min. 15 sec.	8 min. 32 sec.
2,6	38 sec.	1 min. — sec.	1 min. 16 sec.	2 min. 39 sec.	2 min. 05 sec.	3 min. 34 sec.	4 min. 07 sec.	4 min. 42 sec.	5 min. 20 sec.	6 min. 46 sec.	9 min. 03 sec.
2,8	35 sec.	1 min. — sec.	1 min. 10 sec.	2 min. 31 sec.	2 min. 56 sec.	3 min. 23 sec.	4 min. 53 sec.	5 min. 26 sec.	6 min. 01 sec.	7 min. 40 sec.	9 min. 57 sec.
3,0	33 sec.	1 min. — sec.	1 min. 05 sec.	2 min. 25 sec.	2 min. 48 sec.	3 min. 13 sec.	4 min. 41 sec.	5 min. 12 sec.	6 min. 45 sec.	8 min. 21 sec.	10 min. 38 sec.
3,2	31 sec.	45 sec.	1 min. — sec.	1 min. 20 sec.	2 min. 41 sec.	3 min. 05 sec.	4 min. 31 sec.	5 min. — sec.	6 min. 05 sec.	7 min. 41 sec.	9 min. 58 sec.
3,4	30 sec.	42 sec.	57 sec.	1 min. 15 sec.	2 min. 35 sec.	3 min. 58 sec.	5 min. 22 sec.	6 min. 50 sec.	8 min. 19 sec.	9 min. 51 sec.	12 min. 25 sec.
3,6	28 sec.	40 sec.	54 sec.	1 min. 11 sec.	2 min. 30 sec.	3 min. 51 sec.	5 min. 14 sec.	6 min. 40 sec.	8 min. 08 sec.	9 min. 38 sec.	11 min. 10 sec.
3,8	27 sec.	38 sec.	51 sec.	1 min. 07 sec.	2 min. 25 sec.	3 min. 45 sec.	5 min. 07 sec.	6 min. 32 sec.	8 min. 57 sec.	10 min. 27 sec.	12 min. 57 sec.
4,0	25 sec.	36 sec.	49 sec.	1 min. 04 sec.	2 min. 21 sec.	3 min. 40 sec.	5 min. 01 sec.	6 min. 24 sec.	8 min. 49 sec.	10 min. 16 sec.	12 min. 45 sec.
4,2	24 sec.	34 sec.	47 sec.	1 min. 01 sec.	2 min. 17 sec.	3 min. 35 sec.	5 min. 55 sec.	7 min. 17 sec.	9 min. 41 sec.	11 min. 07 sec.	13 min. 34 sec.
4,4	23 sec.	33 sec.	45 sec.	58 sec.	1 min. 14 sec.	2 min. 30 sec.	4 min. 50 sec.	6 min. 11 sec.	8 min. 34 sec.	10 min. 58 sec.	13 min. 25 sec.
4,6	22 sec.	31 sec.	43 sec.	55 sec.	1 min. 11 sec.	2 min. 26 sec.	4 min. 45 sec.	6 min. 05 sec.	8 min. 28 sec.	10 min. 50 sec.	13 min. 16 sec.
4,8	21 sec.	30 sec.	41 sec.	53 sec.	1 min. 08 sec.	2 min. 23 sec.	4 min. 41 sec.	6 min. — sec.	8 min. 22 sec.	10 min. 43 sec.	13 min. 08 sec.
5,0	20 sec.	29 sec.	39 sec.	51 sec.	1 min. 05 sec.	2 min. 20 sec.	4 min. 37 sec.	6 min. 55 sec.	9 min. 16 sec.	11 min. 37 sec.	14 min. — sec.

Wir erhalten dadurch eine technische Bestrahlungsgröße, welche wir definieren, als das Produkt aus der Sekundärstromstärke, abgelesen an einem elektromagnetischen Milliampèremeter, und der Betriebszeit, dividiert durch das Quadrat der Fokaldistanz:

$$B = \frac{i \cdot T}{r^2} \quad (28)$$

Die Einheit dieser Größe muß sein

$$\frac{1 \text{ Milliampère} \cdot 1 \text{ Sekunde}}{1 \text{ Quadratcentimeter}}$$

Da es nun vornehmlich der Physiker Walter ist, welcher immer und immer wieder auf die Nützlichkeit der Dosierung mit dem Milliampèremeter hingewiesen und auch den größten Teil der theoretischen und experimentellen Grundlagen hierfür geschaffen hat, so habe ich für diese Einheit den Namen „1 Walter“ vorgeschlagen.

Selbstverständlich hat die Bestrahlung mit 1 Walter verschiedene Wirkung, jenachdem man Röhren aus dickerm oder dünnerm Glas verwendet, oder bei verschiedenem Härtegrad arbeitet. Wir können aber mit Hilfe dieser technischen Einheit unsere Röhren in bequemster Weise eichen, indem wir für jede Röhre ein für allemal feststellen, wie viel Walter bei einem bestimmten Härtegrad gegeben werden müssen, damit eine bestimmte Wirkung, z. B. eine therapeutische Volldosis, erreicht werde.

Ja, wenn einmal die experimentellen Grundlagen geschaffen sind, welche es uns ermöglichen, die Abhängigkeit der Oberflächendosis vom Härtegrade festzulegen, so wird jede Röhre vom Fabrikanten eine Tabelle mitbekommen, aus welcher zu entnehmen ist, mit wie viel Walter bei den verschiedenen Härtegraden die Volldosis erreicht wird.





Nun ist es allerdings kein besonderes Vergnügen, bei jeder Bestrahlung sich die Anzahl der Walter aus Sekundärstrom, Fokaldistanz und Betriebszeit zusammenzurechnen. Diesem Übelstand kann aber leicht abgeholfen werden.

1. Die nebenstehende Tabelle gibt diejenige Bestrahlungszeit, welche nötig ist, um bei bestimmter Fokaldistanz und bestimmter Milliampèrezahl ein Walter zu verabfolgen.

Unglücklicherweise haben wir zurzeit noch kein dezimales Zeitsystem, so daß, wenn man zum Beispiel 3,6 Walter geben will, diese unbequemen Minuten-Sekunden-Summen mit 3,6 multipliziert werden müssen.

2. Für denjenigen, welcher einigermaßen mit der graphischen Darstellung vertraut ist, wird die Benutzung der Hyperbelschar in Tafel III angenehmer sein. Die Auffindung der Bestrahlungszeit, welche für eine Waltereinheit nötig ist, nachdem man die Fokaldistanz gemessen und die Milliampèrezahl abgelesen hat, ist sehr einfach: Hat man z. B. eine Fokaldistanz von 16 cm und einen Sekundärstrom von 1,2 Milliampère, so sucht man in der Figur die Hyperbel 16 und verfolgt dieselbe bis auf die Vertikale, welche mit 1,2 Milliampère bezeichnet ist. Von diesem Punkte geht man wagrecht nach links hinüber und liest auf der vertikalen Skala unmittelbar links von den Hyperbeln 3 min. 33 sec. ab. Man hat also in diesem Falle 3 min. 33 sec. zu bestrahlen, um die Strahlungsgröße von 1 Walter zu erreichen. Auch diese Zahl ist natürlich noch zu multiplizieren mit derjenigen Anzahl von Walter, deren man zur Erreichung einer gewollten Wirkung bedarf.

Aber auch diese Multiplikation kann durch eine einfache geometrische Operation ersetzt werden. Will man z. B. 3,6 Walter verabreichen, so geht man auf der Horizontalen weiter nach links bis zu der Vertikalen, welche mit 3,6 bezeichnet ist. Von dort folgt man der eingezeichneten schiefen Richtung — gleichgültig ob nach rechts oben oder nach links unten — bis auf eine der beiden vertikalen Skalen, und liest dort die zur Verabfolgung von 3,6 Walter nötige Bestrahlungszeit ab. In diesem Beispiele findet man knapp 13 Minuten.

Die für eine bestimmte Wirkung nötige Bestrahlungszeit wird also an Hand der graphischen Darstellung Fig. 10 durch folgende einfache Operationen gefunden:

1. Man sucht auf der horizontalen Skala unter der Hyperbelschar die abgelesene Milliampèrezahl.

2. Man steigt von hier senkrecht bis auf diejenige Hyperbel, welche der gemessenen Fokaldistanz entspricht.

3. Von diesem Punkte geht man nach links bis auf diejenige Vertikale, welche der nötigen Walterzahl entspricht.

4. Man geht von diesem Punkte schräg nach rechts oben oder nach links unten in der Richtung der eingezeichneten Strahlen bis auf eine der vertikalen Skalen, und liest dort die gesuchte Bestrahlungszeit ab.

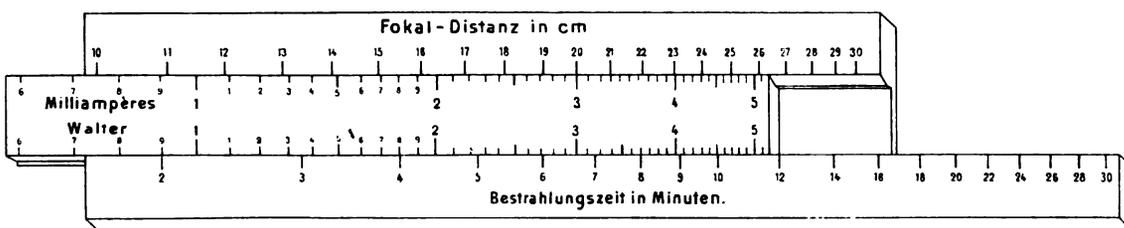


Fig. 12.

Schiebelineal zur Berechnung der Waltereinheiten.

3. Die eleganteste Lösung der Aufgabe ist aber in dem Schiebelineal verwirklicht, welches in Fig. 12 dargestellt ist. Zugleich ist die Benützung dieses Instrumentes das einfachste und sicherste Mittel zu rascher Bestimmung der Zeit, welche man braucht, um eine bestimmte Bestrahlungsgröße zu verabfolgen.

Hat man die Fokaldistanz gemessen und die Milliampèrezahl abgelesen, so verschiebt man den mittleren Teil des Lineales so weit, bis die gemessene Fokaldistanz auf die abgelesene Milliampèrezahl fällt. Dann findet man unten neben der Walterzahl, welche man verabfolgen will, die hierzu nötige Bestrahlungszeit in Minuten.

Welche von diesen drei Methoden man vorzieht, ist gewissermaßen Geschmackssache, aber auch Übungssache. Hat man sich einmal an das Schiebelineal gewöhnt, so wird man es nicht mehr missen wollen. In der Form, welche Fig. 11 zeigt, paßt das Schiebelineal für die Zwecke der Dosierung. Es könnte aber auch für Photographie entworfen werden, nur müßte man die Reihe der Fokaldistanzen nach rechts verlängern, um diejenige der Walter nach links, weil in der Photographie meist nur einige Zentiwalter oder höchstens Deziwalter gegeben werden.

Da wir die Intensitätsmessung hauptsächlich zu Zwecken der Dosierung brauchen, so soll wenigstens an dieser Stelle darauf aufmerksam gemacht werden, wie sehr sich für die photographische Technik die Angaben über Expositionsvorschriften durch Einführung der neuen Bestrahlungseinheit vereinfachen. Anstatt z. B. zu sagen, eine Aufnahme sei mit 4 Milliampères aus 45 cm Fokaldistanz in 40 Sekunden gemacht worden, genügt die einzige Angabe, man habe die Aufnahme mit 8 Zentiwalter gemacht. Für denjenigen, welcher die Aufnahme unter gleichen Bedingungen machen, d. h. den gleichen photographischen Effekt erzielen will, ist es ganz gleichgültig, ob er die Fokaldistanz etwas kleiner und dafür die Belastung etwas größer oder die Bestrahlung etwas länger macht usw., er wird doch stets den gleichen photographischen Effekt erzielen, wenn er nur, wie sein Vorgänger, 8 Zentiwalter gegeben hat (allerdings nur bei gleichem Härtegrad).

Dabei fällt auch der Fehler dahin, der so oft gemacht wird, wenn in Veröffentlichungen etwa nur die Expositionszeit und die Fokaldistanz ohne die Belastung u. dgl. angegeben wird. Solche Angaben sind natürlich für den Leser vollkommen wertlos. Gibt man aber den Härtegrad und die Walterzahl an, so hat der Leser alles erfahren, was er zu wissen braucht, um die gleiche photographische Wirkung zu erzielen, wie der Schreiber.

Bevor sich nun die Röhrenfabrikanten daran gewöhnt haben, jeder Röhre ein Dokument mitzugeben, welches besagt, mit wie viel Walter bei verschiedenen Härtegraden eine bestimmte Wirkung (z. B. eine Sabouraudvolldosis) erreicht wird, kann jeder Röhrenkäufer die neugekaufte Röhre mit Hilfe irgend eines Reagenzkörpers prüfen und in ein Protokoll den Befund eintragen. Durch wiederholte Kontrolle kann auch das Altern der Röhre an der Veränderung der jeweiligen Walterzahl genau verfolgt werden.

Damit ist die Röhre geeicht. Nur darf man nicht vergessen, daß eine einzige Bestimmung nur für denjenigen Härtegrad gilt, bei welchem sie vorgenommen wurde. Braucht man die Angabe für verschiedene Härtegrade, so muß eben die Eichung für alle besonders vorgenommen werden.

Man kann aber auch anders verfahren. Aus den Versuchen Walters läßt sich entnehmen, daß die nötige Zahl von Bestrahlungseinheiten tatsächlich in der Weise von der Glasdicke der Röntgenröhre abhängt, wie dies in unserer Gleichung (24) zum Ausdruck kommt. Ich habe dann aus den Zahlen Walters die entsprechenden Werte der technischen Bestrahlungsgröße berechnet und in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Dieselbe gilt nur für den Sabouraudschen Reagenzkörper und gibt an, wie viel Walter man verabreichen muß, um bei einer bestimmten Glasdicke und einem bestimmten Härtegrad eine Volldosis nach Sabouraud zu verabreichen.

0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	mm Glasdicke.
2,2	2,7	2,9	3,4	3,8	4,4	5,0	5,7	6,5	7,4	Walter bei B. W. 4 (6,4 mm-Strahlung).
1,8	2,1	2,3	2,5	2,8	3,1	3,5	3,8	4,2	4,7	Walter bei B. W. 5 (7,5 mm-Strahlung).

In neuester Zeit sind auch im Handel Röhren erhältlich, auf welchen die Glasdicke für den Zentralstrahl angegeben ist. Da läßt sich aus obiger Tabelle ohne weiteres entnehmen,

wie viel Walter zur Verabfolgung einer Volldosis nach Sabouraud nötig sind. Natürlich kann man auch jederzeit mit der Sabouraudpastille (s. S. 64) kontrollieren, ob die Angabe der Tabelle stimmt.

Auf die Bedeutung dieser wesentlichen Vereinfachung für die Dosierung werden wir im dritten Teil (S. 90 ff.) zurückkommen müssen.

Lehrreich aber ist die Tabelle auch insofern, als sie zeigt, welchen bedeutenden Einfluß die Glasdicke der Röntgenröhre auf die Intensität der Strahlung ausübt, wenn eine Zunahme des Härtegrades um eine einzige Nummer der B. W.-Skala die Intensität bei dünnem Glas (0,2 mm) im Verhältnis von 2,2 zu 1,8, also um knapp ein Viertel, und bei dickem Glas (1,1 mm) von 4,7 auf 7,4, also um reichlich die Hälfte zunimmt.

Damit sind die primären oder elektrodynamischen Meßmethoden erledigt, d. h. die Versuche, die Röntgenenergie zu bestimmen auf Grund derjenigen Transformationen, welche zur Entstehung der Röntgenenergie führen. Wir wenden uns im folgenden zu den sekundären oder radiodynamischen Methoden, d. h. zu den Versuchen, die Röntgenenergie zu bestimmen auf Grund derjenigen Transformationen, welche die Röntgenenergie weiterhin eingeht.

### G. Sekundäre Transformationen.

#### 1. Theorie. Wirkungsgesetz.

Wären die primären Transformationen von vornherein gegeben, indem wir sie zur Erzeugung der Röntgenenergie schlechterdings nicht entbehren können, so steht es uns andererseits frei, die Röntgenenergie weiter in irgend eine andere Energieform umzuwandeln, soweit überhaupt eine solche Möglichkeit besteht.

Von vornherein müssen wir aber feststellen, daß (mit Ausnahme der allerneuesten radioelektrischen Methoden, die ihre Feuerprobe erst noch bestehen müssen) es bis heute nicht gelungen ist, eine Transformation ausfindig zu machen, deren Nutzeffekt meßbar oder wenigstens konstant wäre. Die sekundären oder radiodynamischen Meßverfahren sind also hierin durchaus in keiner Weise im Vorteil gegenüber den primären, wenngleich die bisher übliche Bezeichnung „direkte Methoden“ eine anbestimmte Vorstellung von größerer Zuverlässigkeit erwecken mußte. Erst wenn einmal der Beweis geleistet ist, daß bei einer bestimmten Transformation der Nutzeffekt entweder bestimmbar oder mit mehr Sicherheit als bei den andern Transformationen als konstant gelten darf, dann verdient die darauf begründete Methode den Vorzug vor den andern.

Dies und die Zuverlässigkeit der betreffenden Energiemessung ist das einzige Kriterium für die Brauchbarkeit und Vorzüglichkeit irgend einer Meßmethode.

Diejenigen Energieformen, in welche die Röntgenenergie transformiert werden kann, sind

1. Phosphoreszenz,
2. Fluoreszenz,
3. Elektrizität,
4. Ionisation,
5. Wärme,
6. Chemische Wirkungen.

Es sollen im folgenden sowohl alle diese Möglichkeiten als die darauf beruhenden Versuche der Begründung von Meßmethoden Revue passieren.

Diese Zusammenstellung ist bereits von Wertheim-Salomonsen in seinem Bericht im Namen der „Kommission zur Festsetzung fester Normen für die Messung der Intensität der Röntgenstrahlen“ gegeben worden. Auch hat dieser Physiker schon damals ausdrücklich darauf aufmerksam gemacht, daß alle diesbezüglichen Meßverfahren durchaus wertlos sind ohne gleichzeitige Berücksichtigung des Härtegrades.

Wir haben ja bereits darauf hingewiesen, daß eine Strahlung nur da wirken kann, wo sie in eine andere Energieform transformiert wird, denn jede „Wirkung“ ist eine Energie-Transformation. Transformiert wird aber eine Strahlung nur da, wo sie absorbiert wird. Eine „Wirkung“ in dem absorbierenden Körper hat nur der absorbierte Anteil an Strahlungsenergie.

Wenn wir also aus der Wirkung einer Strahlung einen Schluß auf deren Energie ziehen wollen, so ist hierzu unerläßliche Vorbedingung, daß wir wissen, welcher Anteil der Strahlung in dem einzelnen Falle gewirkt hat, d. h. welcher Anteil absorbiert wurde, mit andern Worten, welches der Nutzeffekt dieser Wirkung war.

Nun hängt aber der Anteil an absorbierter Strahlung von deren Härtegrad ab. Je härter eine Strahlung ist, desto geringer ist — *ceteris paribus* — der von ihr absorbierte Anteil. Haben also zwei verschieden harte Strahlen gleiche Wirkung irgend welcher Art, so sind ihre Energien nicht gleich, sondern die Energie der härteren Strahlung ist größer, weil ein kleinerer Anteil, der vor ihr absorbiert wurde, genügt, um die gleiche Wirkung hervorzubringen, welche der größere Anteil an weicherer Strahlung erzeugt hatte.

Dieser Punkt ist so wichtig und ist so oft und viel übersehen worden, daß ich mir nicht versagen kann, noch ein Zahlenbeispiel anzuführen.

Nehmen wir an, daß irgend ein Reagenzkörper, aus dessen Veränderungen wir auf die Energie der Strahlung schließen wollen, von dieser Strahlung 25 % absorbiere. Dann wissen wir, daß die Gesamtenergie der Strahlung viermal größer ist, als man aus der gemessenen Wirkung schließen müßte.

Nun führen wir die gleiche Bestimmung mit einer härteren Strahlung aus, von welcher der Reagenzkörper nur 12,5 % zu absorbieren vermag, und bestrahlen wieder bis zum Eintritt der gleichen Wirkung. Dann ist in diesem zweiten Falle die Energie nicht viermal, sondern achtmal größer, als man aus der beobachteten Wirkung schließen müßte. Die Energie der härteren Strahlung ist also doppelt so groß, verglichen mit der Energie der weicheren Strahlung, obgleich die Wirkung auf den Reagenzkörper die gleiche war.

Ein Vergleich aus der Mechanik dürfte das Gewonnene sichern: An einem Faden ist ein schweres Stück Holz aufgehängt. Auf dieses Holzstück wird ein Schuß aus großer Entfernung, aber mit einem großen Projektil abgegeben. Das Projektil bleibt in dem Holz stecken und aus der Höhe, bis zu welcher dieses „ballistische Pendel“ gehoben wird, kann man die Wucht des Aufpralles berechnen.

Nun geben wir auf das gleiche Holzstück einen zweiten Schuß ab, mit kleinem Kaliber, dafür aber aus um so größerer Nähe. Die Distanz soll so berechnet sein, daß in beiden Fällen die Wucht des Aufpralles die gleiche ist. Es ist hierzu bloß nötig, daß die Geschwindigkeiten in den beiden Fällen sich umgekehrt verhalten wie die Quadratwurzeln aus den Gewichten der beiden Projektile.

Vermöge der größeren Geschwindigkeit wird aber das kleinere Geschöß das Holz glatt durchschlagen und nachher noch mit einer gewissen — allerdings verminderten — Geschwindigkeit weiter fahren. Trotzdem nach unserer Voraussetzung die Wucht des Aufpralles in beiden Fällen die gleiche ist, wird bei unserm zweiten Schuß das Pendel bedeutend weniger hoch ausschlagen als beim ersten, nicht wegen Verschiedenheit der ausgesandten Energie, sondern wegen Verschiedenheit des absorbierten Anteiles derselben.

Wir werden auf diesen grundlegend wichtigen Punkt bei jeder der folgenden Meßmethoden Rücksicht nehmen müssen. Es ist daher nötig, daß wir uns über den absorbierten Anteil an Strahlungsenergie in jedem einzelnen Falle ein klares Bild machen können.

Wir nennen, wie gewohnt,  $x$  die Dicke der absorbierenden Schicht und  $a$  die Halbwertschicht der gegebenen Strahlung für das betreffende absorbierende Material, ferner  $E_0$  die ganze und  $E$  die durch Absorption in dieser Schicht geschwächte Strahlungsenergie. Die

Differenz  $E_0 - E$  stellt dann den in der Schicht absorbierten Anteil an Strahlungsenergie dar, und der prozentuale Anteil muß nach Gleichung (4) den Wert haben:

$$\frac{E_0 - E}{E_0} = 1 - \frac{1}{2^{\frac{x}{a}}} \quad (29)$$

Diese Formel vereinfacht sich ganz beträchtlich, wenn man sie auf sehr dünne Schichten anwendet, d. h. auf solche Werte von  $x$ , die viel kleiner sind als  $a$ , also überall da, wo die absorbierende Schicht viel dünner ist als die Halbwertschicht. Ist  $\frac{x}{a}$  ein kleiner Bruch, so wird

$$\frac{1}{2^{\frac{x}{a}}} = 1 - \frac{x}{a} \cdot \log. \text{ nat. } (2) = 1 - \frac{7 \cdot x}{10 \cdot a} \quad (30)$$

und damit

$$\frac{E_0 - E}{E_0} = \frac{7 \cdot x}{10 \cdot a} \quad (31)$$

In Worten läßt sich dieses Ergebnis so ausdrücken: Eine sehr dünne Schicht von der Dicke  $x$ , in welcher die Röntgenstrahlen eine Halbwertschicht  $a$  haben, absorbiert von der durchgehenden Strahlung  $\frac{x}{a} \cdot 70\%$ .

Es darf dabei  $\frac{x}{a}$  höchstens  $= 0,2$  sein, wenn die Berechnung auf  $10\%$  des Resultates genau sein soll.

Die Wirkung einer, in einem Raumelement absorbierten Strahlungsenergiemenge auf dieses Raumelement muß direkt proportional sein dieser Energiemenge und umgekehrt proportional dem Volumen des Raumelementes, denn wenn sich eine gegebene Energiemenge auf ein großes Volumen verteilt, so muß ihre Wirkung auf die betreffende Materie geringer sein, gegenüber einem kleinen Raumelement, welches die gleiche Strahlungsenergiemenge absorbiert.

Bezeichnen wir das Volumen des durchstrahlten Körpers mit  $V$ , so ist eines seiner Raumelemente gleich  $dV$  und die darin absorbierte Energiemenge gleich  $-dE$  (das negative Vorzeichen ist nötig, weil die Energie der Strahlung beim Vordringen nicht zu, sondern abnimmt). Die Wirkung der absorbierten Strahlenmenge auf das Raumelement ist daher

$$w = \varepsilon \cdot \frac{-dE}{dV}, \quad (32)$$

wobei der Proportionalitätsfaktor  $\varepsilon$  von bestimmten spezifischen Eigenschaften des absorbierenden Materiales abhängig ist, nicht aber von dessen Absorptionsfähigkeit für die Strahlung.

Ist nun  $f$  die Oberfläche unseres Raumelementes, die wir uns senkrecht zu der Strahlenrichtung denken, so ist sein Volumen

$$dV = f \cdot dx \quad (33)$$

Erinnern wir uns ferner an Gleichung (13), mit welcher die Flächenenergie  $F$  definiert wurde, so leitet sich daraus ab:

$$dE = f \cdot dF \quad (34)$$

und durch Division der Gleichungen (33) und (34) erhält man

$$\frac{dE}{dV} = \frac{dF}{dx} \quad (35)$$

und nach Gleichung (32)

$$w = \varepsilon \cdot \frac{-dF}{dx} \quad (36)$$

Dies ist für unsere folgenden Untersuchungen die wichtigste Gleichung; ihr Sinn, in Worten ausgedrückt, ist folgender:

Die Wirkung einer Strahlung auf ein absorbierendes Medium ist proportional der Abnahme der Flächenenergie mit der Tiefe.

Man kann aber auch Gleichung (14) benützen und daraus ableiten

$$dF = T \cdot dI \quad (37)$$

wodurch dann Gleichung (36) übergeht in

$$W = E \cdot T \cdot \frac{-dI}{dx} \quad (38)$$

oder in Worten:

Die Wirkung einer Strahlung auf ein absorbierendes Medium ist proportional der dem Produkt aus der Bestrahlungszeit und der Abnahme der Intensität mit der Tiefe.

Man wird sich aber leicht überzeugen, daß die Einführung der Flächenenergie eine Vereinfachung bedeutet, indem die Gleichung (36) eine Größe weniger enthält, als Gleichung (38). Im erstern Fall hat man sich um die Länge der Bestrahlungszeit nicht zu kümmern.

Solange man nun mit sehr dünnen Schichten arbeitet, d. h. mit solchen, deren Dicke höchstens  $\frac{1}{5}$  der Halbwertschicht beträgt, darf man nicht nur die Formeln für dünne Schichten anwenden, sondern man hat auch das Recht, von der Härtung der Strahlung abzusehen. Dann darf man für die Abnahme der Energie mit der Tiefe die Formel

$$E = \frac{E_0}{2^{\frac{x}{a}}} \quad (39)$$

anwenden und ebenso für die Flächenenergie

$$F = \frac{F_0}{2^{\frac{x}{a}}} \quad (40)$$

und für die Intensität

$$I = \frac{I_0}{2^{\frac{x}{a}}} \quad (41)$$

woraus wir entnehmen

$$\frac{1}{E_0} \cdot \frac{-dE}{dx} = \frac{1}{F_0} \cdot \frac{-dF}{dx} = \frac{1}{I_0} \cdot \frac{-dI}{dx} = \frac{1}{a} \cdot \log. \text{ nat. } (2) = \frac{7}{10 \cdot a} \quad (42)$$

und damit gehen die Gleichungen (36) und (38) über in

$$W = \frac{7 \cdot E \cdot F_0}{10 \cdot a} \quad (43)$$

oder, wenn man alle Konstanten in eine einzige,  $E^*$ , vereinigt,

$$W = \frac{E^* \cdot F_0}{a} \quad (44)$$

Dies ist die Hauptgleichung zur Beurteilung der Wirkung einer Strahlung auf eine dünne absorbierende Schicht. Ihr Sinn, in Worten ausgedrückt, ist folgender:

**Die Wirkung einer Strahlung auf eine dünne Schicht eines absorbierenden Mediums ist proportional ihrer Flächenenergie und umgekehrt proportional ihrer Halbwertschicht in dem absorbierenden Medium.**

Zieht man vor, mit dem Begriff der Intensität zu argumentieren, so geht man von den Gleichungen (38) und (42) aus und erhält:

$$W = \frac{E^* \cdot T \cdot I_0}{a} \quad (45)$$

d. h. die Wirkung einer Strahlung auf eine dünne Schicht eines absorbierenden Mediums ist proportional dem Produkt aus der Bestrahlungszeit und der Intensität der Strahlung und umgekehrt proportional ihrer Halbwertschicht in dem absorbierenden Medium.

Auch hier wieder ist sowohl die Formel, wie das in Worten ausgedrückte Gesetz einfacher, wenn man mit dem Begriff der Flächenenergie argumentiert, anstatt mit der Intensität.

Ganz anders gestalten sich die Verhältnisse, wenn es gelingt, die ganze Strahlungsenergie zur Absorption zu bringen. In diesem Falle ändert sich die Wirkung nicht mit dem Härtegrad. Sie ist dann einfach der Flächenenergie proportional, und wir haben in der Wirkung ein unzweideutiges Maß für die Flächenenergie gefunden. Wir werden sehen, daß dies auf zwei Arten möglich sein dürfte.

Alle bisherigen Meßmethoden sind indessen auf die Wirkung der Röntgenstrahlen auf mehr oder weniger dünne Schichten begründet. Wir werden also für alle diese Meßmethoden von Gleichung (44), bzw. von dem Wirkungsgesetz für dünne Schichten Gebrauch machen.

## 2. Die einzelnen Transformationen.

### a) Wärmewirkung der sekundären Kathodenstrahlen.

Wenn wir die von Köhler eingeführte Messung der Erwärmung der Röhrenwand am Schluß der elektrodynamischen Methoden besprochen haben, so geschah es nur aus dem Grunde, weil sich die Besprechung dort am besten anschließen ließ. Die Köhlersche Methode ist aber weder eine „primäre“ noch eine „sekundäre“ Messung, in dem von festgelegten Sinne; denn sie mißt weder eine Energie, welche in Röntgenenergie transformiert wird, noch eine solche, welche aus Röntgenenergie entsteht, sondern ein Nebenprodukt, welches gleichzeitig mit den Röntgenstrahlen aus den Kathodenstrahlen hervorgeht. Über weitere Einzelheiten vergleiche Seite 48 und 80.

### b) Die Phosphoreszenz.

Die phosphoreszenzerregende Wirkung der Röntgenstrahlen ist von Wertheim-Salomonson geprüft worden. Zur Verwendung gelangte Balmainesche Leuchtfarbe. Die Ergebnisse waren nicht sehr ermutigend, indem die Stärke der Phosphoreszenz sich allzusehr von der Temperatur abhängig erwies.

### c) Die Fluoreszenz.

Von der fluoreszenzerregenden Wirkung der Röntgenstrahlen ist ein weitgehender Gebrauch gemacht worden. Schon Röntgen selbst hat seine ersten klassischen Versuche über Absorption seiner Strahlen durch Vergleich von Intensitäten auf Grund gleicher Fluoreszenzhelligkeiten ausgeführt.

#### α) Röntgens Versuche.

Gehen von zwei Röntgenröhren Strahlungen von verschiedener Intensität aus, so wird unter der Wirkung der stärkern Intensität der Leuchtschirm heller fluoreszieren, als unter der Wirkung der schwächern. Bringt man aber die stärkere Strahlenquelle in größere Entfernung vom Leuchtschirm, so wird ihre fluoreszenzerregende Wirkung dementsprechend schwächer. Geht man so weit, bis die beiden Fluoreszenzhelligkeiten gleich geworden sind, so verhalten sich die Intensitäten der beiden Strahlungen — in gleicher Fokaldistanz gedacht — wie die gemessenen Fokaldistanzen.

Dieser Schluß bedarf aber einer wichtigen Beschränkung. Er gilt nur für Strahlungen gleichen Härtegrades. Haben wir nämlich zwei Röntgenstrahlungen von verschiedenem Härtegrad, so wird von der härtern Strahlung ein geringerer Anteil in dem fluoreszierenden Material absorbiert, als von der weichern. Wir müssen unter Berücksichtigung dieser Tatsache die Größe der tatsächlichen Wirkung erst berechnen.

Da der Leuchtschirm eine ziemlich dünne Schicht darstellt, so dürfen wir Gleichung (45) anwenden und finden dann für die fluoreszenzerregende Wirkung der ersten Strahlung:

$$W_1 = E^* \cdot \frac{T \cdot I_1}{a_1} \quad (46)$$

und für die zweite

$$W_2 = E^* \cdot \frac{T \cdot I_2}{a_2} \quad (47)$$

worin  $a_1$  und  $a_2$  die Halbwertschichten der beiden Strahlungen in der fluoreszierenden Substanz, d. h. im Baryumplatinzyanür bedeuten.

Da nun die Wirkungen sich umgekehrt verhalten wie die Quadrate der Fokaldistanzen,  $r_1$  und  $r_2$ , so wird

$$\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 = \frac{W_1}{W_2} = \frac{I_1 \cdot a_2}{I_2 \cdot a_1} \quad (48)$$

oder

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 \cdot \frac{a_1}{a_2} \quad (49)$$

Bezeichnet man mit dem Index 2 die weichere und mit 1 die härtere Strahlung, so ist die Halbwertschicht  $a_1$  im Ba-Pt-Cy größer als  $a_2$ , und somit wird der Quotient  $\frac{a_1}{a_2}$  größer als Eins. Die Intensität der harten Strahlung ist also, verglichen mit derjenigen der weichen, größer, als man sie nach der bloßen Berücksichtigung der Fokaldistanz berechnen würde.

Dies ist ein Ergebnis, auf welches wir bei allen, auf Absorption im Ba-Bt-Cy begründeten Meßmethoden stoßen müssen. Es ist daher eine der wichtigsten und dringendsten Aufgaben für die künftigen Forschungen auf diesem Gebiete, daß die Halbwertschichten der verschiedenen Strahlungen im Ba-Pt-Cy sorgfältig festgestellt werden. Mit andern Worten: wir müssen wissen, welche Halbwertschichten im Ba-Pt-Cy bestimmten Halbwertschichten im destillierten Wasser entsprechen.

#### β) Der Röntgenlichtmesser nach Roiti.

Roiti hat im Jahre 1896 eine Vorrichtung bekannt gegeben, welche dazu dient, die Stärke der durch Röntgenlicht erzeugten Fluoreszenz mit einer konstanten Lichtquelle zu vergleichen. Von größter Wichtigkeit bei allen derartigen Einrichtungen ist die Forderung, daß die beiden Vergleichsfelder den gleichen Farbenton haben müssen. Anders ist es nicht möglich, ein sicheres Urteil über die beiden zu vergleichenden Helligkeiten zu gewinnen.

Roiti sucht dieser Forderung gerecht zu werden, daß er seine Vergleichslichtquelle, eine Glühlampe, hinter ein Kobaltglasfilter setzt. Wertheim-Salomonson, welcher das Instrument geprüft hat, kommt indes zu dem Ergebnis, daß die Farbdifferenz zwischen den beiden Vergleichsfeldern zu beträchtlich sei, um einen zuverlässigen Vergleich zu ermöglichen.

#### γ) Die Radiummethode nach Courtade.

Bei der nahen Verwandtschaft der Radiumstrahlen und der Röntgenstrahlen lag es nahe, die durch diese beiden Strahlungen hervorgerufenen Fluoreszenzen miteinander zu vergleichen. Auch scheint diese Methode einwandfrei, falls man imstande ist, stets ein gleich wirksames Radiumpräparat zu verwenden. Immerhin darf man mit Rücksicht auf das Seite 57 ff. Gesagte die Intensitäten der beiden Strahlungen nicht einfach einander gleichsetzen, weil die Radiumstrahlung — abgesehen von der  $\gamma$ -Komponente — viel weicher ist, als alle technisch verwendbaren Röntgenstrahlen. Außerdem behält die Radiumstrahlung ihren Härtegrad stets unverändert bei, während die damit zu vergleichenden Röntgenstrahlen von sehr verschiedenem Härtegrad sein werden.

Sieht man aber von diesem Einwand ab, so kann man mit der Courtadeschen Meßmethode immerhin bestimmte Vergleichszahlen für je einen bestimmten Härtegrad ableiten. Man läßt die beiden Strahlungen auf den gleichen Leuchtschirm wirken und regelt die Fokaldistanz der Röntgenröhre so, daß die beiden Vergleichsfelder gleich hell erscheinen. Als Maß dient dann das reziproke Quadrat der Fokaldistanz.

Auf eine Fehlerquelle sei hier noch hingewiesen: Bei Nichtgebrauch muß die Radiumkapsel gegen den Leuchtschirm abgeschlossen sein, denn unter fortwährender Bestrahlung ermüdet der Leuchtschirm und seine Fluoreszenz erscheint dann zu gering, so daß man für die Röntgenstrahlung eine zu hohe Intensität abliest:

δ) Messung der Flächenenergie nach Gaiffe.

Die soeben erwähnte Eigenschaft des Ba-Pt-Cy, daß seine Fluoreszenzfähigkeit unter fortgesetzter Strahlenwirkung abnimmt, ist von Gaiffe in hübscher Weise zu einer Methode für Messung der Flächenenergie ausgearbeitet worden.

Je länger die Strahlung gewirkt hat, um so weniger hell fluoresziert die bestrahlte Stelle. Andererseits ist aber die Abnahme der Fluoreszenz auch um so beträchtlicher, je größer die Intensität der Strahlung war. Man mißt also mit der Fluoreszenzermüdung das Produkt aus Intensität und Bestrahlungszeit, oder mit andern Worten die Flächenenergie.

Die Messung wird in folgender Weise ausgeführt: Ein Stück Leuchtschirm bleibt zur Hälfte frei, während die andere Hälfte durch eine Reihe von Schichten zunehmender Undurchlässigkeit bedeckt ist. Läßt man eine Röntgenstrahlung auf einen solchen Apparat fallen, so erscheint die unbedeckte Hälfte am hellsten, während die andere Hälfte mehrere Felder von abnehmender Helligkeit aufweist (Fig. 13a). Wird nun einige Zeit lang bestrahlt, so ermüdet das freie Feld am stärksten, weil es die größte Flächenenergie erhalten hat. Es muß also einmal ein Augenblick kommen, in welchem die Helligkeit des freien Feldes so stark abgenommen hat, daß es nur noch die Helligkeit des ersten Skalenfeldes aufweist. Es verschwindet dann die Grenze zwischen diesen beiden Feldern (Fig. 13b). Bestrahlt man noch länger, so erscheint das freie Feld sogar noch dunkler als das erste Skalenfeld und die Grenze wird wieder erkennbar. Dafür verschwindet die Grenze zwischen dem freien Felde und dem zweiten Skalenfeld, weil nun an dieser Stelle die Fluoreszenzhelligkeiten gleich geworden sind (Fig. 13c) usw.

Selbstverständlich gilt auch hier die Beschränkung, daß der Einfluß des Härtegrades nicht berücksichtigt ist, falls man nicht die Absorptionsverhältnisse im Ba-Pt-Cy mit in Rechnung zieht.

Endlich ist gegen die Zuverlässigkeit dieser Methode gesagt worden, daß die Fluoreszenzermüdung des Ba-Pt-Cy allzusehr von der Qualität des Präparates, namentlich auch von der Natur des Bindemittels abhängig sei.

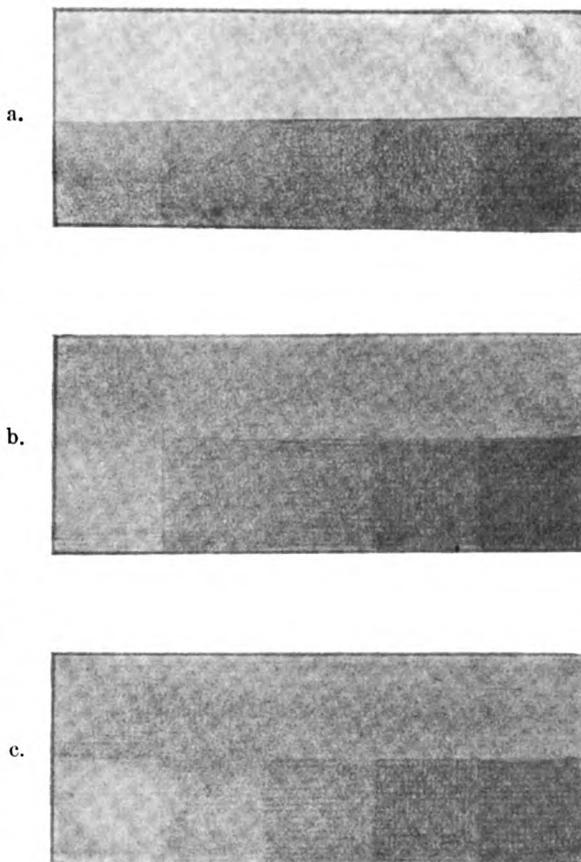


Fig. 13 a, b, c.  
Fluoreszenzermüdung.

ε) Die Schwellenwertmethode nach Tonsey.

Man kann die Leistung einer Strahlenquelle darnach messen, daß man festzustellen sucht, wie weit man sich von ihr entfernen kann, bis ihre Wirkung nicht mehr wahrnehmbar ist.

Haben wir bei den Härtemessungen die Schwellenwertmethoden verworfen, weil sie nicht nur den Härtegrad, sondern auch die Intensität, also eigentlich keine dieser Größen für sich allein messen, so wäre an dieser Stelle der gleiche Einwand am Platze. Aber wir wissen ja, daß auch alle andern Fluoreszenzmethoden an dem Fehler leiden, daß sie den Härtegrad nicht berücksichtigen. In diesem Punkte wäre die Schwellenwertmethode den übrigen Fluoreszenzmethoden ebenbürtig.

Dagegen ist der Schwellenwert selbst eine so schlecht bestimmbare Größe, daß die Messungen recht ungenau werden. Nicht nur sind verschiedene Augen verschieden empfindlich (man denke z. B. an die sogenannten „nachtblinden“ Individuen), sondern auch ein und dasselbe Individuum ist von außerordentlich verschiedener Lichtempfindlichkeit je nach dem Grad der vorausgegangenen Beanspruchung seines Sehapparates. Um sicher zu gehen, müßte man das Auge doch mindestens eine Viertelstunde im Dunkeln ausruhen lassen, eine Vorschrift, welche nicht gerade zur Popularisierung der Methode beitragen dürfte. Nach den Erfahrungen von Wertheim-Salomonsen genügt nicht einmal ein halbstündiger Aufenthalt im Dunkeln, um einen konstanten Schwellenwert zu erreichen.

d) Die radioelektrischen Methoden.

α) Transformation in elektrische Ladung.

1\*. Strommessung.

Bedeckt man zwei in Kochsalzlösung eingesenkte Elektroden mit AgCl oder CuCl, und bestrahlt die eine von ihnen, so entsteht eine Potentialdifferenz, und infolge davon ein Strom zwischen den beiden Elektroden, welcher mit einem hochempfindlichen Galvanometer gemessen werden kann. Die Methode ist für das Röntgenlaboratorium zu subtil. Außerdem sind nur bei kurz dauernden Bestrahlungen die Ablenkungen der Flächenenergie proportional.

2\*. Spannungsmessung.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Methoden haben den einen unschätzbaren Vorteil, daß ihre Ergebnisse vom Härtegrad der Strahlung unabhängig sind.

Dies kommt daher, daß die Strahlung von Metallstücken aufgefangen wird, welche nicht, wie alle übrigen Reagenzkörper, die harten Strahlen weniger absorbieren als die weichen, sondern stets die ganze Strahlung in sich aufnehmen, d. h. transformieren. Der Nutzeffekt dieser Transformation ist also stets gleich Eins. Allerdings, was wir messen, die elektrische Ladung, stellt nicht die ganze Strahlungsenergie dar, indem ja neben dieser Ladung auch noch Sekundärstrahlen und Wärme entstehen. Immerhin haben wir Grund anzunehmen, daß das Verhältnis zwischen der Sekundärstrahlenenergie und der Energie der elektrischen Ladung ein konstantes sei, so daß der Nutzeffekt für die Transformation der Strahlungsenergie, wenn auch nicht mehr gleich Eins, so doch eine Konstante, d. h. eine von dem Härtegrade unabhängige Größe ist.

Andrerseits muß gesagt werden, daß die Spannung, welche die so erzeugte Ladung hat, noch nicht die Energie der Ladung mißt. Hierzu müßte die Elektrizitätsmenge, welche auf diese Spannung gebracht wurde, gemessen und mit der Spannung multipliziert werden. Ferner ist es bei den außerordentlich geringen Werten, welche diese Größen annehmen, nicht möglich, diese Elektrizitätsmengen verlustlos aufzuhäufen.

Dagegen läßt sich wahrscheinlich gegenüber dem Zufluß an Elektrizität, welcher unter der Röntgenstrahlung entsteht, der Abfluß so regulieren, daß sich in kurzer Zeit ein stationärer

Zustand einstellt, aus dessen Spannung man — zwar nicht mehr die Flächenenergie — wohl aber die Intensität ableiten kann.

Dabei ist von größter Wichtigkeit, daß der Nachweis erbracht werde, in welcher Weise in jedem einzelnen Falle dieser stationäre Zustand sich einstellt, und dies ist ein Punkt, welchen die Erfinder in ihren Veröffentlichungen gewöhnlich mit Stillschweigen übergehen.

Es genügt nämlich durchaus nicht, den Nachweis zu erbringen, daß die von dem Instrument angezeigte Intensität mit dem Quotient der Entfernung abnimmt. Denn man kann ja einfach das Instrument so eichen, daß dieses Verhältnis besteht. Damit ist aber noch längst nicht bewiesen, daß nicht irgendwelche äußere Verhältnisse die Angaben des Instrumentes so fälschen, daß es heute anders zeigt als morgen. Dazu ist vor allem der Beweis zu erbringen, daß der Abfluß der Elektrizität stets in der gleichen Weise stattfindet und durch keine äußern Einflüsse verändert werden kann. Es ist dies eine sehr wichtige Forderung, welche man an alle Instrumente stellen muß, deren Prinzip auf der Einstellung auf einen stationären Zustand beruht.

Außerdem müßte der Beweis erbracht werden, daß diese Ladung tatsächlich aus den Röntgenstrahlen entsteht, und nicht etwa eine Feldwirkung ist.

#### $\alpha^*$ ) Methode Piffard.

Piffard hat folgendes Verfahren empfohlen: Eine Messingkugel von 3 cm Durchmesser wird in den Bereich des Strahlenkegels gebracht und mit einem genügend weit entfernten Elektroskop verbunden. Die Änderung im Ausschlag seiner Metallplättchen soll „jede Änderung im Sekundärkreis“ anzeigen. Ob diese Angabe später genauer präzisiert wurde, und ob das Prinzip zu einer praktisch brauchbaren Methode ausgearbeitet worden ist, blieb mir unbekannt.

#### $\beta^*$ ) Methode Beez.

Auf einem ähnlichen Gedanken beruht das von Beez konstruierte Instrument. Es besteht aus zwei verschieden großen Kollektorsonden, welche durch die Strahlung elektrisch geladen werden. Infolge ihrer verschiedenen Größe entsteht zwischen den beiden Empfängerplatten eine Spannungsdifferenz.

Hier handelt es sich sicherlich um die Einstellung auf einen stationären Zustand, denn der Erfinder gibt an, es sei eine solche Eichung angebracht worden, daß man an der Skala direkt ablesen könne, wie viel Zeit man zu bestrahlen habe, um eine bestimmte biologische Wirkung zu erzielen.

#### $\gamma^*$ ) Methode Fürstenau.

Auch das von Fürstenau neuerdings veröffentlichte Instrument verwertet die elektrische Ladung, welche auf metallischen, von Röntgenstrahlen getroffenen Körpern entsteht. Die sehr geringe Spannung, welche diese Ladung hat, wird durch einen Habichtschens Multiplikator so vergrößert, daß die Ablesungen Werte zwischen 100 und 1000 Volt ergeben.

#### $\beta$ ) Die Selenzelle nach Forster.

Forster hat eine Wirkung der Röntgenstrahlen entdeckt, welche darin besteht, daß unter ihrem Einfluß der Widerstand einer Selenzelle sich verändert. Ruhmer und Levy haben eine Meßmethode auf diesem Prinzip aufgebaut. Die Methode soll nicht einfach sein. Eingang in die Praxis hat sie nicht gefunden.

#### $\gamma$ ) Die Ionisation.

Die Röntgenstrahlen haben die Eigenschaft, daß sie die Luft, welche sie durchsetzen, ionisieren, d. h. deren elektrischen Leitungswiderstand herabsetzen. Richtige Vergleichswerte erhält man aber nur dann, wenn die Spannung der Ladungen hoch genug ist, daß der Sättigungsstrom zustande kommt. In diesem Falle kann man annehmen, daß die Ionisation als Maß

für die Röntgenstrahlen gelten darf. Immerhin ist zu erwarten, daß die ionisierende Wirkung der Röntgenstrahlen dem absorbierten Anteil der Röntgenenergie proportional sei. Auch hier wird man also für harte Strahlen relativ zu niedrige Werte erhalten.

Nun haben aber diesbezügliche Versuche gezeigt, daß dies nicht in gleich hohem Maße der Fall ist, wie bei andern Methoden. Eine mögliche Erklärung ist die, daß mit zunehmendem Härtegrad die Halbwertschicht in Luft nicht so rasch zunimmt, wie in andern Stoffen, die zu Vergleichsmessungen gedient haben. Es sind aber alle diesbezüglichen Kontrollmessungen ganz besonders schwierig, weil gerade bei der Luft die an und für sich kleine Menge absorbiertes Strahlung durch beigemischte Sekundärstrahlen verschiedenster Provenienz in ihrer Intensität wesentlich verändert werden kann.

Gemessen wird die Ionisation durch Beobachtung der Stromstärke des Sättigungsstromes, welcher durch die ionisierte Luft zustande kommt, oder durch die Zeit, welche ein geladenes Elektrometer braucht, um sich durch die ionisierte Luftstrecke hindurch der Hälfte seiner Ladung zu entledigen.

Auch diese Methode hat in die Praxis der Röntgentechnik noch nicht Eingang gefunden.<sup>1)</sup>

#### e) Wärme.

Auf den meisten Gebieten ist diejenige indirekte Energiemessung die beste, bei welcher die nicht direkt meßbare Energieform in Wärme umgewandelt wird. Dies hat seinen Grund darin, daß hierbei in der Regel die Forderung der Restlosigkeit am besten gewahrt bleibt, d. h. der Nutzeffekt ist meist bei der Transformation in Wärme am größten, wenn nicht geradezu gleich Eins. Es geht ja überhaupt am Ende aller Dinge jede Energie in Wärme, d. h. in ungeordnete Molekularbewegung über.

Für die Röntgenenergie trifft dies aber nicht zu. Es ist im Gegenteil bei allen bisherigen Versuchen die Ausbeute an Wärmeenergie so gering gewesen, daß man sich lange darum gestritten hat, ob sie überhaupt nachweisbar sei. Dorn, Rutherford und Clung haben die durch Absorption von Röntgenstrahlen erzeugte Wärme gemessen. Leininger hat ein negatives Resultat erhalten. Angerer hat die Resultate Dorns wieder bestätigt.

Begreiflicherweise sind die auf solchen subtilen Messungen beruhenden Methoden im Röntgenlaboratorium nicht verwendbar.

#### f) Chemische Wirkungen.

Unter den chemischen Wirkungen, deren Zahl groß ist, steht als die bekannteste obenan:

##### a) Die photographische Wirkung,

das heißt die Lockerung des Bromsilbermoleküles.

##### 1\*. Theorie.

Selbstverständlich kann auch hier wieder nur derjenige Anteil an Röntgenenergie in Betracht fallen, welcher in den Bromsilbermolekülen absorbiert wird. Auch hier werden wir also bei harter Strahlung eine relativ zu geringe Wirkung registrieren.

Den Vorteil aber hat die photographische Methode, daß sie nicht die Intensität, sondern die Flächenenergie mißt, denn die photographische Wirkung wächst nicht nur mit der Intensität, sondern gleichzeitig auch mit der Bestrahlungszeit. Sie geht mit dem Produkte der beiden Größen, also mit der Flächenenergie parallel.

Ich sage absichtlich „geht parallel“, nicht „ist proportional“, denn es besteht tatsächlich keine Proportionalität. Je größer die Flächenenergie bereits ist, desto geringern Einfluß hat eine weitere Zunahme derselben.

Die Reziprozität zwischen Intensität und Bestrahlungszeit dagegen ist eine absolute. Sie ist so genau, daß sich mit ihrer Hilfe die geringe Absorption der Röntgenstrahlen in der Luft nachweisen, und ihrem quantitativen Betrage nach einigermaßen abschätzen läßt. Diese

<sup>1)</sup> Siehe Anhang.

Reziprozität verlangt, daß bei der Vergrößerung der Fokaldistanz auf das Doppelte, also bei Reduktion der Intensität auf  $\frac{1}{4}$ , die gleiche photographische Wirkung in der vierfachen Zeit erreicht werde. Sie braucht aber etwas länger, weil ein Teil der Strahlung in der Luft absorbiert wird. Zuppinger hat eine solche Bestimmung veröffentlicht, aus welcher man auf eine Halbwertschicht der Röntgenstrahlen in Luft von annähernd 7 m schließen muß.

Hieraus dürfen wir den Schluß ziehen, daß zwei Röntgenstrahlungen gleichen Härtegrades (diese Bedingung ist wichtig) mit der gleichen Flächenenergie gewirkt haben, wenn ihre photographische Wirkung die gleiche war. Selbstverständlich ist dabei vorausgesetzt, daß beide Male die gleiche Plattenart Verwendung fand, und daß man mit dem gleichen Entwickler während gleich langer Zeit bei der gleichen Temperatur entwickelt hat. Am sichersten ist man stets, wenn man beide Vergleichsfelder auf die gleiche photographische Schicht aufnimmt, und gleichzeitig im gleichen Bade entwickelt.

Bei dieser Meßmethode haben wir ferner den Vorteil, daß wir die Röntgenstrahlung mit bekannten Lichtstrahlungen vergleichen können, für die wir in der Hefnerkerze bereits ein geläufiges Maß haben. Die photographische Wirkung einer Hefnerkerze während einer Sekunde im Abstände von 1 m wird „Sekundenmeterkerze“ genannt. Für die entsprechende Wirkung der Röntgenstrahlen hat Wertheim-Salomonsen die Bezeichnung R.S.M.K. (Röntgen-Sekunden-Meter-Kerze) vorgeschlagen. Sollte der Beweis zu erbringen sein, daß das Verhältnis der R.S.M.K. zur Licht-S.M.K. von der Art der photographischen Schicht und von der Entwicklung unabhängig ist, so wäre es sehr zu begrüßen, wenn dieser Vorschlag Beachtung fände.

Einen besonders sorgfältigen Ausbau hat diese Methode bei der Begründung des quantimetrischen Verfahrens durch Kienböck erfahren.

## 2\*) Das Quantimeter nach Kienböck.

Es werden Streifen aus bestimmtem lichtempfindlichem Papier der Wirkung der Röntgenstrahlen ausgesetzt und in einer genau vorgeschriebenen Lösung bei 18°C. während einer Minute entwickelt. Alsdann wird der Grad der Schwärzung durch Vergleich mit einer Standard-skala festgestellt.

Jeder Grad dieser Skala wird mit 1x bezeichnet. Mit 10x wird die sogenannte „Voll-dosis“ erreicht. Nach den Angaben Kienböcks entspricht 1x der Wirkung einer Scheinerlampe während 30 Minuten in 30 cm Fokaldistanz. Da die Scheinerlampe den 13. Teil der Wirkung einer Hefnerkerze hat, so berechnet man daraus für den Quantimetergrad eine Flächenenergie von rund 1500 R.S.M.K.

Daß die Resultate der Kienböckschen Quantimetrie für mehr als einen bestimmten Härtegrad Gültigkeit haben sollten, ist nach den Ergebnissen unserer bisherigen Betrachtungen nicht sehr wahrscheinlich. Die weitere Behandlung dieser und anderer Fragen erfolgt besser im vierten Teil (Dosierung).

## Das Lichtverfahren nach Strauß

sei hier der Vollständigkeit halber erwähnt. Auch hierauf wird im dritten Teil noch kurz zurückzukommen sein.

## β) Farbveränderungen in Salzen.

Die Röntgenstrahlen haben die Eigenschaft, daß sie in vielen Körpern (so z. B. bekanntlich im Glas der Röntgenröhre) Farbveränderungen hervorrufen. Es kommen hierfür hauptsächlich zwei Substanzen in Betracht.

### 1\*. Halogensalze.

Die färbende Wirkung der Röntgenstrahlen auf Halogensalze ist von Holzknicht benutzt worden bei der Herstellung seines Chromoradiometers. Die Idee dieser Meßmethode

war zweifellos vorzüglich. Leider scheiterte die praktische Verwertung an verschiedenen scheinbar unüberwindlichen Schwierigkeiten: die Ablesung der Farbnuancen war schwierig und in höchstem Maße von der Beleuchtung abhängig. Noch schwerer fällt ins Gewicht, daß die Farbveränderung von der Temperatur und vornehmlich von der Feuchtigkeit der Luft abhängig ist.

#### 2\*. Das Baryum-Platin-Cyanür.

Sabouraud und Noiré haben mit der Auswahl dieses Doppelsalzes einen glücklichen Griff getan. Trotzdem die Versuche von Wertheim-Salomonson ergeben haben, daß die Empfindlichkeit der Reaktion geringer und der Einfluß von Temperatur und Feuchtigkeit größer ist, als bei dem Holzknichtschen Reagenzkörper, hat sich die „Sabouraudpastille“ so eingebürgert, daß sie von allen Reagenzkörpern bei den Praktikern die größte Verbreitung erlangt haben dürfte. Die geringe Empfindlichkeit wird durch Verkleinerung der Fokaldistanz wett gemacht, der Einfluß der Temperatur ist nicht sehr groß, denn es genügt, die Vorschrift zu beachten, daß die Pastille nicht näher als 1 cm an das Glas der Röhre gebracht werden soll, und endlich der Einfluß der Feuchtigkeit, welcher theoretisch am meisten zu fürchten gewesen wäre, muß offenbar durch einen zuverlässigen Lack ausgeschaltet worden sein.

Wie bei allen andern Methoden, ist die Reaktion nicht von der auffallenden, sondern von der absorbierten Röntgenenergie abhängig. Die Berücksichtigung dieser Tatsache ist nun gerade bei den Sabouraudschen Reagenzkörpern keine ganz einfache Sache. Wir dürfen nicht einfach die Schwächung der Röntgenenergie durch die Pastille in Rechnung bringen. Denn es besteht dieselbe nicht aus reinen Ba-Pt-Cy, sondern außerdem aus einem Bindemittel. Ferner beurteilen wir mit unserm Auge ja nur die in den obersten Schichten vor sich gehenden Farbveränderungen, also doch wohl nur einen recht beschränkten Teil der tatsächlich absorbierten Röntgenenergiemenge. Endlich muß man sich bei der relativ hohen Absorptionsfähigkeit des Ba-Pt-Cy die Frage vorlegen, ob die Schichtdicke,  $x$ , welche uns den Farbeindruck übermittelt, gegenüber der Halbwertschicht,  $a$ , im Ba-Pt-Cy klein genug sei, um die Anwendung der übersichtlichen Gleichung (44) zu gestatten. Andernfalls müßte man auf die weit un bequemere Gleichung (29) zurückgreifen. Daraus würde sich dann ergeben, daß die nach Gleichung (44) gefundene Wirkung noch mit dem Korrekturfaktor

$$1 - \frac{x}{a} \cdot 0,35 + \frac{x^2}{a^2} \cdot 0,16 - \text{usw.}$$

zu multiplizieren wäre. Zudem wäre man dabei noch in Verlegenheit, betreffend Bestimmung der Größe  $x$ , d. h. derjenigen Schichtdicke, welche uns den Farbeindruck übermittelt. Denn alle Farbveränderungen, welche in den darunterliegenden Schichten hervorgerufen werden, haben auf die optische Beurteilung der Strahlenwirkung keinen Einfluß mehr.

Auch für diese Methode müssen wir die Besprechung näherer Einzelheiten auf den dritten Teil versparen. Erwähnt sei nur, daß es Bordier gelungen ist, die Empfindlichkeit des Reagenzmaterials so zu steigern, daß die Fokaldistanz nicht mehr künstlich verkleinert zu werden braucht, ein Vorteil, welcher für den Praktiker von großem Wert ist. Auch sind die Bordierschen Reagenzkörper dünne Plättchen, welche so wenig Strahlen absorbieren, daß sie, wie die Quantimeterstreifen, direkt auf diejenige Fläche gelegt werden dürfen, welche man bestrahlen und deren Flächenenergie man bestimmen will. Aus dem gleichen Grunde ist die Wirkung der Strahlen auf diese Plättchen der Berechnung nach Gleichung (44) zugänglich.

Die Sabouraudschen Reagenzkörper dagegen dürfen nicht in dem wirksamen Strahlenkegel angebracht werden, weil sie zu viel Röntgenenergie wegnehmen, und daher in dem wirksamen Strahlenkegel ein ungleiches Feld erzeugen würden. Im Schatten des Reagenzkörpers würde die Flächenenergie beträchtlich geringer sein, als daneben.

Schade ist allerdings, daß Bordier zur Beurteilung der Flächenenergie wieder eine neue Skala eingeführt hat, die sich weniger einfach auf die Kienböcksche Einheit um-

rechnen läßt, als die Sabouraudsche Bestrahlungseinheit, welche gerade mit dem Wert  $10x$  identisch ist.

#### γ) Die Jodausscheidung.

Fast gleichzeitig (1904) haben Freund einerseits und Bordier und Gallimard andererseits die Jodmenge bestimmt, welche unter der Wirkung der Röntgenstrahlen aus einer 2% Lösung von Jodoform in Chloroform freigemacht wird. Die Entdecker dieser Reaktion sind Hardey und Wilcock.

Die genauere Definition der Einheit geben die französischen Autoren: Sie wählen als Einheit diejenige Jodmenge, welche aus einer solchen Lösung von 1 cm<sup>2</sup> Fläche und 1 cm Tiefe 0,1 mg Jod freimacht.

Die Messung der abgespaltenen Jodmenge geschieht am besten auf kolorimetrischem Wege, indem man den Grad der Violettfärbung mit Jodlösungen in Chloroform von bekannter Konzentration vergleicht.

Leider hat dieses Verfahren der Kritik nicht standgehalten. Es hat sich gezeigt, daß die Jodabspaltung in hohem Grade von dem Wassergehalt der Lösung abhängig ist. Nach Wertheim-Salomonson soll in völlig wasserfreier Lösung die Zersetzung überhaupt nicht zustande kommen.

#### δ) Die Kalomelausscheidung.

Schwarz hat 1906 die von Eder entdeckte Strahlenempfindlichkeit der von Fowler angegebenen Ammoniumoxalat-Sublimat-Lösung zur Messung der Flächenenergie benutzt.

Von den Lichtstrahlen sind es nur die kurzwelligen, welche eine merkliche Wirkung haben. Geht im Sonnenlichte die Zersetzung rasch vor sich, so ist andererseits die Lösung ziemlich unempfindlich gegen das Binnenlicht unserer Laboratorien, welches arm ist an kurzwelligen Strahlen.

Schwarz hat nun zunächst nachgewiesen, daß auch die Röntgenstrahlen die Ammoniumoxalat-Sublimat-Lösung zersetzen, wobei, wie durch die Lichtwirkung, Kalomel gebildet wird. Die Reaktion verläuft nach folgender Formel:



Wichtig ist zu berücksichtigen, daß die Kalomelausscheidung erst dann sichtbar wird, wenn die Lösung mit Kohlensäure gesättigt ist, wie Roloff nachgewiesen hat.

Schwarz hält die Erklärung auf Grund des „Hallwachseffektes“ für plausibel: Das elektropositiv geladene Metall verliert unter der Wirkung der kurzwelligen Lichtstrahlen, bzw. der Röntgenstrahlen zum Teil seine Ladung. Zur Wiederherstellung des elektrischen Gleichgewichtes geht dann das negativ geladene Oxalsäureradikal in die elektrisch neutrale Kohlensäure über. Die noch verbleibende elektropositive Ladung der Hg-Ionen verschwindet schließlich dadurch, daß dieselben an das Sublimat treten und Kalomel entstehen lassen.

Nach dieser Auffassung ist die Menge des ausgefällten Kalomels ein Maß für die elektrische Gleichgewichtsstörung, welche eine Strahlung hervorgerufen hat, und damit ein chemisches Maß für die Menge der freigemachten Ionen.

Ob nun diese Erklärung zutrifft oder nicht, stets handelt es sich um eine Transformation von Strahlungsenergie in chemische Energie. Letztere können wir zur Messung der Röntgenenergie verwenden, vorausgesetzt, daß der Nutzeffekt entweder berechenbar oder konstant ist.

Die Messung des ausgeschiedenen Kalomels geschah ursprünglich durch Zentrifugierung und Messung der so erhaltenen Höhe des Niederschlages. Später wurde die bequemere Methode der optischen Beurteilung des Trübungsgrades eingeführt. Weitere Einzelheiten müssen bei der Besprechung der Dosierungsmethoden behandelt werden. Erwähnt sei nur, daß infolge der mäßigen Empfindlichkeit der Reaktion eine Verkleinerung der Fokaldistanz, wie bei der Sabouraudpastille notwendig ist.

Gemeinsam mit den radioelektrischen Methoden hat die Schwarzsche Messung den Vorteil, daß man die Resultate von dem Einfluß des Härtegrades befreien kann. Auch die Jodmethode hätte diesen Vorteil, wenn man sie von dem Wasserfehler befreien könnte.

Alle anderen Meßmethoden sind mit dem Nachteil behaftet, daß es nicht gelingt, von allen Röntgenstrahlen, unabhängig von deren Härtegrad, stets den gleichen Anteil zur Transformation in diejenige Energieform zu bringen, welche man der Messung zugänglich machen kann. Sowohl die Ionisation als die Fluoreszenz fällt um so geringer aus, je härter die Strahlung bei gleicher Intensität ist, weil es sich in allen Fällen um solche absorbierende Schichten handelt, welche nur einen verhältnismäßig kleinen Teil der auffallenden Strahlung absorbieren. Unter dieser Bedingung gibt es nur ein Mittel zur Vereinfachung der Beurteilung die Anwendung der sehr dünnen Schicht, auf welche man Gleichung (44) anwenden darf. Aber auch dann noch verbleibt stets die Halbwertschicht der Strahlen für das betreffende Medium in der Rechnung, ein Beweis, daß die Ergebnisse der Messungen vom Härtegrade abhängig sind.

Ganz anders liegen die Verhältnisse bei denjenigen chemischen Methoden, welche sich auf die Zersetzung von Flüssigkeiten gründen. Hier hindert uns nichts, der absorbierenden Schicht eine beträchtliche Dicke zu geben, so daß sie von allen Röntgenstrahlen, den härtesten wie den weichsten, stets so viel absorbiert, daß der kleine, nicht absorbierte Rest vernachlässigt werden kann.

Die härtesten Strahlen, die bis heute zur Verwendung kommen, liegen bei 3 cm Halbwertschicht (Wasser). Die Halbwertschichten der Schwarzschen Lösung kenne ich nicht. Sie sind jedenfalls bedeutend kleiner als beim Wasser. Die härteste Strahlung dürfte 2 cm nicht überschreiten. Es genügt also eine Schicht von 8 cm, um auch die härteste Strahlung auf  $(1/2)^4$ , d. h. auf 6% ihres Wertes zu reduzieren. Ein Fehler von 6% hat aber wenig zu bedeuten für eine Methode, bei welcher man froh sein darf, wenn die Fehler 10—20% nicht überschreiten. Bisher betrug die Fehler 100% und mehr, wenn man die üblichen Dosierungsmethoden auf Strahlengattungen anwandte, welche sich den äußersten Härtegraden näherten. Da bedeutet eine Verbesserung auf bloß 20% schon einen wesentlichen Fortschritt.

Selbstverständlich soll damit nicht gesagt sein, daß diese Abänderung der Schwarzschen Messung in die Praxis der Dosierung Eingang finden sollte. Aber die immer noch ungelöste Frage nach der Abhängigkeit der biologischen Wirkung vom Härtegrade kann auf dieser Grundlage eine exakte Beantwortung finden.

Diese Frage ist wichtig genug, um eine Bearbeitung nach mehr als nur einer Methode zu rechtfertigen. Eine Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der radioelektrischen und der radiochemischen Messungen würde deren Zuverlässigkeit wesentlich erhöhen.

## IV. Die Dosis.

### A. Das Wesen der Strahlenwirkung.

Wenn einem Patienten eine abgewogene Menge eines Arzneimittels verabfolgt wird, und die Untersuchung seines Stuhlganges ergibt, daß 60% desselben auf diesem Wege den Körper unverändert verlassen haben, während die übrigen 40% sich in chemisch veränderter Form in andern Ausscheidungen vorfinden, so ziehen wir den Schluß, daß von der verabreichten Menge nur  $\frac{4}{10}$  „gewirkt“ haben, während die übrigen  $\frac{6}{10}$  ohne Wirkung geblieben sind.

Es gibt gegen diesen Schluß einen Einwand: Die durch den Darm unverändert abgegangene Substanz kann Veränderungen erfahren haben, welche an anderer Stelle wieder rückwärts verliefen, immerhin unter gleichzeitiger Auslösung anderer Transformationen. In diesem Sinne wirken die Fermente, die sich selbst ja nicht nachweisbar verändern. Als Analogon erinnere ich an die geringen Mengen von Sticksuperoxyden, welche ungeheure Mengen von schwefliger Säure in Schwefelsäure überführen, an den Sauerstoffüberträger unseres Körpers, das Hämoglobin, an die Fermente des Verdauungskanales.

Ob die Röntgenstrahlen irgendwelche „auslösende“ Wirkungen entfalten, dürfte zurzeit noch eine offene Frage sein. Sehr viel Wahrscheinlichkeit hat eine solche Annahme nicht für sich, indem die „Wirkung“ der Röntgenstrahlen eben doch allzudeutlich von der Menge des Wirksamen abhängig ist. Wir können uns der Ansicht kaum verschließen, daß die Wirkung der Röntgenstrahlen auf das lebende Gewebe, wenn auch vielleicht nicht ausschließlich, so doch in erster Linie eine Energiewirkung ist.

Eine andere Frage, welche für die Bestimmung einer „Dosis“ von Bedeutung ist, hängt mit der Natur der Röntgenwirkung zusammen. Ist die Wirkung eine rein lokale, oder entsteht unter dem Einfluß der Strahlen ein „Röntgentoxin“, welches dann auch Allgemeinwirkungen erzeugen kann?

Ist die Wirkung eine rein lokale, so genügt es, wenn wir die an Ort und Stelle absorbierte Röntgenenergiemenge messen. Müssen wir aber mit Allgemeinwirkungen und mit Fernwirkungen rechnen, so kompliziert sich die Aufgabe wesentlich; sind wir doch schon für die „Lokaldosis“ noch lange nicht am Ende des Möglichen, ja nicht einmal des dringend Nötigen angelangt.

Die für die Wirkung der Röntgenstrahlen empfindlichsten normalen Organe sind die Keimdrüsen. Fernwirkungen würden daher am ehesten an diesen Teilen zu beobachten sein. Aber da gehen zurzeit die Angaben der einzelnen Autoren noch weit auseinander. Während z. B. Fränkel eine solche Fernwirkung regelmäßig beobachtet hat, wird sie von H. Meyer kategorisch in Abrede gestellt.

Allgemeinwirkungen sind bei kleinen Tieren wohl bekannt. Es gibt für solche sogar eine tödliche Röntgendosis. Ob dies davon herrührt, daß bestimmte, lebenswichtige Organe unrettbar geschädigt werden, weil sie nicht, wie bei größern Tieren durch genügend dicke absorbierende Schichten geschützt sind, oder ob es einfach darauf zurückzuführen ist, daß infolge der kleinern Dimensionen die absorbierte Röntgenenergiemenge pro Volumeneinheit und damit die relative Menge von Röntgentoxin größer ist, als bei größern Tieren, ist eine noch nicht geklärte Frage. Im ersten Falle hätten wir es mit einer Lokalwirkung, im zweiten mit einer Allgemeinwirkung zu tun.

Für die Hypothese einer Toxinwirkung kann die Schwarzsche Entdeckung der Desensibilisierung durch künstliche Blutleere ins Feld geführt werden. Schwarz ging von der Wahrnehmung aus, daß trockene Samen weit weniger röntgenempfindlich sind, als keimende. Daraus zog er den Schluß, daß wachsende und sich vermehrende Zellen empfindlicher sind als ruhende, oder mit andern Worten, daß die Röntgenempfindlichkeit eines Gewebes um so größer ist, je lebhafter sein Stoffwechsel ist. Je lebhafter der Stoffwechsel ist, um so reichlicher muß auch die Zufuhr von Material, d. h. um so stärker muß die Durchblutung des Organes sein.

Daraus zog Schwarz den umgekehrten Schluß, daß durch vorübergehende Hemmung der Blutzirkulation, d. h. durch zeitweise Verlangsamung oder Aufhebung des Stoffwechsels die Röntgenempfindlichkeit herabgesetzt werden dürfte.

Diese Vermutung ist durch das Experiment bestätigt worden. Wurde eine Hautpartie durch Druck unter einem Holzplättchen blutleer gemacht, so hielt dieselbe weit mehr Röntgenbestrahlung aus, als eine danebenliegende, mit der gleichen Röhre gleichzeitig und gleich lang bestrahlte und mit einem gleichen Holzplättchen — nur ohne Druck — bedeckte.

Wird man dadurch nicht unwillkürlich zu der Annahme gedrängt, daß das Röntgentoxin nur in einem bestimmten Medium (Blut? Lymphe?) entstehe, und daß sein Auftreten wegfalle, wenn diese Flüssigkeit durch Druck aus dem Organ verdrängt wird? Auch die von Reicher und Lenz beobachtete und praktisch verwertete Tatsache, daß die Anämisierung mit Adrenalin qualitativ die gleiche Wirkung hat, würde zu dieser Auffassung stimmen. Wenn dabei die quantitativen Verhältnisse nicht ganz die gleichen sind (die Druckenämie scheint kräftiger zu wirken), so liegt die Annahme nahe, daß durch den Druck die „röntgenfähige“ Substanz gründlicher aus dem Gewebe entfernt wird, als durch das Adrenalin, welches wohl vorwiegend auf die Blutgefäße, kaum aber auf die Lymphräume wirkt.

Immerhin entsteht auch das hypothetische Röntgentoxin stets da, wo die Röntgenstrahlen absorbiert werden, nur mit dem Unterschied, daß es dank dem Transport auf dem Blutwege Fernwirkungen entfalten kann. Aber alle Röntgenstrahlen, welche nicht im Körper absorbiert werden, d. h. deren Energie nicht im Körper transformiert wird, werden auch kein Röntgentoxin erzeugen. Wir werden also unter verschiedenen Erklärungsmöglichkeiten der biologischen Röntgenwirkung stets wieder darauf geführt, daß zur quantitativen Beurteilung derselben die im Körper absorbierte Röntgenstrahlenenergiemenge gemessen werden muß.

Dabei gestaltet sich allerdings die Aufgabe verschieden, jenachdem es auf Allgemeinwirkung oder auf Lokalwirkung ankommt. Ist z. B. das Blut die Bildungsstätte des Röntgentoxins, so käme, da der ganze Körper annähernd gleichmäßig mit Blut versorgt ist, die im ganzen Körper umgesetzte Röntgenenergie als Maß für das wirksame Agens in Rechnung. Und da die Dimensionen (außer etwa bei den Extremitäten) die Halbwertschichten der zurzeit erhältlichen Strahlengattungen weit übertreffen, so brauchen wir mit dem kleinen Anteil an nicht absorbierter Strahlung überhaupt nicht zu rechnen. Schließt man sehr weiche Strahlen aus, welche schon zu einem beträchtlichen Teil absorbiert werden, bevor sie nur die Hautkapillaren erreichen, so kann man zur Beurteilung der Allgemeinwirkung die absorbierte Energiemenge der einfallenden gleichsetzen. Man müßte zu diesem Zwecke die Flächenenergie mit der Größe der bestrahlten Fläche multiplizieren und das Produkt durch das Körpervolumen (oder Körpergewicht, was in diesem Falle auf das gleiche herauskommt) des Individuums dividieren.

Dringender als die Berechnung der Allgemeinwirkung ist die

#### B. Dosierung der Lokalwirkung,

denn soweit therapeutische Fragen in Betracht kommen, handelt es sich bei der Dosierung stets um die Vorausberechnung einer Wirkung auf ein bestimmtes bestrahltes Körpergewebe.

Nach aller Erkenntnis, welche wir bis jetzt gewonnen haben, kann die Dosierung nichts anderes sein, als die Berechnung der in dem betreffenden Gewebe absorbierten Energiemenge. Denn wir wissen, daß die Energiewirkung stets an eine Energietransformation gebunden ist.

Dabei wäre es selbstverständlich von höchstem Interesse, wenn wir wissen könnten, welcher Art die Transformationen sind, welche die Röntgenenergie durch Absorption in unsern Körpergeweben erfährt. Zum Teil wird sie in Sekundärstrahlung, zum Teil in elektrische Ladung übergeführt, zu einem kleinen Teil wohl auch in Wärme und zum vielleicht wichtigsten Teil in chemische Energie. Und unter den hierbei sich vollziehenden chemischen Reaktionen ist es wohl nur eine bestimmte Gruppe, welche die bekannten Wirkungen im Gefolge hat.

Wir müssen hier eine strenge Scheidung eintreten lassen. Was wir messen und berechnen können, ist zunächst nur die Gesamtsumme der an einer bestimmten Stelle absorbierten Röntgenenergie. Für die spezifische Wirkung auf die Gewebe kommt aber nur derjenige Anteil derselben in Betracht, welche auf die biologisch bedeutungsvollen chemischen Reaktionen entfällt. Und auch da sind noch zwei grundsätzlich verschiedene Auffassungen möglich. Es kann sein, daß der Anteil an Energie, welcher in die biologischen wirksamen Reaktionen eintritt, in den röntgenempfindlichen Geweben größer ist, als in den unempfindlichen. Es kann aber ebensogut sein, daß dieser Anteil stets der gleiche ist, daß aber die dabei entstehenden Substanzen auf die einen Organe weit stärkere Giftwirkungen ausüben als auf die andern.

Da wir zurzeit keinerlei Anhaltspunkte haben, um uns für die eine oder andere Hypothese zu entscheiden, so wollen wir uns auf die erstere stützen, einzig aus dem Grunde, weil sie didaktisch leichter verwertbar ist. Sachlich kommen die folgenden Überlegungen auf das Gleiche heraus, ob man ihnen die eine oder andere Hypothese zugrunde legt. Aber mit der erstern werden sie leichter verständlich.

### C. Der Begriff der Röntgendosis.

Wir haben uns also vorzustellen, daß von der an einer bestimmten Stelle absorbierten Röntgenenergie ein bestimmter Anteil, die biologisch wirksame Energie, diejenigen chemischen Reaktionen auslöst, welche für die spezifischen Röntgenwirkungen verantwortlich sind. Das Verhältnis dieser beiden Energiemengen ist der Sensibilitätskoeffizient.

$$\text{Sensibilitätskoeffizient} = \frac{\text{biologisch wirksame Energie}}{\text{gesamte absorbierte Energie}}$$

Irgendwelche numerischen Werte dieses Koeffizienten besitzen wir zurzeit noch nicht. Wir können sie erst dann finden, wenn wir für die biologische Wirkung in den einzelnen Organen ein brauchbares Vergleichsmaß gefunden haben. Rein qualitativ aber können wir sein Verhalten schon jetzt gut beurteilen, denn wir erkennen leicht, daß er den größten Schwankungen unterliegt.

Lassen wir z. B. auf einen Muskel, ein Hautstück und ein Sarkom die gleiche Röntgenenergiemenge auffallen, d. h. bestrahlen wir alle drei mit der gleichen Flächenenergie, aber auch bei gleichem Härtegrad, so wird in gleichen Raumteilen dieser verschiedenen Organe die gleiche Röntgenenergiemenge absorbiert<sup>1)</sup>. Trotzdem ist die Wirkung auf die Haut weit intensiver als auf den Muskel und bedeutend schwächer als auf das Sarkom. Wir schließen daraus, daß der Sensibilitätskoeffizient der Haut entsprechend größer ist als derjenige des Muskels und entsprechend kleiner als derjenige des Sarkomes.

Haben wir also die Wirkungen der Röntgenstrahlen auf verschiedene Gewebe zu beurteilen, so handelt es sich um den Vergleich der Sensibilitätskoeffizienten. Vergleichen wir aber die Wirkung verschiedener Strahlungen auf das gleiche Gewebe, so handelt es sich um Messung der in diesem Gewebe absorbierten Energiemenge.

<sup>1)</sup> Genau genommen absorbiert die Haut etwas mehr als der Muskel, aber der Unterschied macht nicht einmal 5% der Gesamtmenge aus. Praktisch kommt also diese Korrektur nicht in Betracht.

Jede neue Erkenntnis bedarf zu ihrer Befestigung einer guten Namengebung, und hier ist es nicht schwierig, eine solche zu finden. Was wir mit unsern physikalischen Hilfsmitteln zu bestimmen suchen (wirklich bestimmen möchte ich heute noch nicht sagen), das ist die Röntgenenergiemenge, welche in der Raumeinheit absorbiert wird. Was wir aber im letzten Grund der Dinge zu kennen wünschen, ist derjenige Anteil an absorbierter Energie, welcher die biologischen Wirkungen hervorruft.

Ich habe daher die mit unsern rohen physikalischen Hilfsmitteln bestimmbare Dosis, d. h. die in der Raumeinheit absorbierte Röntgenenergiemenge, die rohe Dosis genannt. Man kann sie mit ebensogutem Recht auch die physikalische Dosis nennen. Derjenige Bruchteil dieser Energiemenge, welcher die feinen biologischen Reaktionen eingeht, und damit für die spezifischen Wirkungen verantwortlich wird, ist die wirksame Dosis oder die biologische Dosis.

Deutlicher als Worte drückt die mathematische Gleichung den Zusammenhang dieser Größen aus, wie folgt:

$$\text{Sensibilitätskoeffizient} = \frac{\text{Biologische (wirksame) Dosis}}{\text{Physikalische (rohe) Dosis}}$$

Weil aber die Wirkung nicht nur von der Röntgenenergiemenge abhängt, welche an einer bestrahlten Stelle absorbiert wird, sondern auch von der Größe des Volumens, auf welches sie sich verteilt, so muß die physikalische Dosis definiert werden als das Verhältnis der absorbierten Röntgenenergiemenge zu dem Volumen der absorbierenden Materie. Denn die gleiche Energiemenge, auf ein großes Volumen verteilt, hat geringere Wirkung, als wenn sie sich auf ein kleines Volumen konzentriert. Wir geben also für die Dosis folgende Definition:

**Die physikalische Dosis (rohe Dosis) ist gleich derjenigen Röntgenenergiemenge, welche in einem Körperelement absorbiert wird, dividiert durch das Volumen dieses Elementes.**

**Die biologische Dosis (wirksame Dosis) ist gleich der physikalischen Dosis multipliziert mit dem Sensibilitätskoeffizienten.**

Dabei sei nochmals daran erinnert, daß wir zunächst bloß für die physikalische Dosis Meßverfahren kennen. Zur richtigen Beurteilung derselben ist daher vor allem eine exakte Untersuchung der Beziehungen zwischen den bekannten meßbaren Größen und der so definierten „physikalischen Dosis“ nötig.

#### D. Das Dosierungsgesetz.

Das, was wir „physikalische Dosis“ genannt haben, nämlich das Verhältnis der absorbierten Röntgenenergie zu dem absorbierenden Volumen, mußten wir schon einmal berechnen, als wir die Wirkung der Röntgenstrahlen auf verschiedene Reagenzkörper zu beurteilen hatten (Gleichung 29 ff.). Nach der dort eingeführten Bezeichnung müssen wir für die physikalische Dosis setzen

$$D = \frac{-dE}{dV} \quad (50)$$

und für die biologische Dosis

$$W = \epsilon \cdot \frac{-dE}{dV} \quad (51)$$

wobei diesmal die Konstante  $\epsilon$  den Sensibilitätskoeffizienten bedeutet.

Bezeichnet man dann wieder mit  $F$  die Flächenenergie und mit  $dx$  die Dicke einer sehr dünnen durchstrahlten Schicht, so ergeben die gleichen Operationen

$$D = \frac{-dF}{dx} \quad (52)$$

Nun muß man sich von vornherein sagen, daß der Begriff der „Dosis“ überhaupt nur auf eine sehr dünne Schicht streng anwendbar ist. Denn betrachtet man die Vorgänge in

einer dicken Schicht, so sieht man leicht ein, daß die Wirkung der Strahlung auf den untersten Teil derselben stets geringer sein muß, als auf deren obersten, denn die auf die Oberfläche gelangende Strahlung ist durch Absorption in der überlagernden Schicht bereits geschwächt worden. Man könnte höchstens von einer mittlern Dosis reden und damit an diejenige Wirkung denken, welche man erhielte, wenn sich die in der dicken Schicht absorbierte Energie gleichmäßig durch dieselben verteilen würde. Diese „mittlere Dosis“ für eine Schicht von der Dicke  $x$  hat dann den Wert

$$D = \frac{F(0) - F(x)}{x} = \frac{F(0)}{x} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2^{\frac{x}{a}}} \right]. \quad (53)$$

Weit einfacher berechnet sich die physikalische Dosis für eine dünne Schicht. Man findet die Formel, indem man in obiger Gleichung den Grenzwert für  $x = 0$  sucht:

$$D = \frac{F(0)}{a} \cdot \log. \text{ nat. } (2) = \frac{7 \cdot F}{10 \cdot a}. \quad (54)$$

Das heißt: **Die physikalische Dosis (rohe Dosis) ist proportional der Flächenenergie und umgekehrt proportional der Halbwertschicht der Strahlung<sup>1)</sup>.**

Eine ähnliche Formel, wie unsere Gleichung (54) hat schon im Jahre 1906 Kienböck aufgestellt. Er setzt die Dosis gleich

$$K \cdot \frac{U \cdot I}{P}$$

„wobei U die Zahl der Unterbrechungen des Primärstromes, also auch die Zahl der Sekundärströme und Röntgenschläge in der Minute, I = die Intensität des letzteren, P die Penetrationskraft und K eine Konstante bedeuten“.

Dies ist die einzige Stelle in der Literatur, wo die „Penetrationskraft“ annähernd richtig behandelt wird. Nur sagt uns Kienböck leider nicht, was für numerische Größen für P in seine Formel eingesetzt werden müssen. Daß übrigens das K in der Kienböckschen Formel keine Konstante ist, geht aus den Ausführungen über den Nutzeffekt  $n$  auf S. 47 hervor.

Die Gleichung (54) aber und der daraus abgeleitete Satz sind für die Probleme der Dosierung von fundamentaler Wichtigkeit und eine Menge von Irrtümern, welche die Fortschritte auf diesem Gebiete hintangehalten haben, stammen daher, daß trotz eindringlichen und wiederholten Warnungen der Physiker (ich erinnere nur an Walter, Wertheim-Salomonson, v. Kowalski) stets wieder vergessen wurde, daß die Röntgenwirkung nicht nur von der Intensität, oder besser gesagt von der Flächenenergie, sondern in hohem Grade auch von dem Härtegrade abhängig ist. Es steht nun aber doch zu hoffen, daß diese Tatsache dem Gedächtnis nicht wieder entwinden wird, nachdem der Zusammenhang zwischen der „Strahlenmenge“ — besser Flächenenergie — dem Härtegrad und der Dosis auf eine so außerordentlich einfache Formel gebracht und durch ein entsprechend einfaches Gesetz ausgedrückt werden konnte.

Nach diesem Gesetze ist es ein leichtes, die physikalische Dosis zu berechnen, sobald man die Flächenenergie und die Halbwertschicht kennt. Sind wir heute einerseits imstande, die Halbwertschicht mit Hilfe des absoluten Härtemessers (S. 48 ff.) direkt optisch zu bestimmen, so besitzen wir leider noch keine einwandfreie Methode zur Bestimmung der Flächenenergie. Wir brauchen aber für viele praktische Aufgaben keinen absoluten Wert dieser Größe, wenn wir nur in der Lage sind, im gegebenen Falle eine bestimmte Flächenenergie zu verabfolgen.

Wir wissen nun, daß die verschiedenen gangbaren Methoden der „Dosierung“ uns in den Stand setzen, bestimmte Flächenenergien zu verabfolgen, vorausgesetzt, daß stets bei einem

<sup>1)</sup> Diese Beziehung wird eine kleine Korrektur erfahren müssen, wenn einmal Genaueres über die quantitativen Verhältnisse bei dem Vorgang der Strahlenhärtung bekannt sein wird.

bestimmten Härtegrade gearbeitet wird. Bei einigen „Dosimetern“ wird diese Beschränkung eingestanden, bei andern nicht. Das hindert aber nicht, daß sie tatsächlich doch für alle zu Recht besteht, oder doch vorausgesetzt werden muß, bis das Gegenteil bewiesen ist, was übrigens schwerlich gelingen würde. Eine Ausnahme bilden die radioelektrischen Dosierungsmethoden, welche sich aber erst noch praktisch bewähren müssen.

Dies ist ein großer Übelstand; weniger für die Hauttherapie, denn hier wird doch in der Regel mit denjenigen Härtegraden gearbeitet, bei welchen die Dosimeter geeicht sind; wohl aber für die Tiefentherapie, bei welcher man, wie wir später sehen werden, bedeutend härtere Strahlen anwenden muß, als sie für den Gültigkeitsbereich aller bisher gebräuchlichen Dosimeter verlangt werden.

Diese Tatsache ist vielen Beobachtern aufgefallen: Wurde mit einem solchen Dosimeter eine weiche Strahlung dosiert, so war die Hautreaktion stärker, als man erwartet hatte. Arbeitet man dagegen mit harten Strahlen, so konnten die Angaben der Dosimeter beträchtlich über die zulässige Grenze hinausgehen, bevor die Reaktion eintrat. In unzweideutiger Weise hat hierfür H. E. Schmidt den experimentellen Beweis geleistet, und zwar für die Sabouraudpastille.

Über die quantitativen Verhältnisse mag folgende kurze Rechnung ein Bild geben: Dürfen wir voraussetzen, daß die oberste Schicht der Sabouraudpastille, welche uns den Farbeindruck übermittelt, beträchtlich dünner sei, als die in Betracht kommenden Halbwertschichten, nämlich im Ba-Pt-Cy, so wird die Rechnung sehr einfach. Wir nehmen an, daß von zwei verschiedenen Strahlungen die weichere im Wasser die Halbwertschicht  $a$  und im Ba-Pt-Cy die Halbwertschicht  $b$  habe. Die härtere Strahlung soll im Wasser die Halbwertschicht  $a^*$  und im Ba-Pt-Cy die Halbwertschicht  $b^*$  haben.

Von jeder dieser beiden Strahlungen verabfolgen wir so viel, daß eine Sabouraudpastille die Teinte B erreicht. Dann wissen wir, daß in der sichtbaren Oberflächenschicht eine bestimmte Röntgenenergiemenge, und zwar beide Male die gleiche, absorbiert worden ist. Das Verhältnis dieser Energiemenge zu dem absorbierenden Volumen nennen wir  $S$ . Dann ist diese Größe, entsprechend unserer Gleichung (54)

$$S = \frac{7 \cdot F}{10 \cdot b} \quad (55)$$

und bei der härtern

$$S = \frac{7 \cdot F^*}{10 \cdot b^*} \quad (56)$$

woraus

$$F^* : F = b^* : b. \quad (57)$$

Da die mit \* versehenen Größen sich auf die härtere Strahlung beziehen, so wissen wir, daß der Bruch  $\frac{b^*}{b}$  stets größer als Eins sein muß, denn die Halbwertschicht ist stets bei der härtern Strahlung größer als bei der weichern. Deshalb muß nach Gleichung (57) auch die Flächenenergie  $F^*$  größer sein als  $F$ .

Das heißt: „Ist eine Sabouraudpastille von zwei Strahlungen verschiedenen Härtegrades gebräunt worden, so hat die härtere Strahlung mit der **größeren** Flächenenergie gewirkt.“

Damit scheint nun auf den ersten Blick die Tatsache in Widerspruch zu stehen, daß doch gerade die harten Strahlen auf die Haut weniger biologische Wirkung entfalten, als die weichen, wenn man gleiche Dosen nach Sabouraud verabreicht. Dieser scheinbare Widerspruch wird sich durch weitere Verfolgung der Rechnung klären. Wir halten zunächst nur die Tatsache fest, daß bei gleichen Sabouraud Dosen von der härtern Strahlung eine größere Flächenenergie auf die Pastille fiel als von der weichern. Es ist dies bei einiger Überlegung auch verständlich, wenn man bedenkt, daß, je härter die Strahlung ist, um so weniger von

ihr absorbiert wird. Sollen daher gleiche Energiemengen absorbiert werden, so müssen von der härtern Strahlung größere Energiemengen auffallen. Das dürfte ohne weiteres klar sein.

Nun gehen wir zu der Wirkung auf die Haut über. Wir lassen auf dieselbe die mit der Sabouraudpastille „dosierten“ Flächenenergien  $F^*$  und  $F$  wirken und erhalten dann folgende Dosen: mit der weichern Strahlung

$$D = \frac{7 \cdot F}{10 \cdot a} \quad (58)$$

und mit der härtern

$$D^* = \frac{7 \cdot F^*}{10 \cdot a^*} \quad (59)$$

Nun hat die Erfahrung gelehrt, daß  $D^*$  stets kleiner ist als  $D$ , indem man mit der Sabouraudpastille stets unterdosiert bei harten und überdosiert bei weichen Strahlen. Der Quotient  $\frac{D^*}{D}$  muß also stets kleiner als Eins sein. Berechnen wir seinen Wert aus den Gleichungen (58) und (59), so erhalten wir die Bedingung

$$\frac{D^*}{D} = \frac{F^*}{F} \cdot \frac{a}{a^*} < 1 \quad (60)$$

und wenn man noch Gleichung (57) benutzt, so erhält man

$$\frac{b^*}{b} \cdot \frac{a}{a^*} < 1 \quad (61)$$

oder in anderer Form geschrieben

$$\frac{a^*}{a} > \frac{b^*}{b} \quad (62)$$

Aus dieser Ungleichheit ergibt sich folgende Regel: Vergleicht man zwei Strahlungen verschiedenen Härtegrades, so ist das Verhältnis ihrer Halbwertschichten im Wasser (also auch in den Weichteilen) größer als im Ba-Pt-Cy. Oder mit anderen Worten: Geht man von einer weichern Strahlung zu einer härtern über, so nimmt die Absorptionsfähigkeit der Weichteile stärker ab, als diejenige des Ba-Pt-Cy der Sabouraudpastille.

Damit ist auch die Erklärung des genannten scheinbaren Widerspruches gegeben: Bei gleicher Sabourauddosis ist zwar die Flächenenergie der härtern Strahlung größer, als diejenige der weichern. Dafür ist andererseits die Absorptionsfähigkeit der Haut in noch größerem Maße gesunken, so daß die Vermehrung der Flächenenergie überkompensiert wird durch die verminderte Absorptionsfähigkeit der Haut. Das Resultat ist dann eine verminderte biologische Wirkung trotz der vergrößerten Flächenenergie, wie dies tatsächlich durch die bereits erwähnten Versuche von H. E. Schmidt erhärtet worden ist.

Daß andererseits Klingelfuß mit gleichen Bestrahlungsgrößen auch bei wechselndem Härtegrad gleiche Sabourauddefekte erhalten hat, läßt sich durch die Kompensation von zwei Fehlerquellen erklären, wie ich dies an anderer Stelle<sup>1)</sup> ausführlich dargetan habe. Gibt man nämlich bei verschiedenem Härtegrad gleiche Bestrahlungsgrößen (über deren Definition vgl. S. 98 ff.), so nimmt mit wachsendem Härtegrad die Dosis zu, weil die Schwächung der Strahlung durch das Glas der Röhre geringer wird. Sie nimmt gleichzeitig ab, weil die Halbwertschicht in der Haut abnimmt.

Experimentell muß sich aber diese Frage noch von einer andern Seite klären lassen, nämlich durch Bestimmung der Halbwertschichten verschiedener Strahlengattungen im Ba-Pt-Cy. Fügen sich die dabei gefundenen Zahlen der Bedingung (62), so ist die Auffassung gerechtfertigt, daß man die Gleichung für dünne Schichten auf die Sabouraudpastille anwenden darf. Andernfalls muß man den Schluß ziehen, daß entweder die genannte Gleichung nicht anwendbar ist (die möglichen Gründe hierfür haben wir auf S. 64 schon besprochen) oder daß am Ende der Sensibilitätskoeffizient der Haut nicht unabhängig vom Härtegrad ist.

<sup>1)</sup> Das Lastkonto der Sabouraudpastille. „Fortschritte“.

Spezifische Wirkungen der verschiedenen Strahlenqualitäten. Die Hautreaktion, mit deren Hilfe die Größe der Sabouraudvolldosis (s. S. 86) festgestellt wird, ist selbstverständlich nicht von der physikalischen, sondern von der biologischen Dosis abhängig. Somit sind sämtliche Schlüsse, welche wir daraus ziehen können, davon abhängig, ob der Sensibilitätskoeffizient vom Härtegrad unabhängig ist oder nicht. Bei der physikalischen Dosis wissen wir genau, in welcher Weise der Härtegrad seinen Einfluß geltend macht. Haben wir erst einmal ein Mittel, um die physikalische Dosis für alle Härtegrade festzustellen, so werfen wir die weitere, ganz besonders interessante und wichtige Frage auf: Sind nun auch für die biologische Dosis die Verhältnisse die gleichen?

Praktisch stellt sich die Frage so: Man hat mit zwei Strahlungen verschiedenen Härtegrades die gleiche physikalische Dosis verabfolgt. Zeigt sich jetzt in den beiden Fällen auch die gleiche biologische Wirkung?

Wenn ja, so ist der Sensibilitätskoeffizient vom Härtegrad unabhängig. Wenn nicht, so ändert es sich mit dem Härtegrad. Im erstern Falle gäbe es keine spezifische Wirkung der Strahlenqualität. Im letztern müßte man mit einer solchen rechnen.

Den ersten Versuch einer Beantwortung dieser interessanten Frage hat H. Meyer gemacht. Leider ist auch er in den Fehler verfallen, daß er die Flächenenergie mit der Sabouraudpastille gemessen hat. Das heißt er hat die Multiplikation mit dem Faktor  $\frac{b^*}{b}$  unterlassen. Da er dann bei der härteren Strahlung die größere biologische Wirkung erhalten hat, so müßte erst untersucht werden, ob die Wirkung im Verhältnis  $\frac{b^*}{b}$  größer war. Ist das Verhältnis tatsächlich größer als  $\frac{b^*}{b}$ , so besteht unleugbar eine Zunahme des Sensibilitätskoeffizienten mit zunehmendem Härtegrad. Entspricht es aber ungefähr dem Werte  $\frac{b^*}{b}$ , so muß eine solche Spezifität in Abrede gestellt werden.

An und für sich wäre ja eine Spezifität des Härtegrades nicht von vornherein unwahrscheinlich, wenn man bedenkt, daß doch auch die Lichtstrahlen verschiedener Wellenlänge spezifische Wirkungen zu entfalten scheinen. Trotzdem ziehen wir vor, von dieser Annahme abzusehen, solange uns nicht überzeugende Versuchsergebnisse zu dieser Komplikation zwingen.

Übrigens ist auch die Spezifität der Lichtstrahlen verschiedener Wellenlänge längst nicht über alle Zweifel erhaben. Bevor man den Beweis hierfür als erbracht ansehen kann, müßte erst festgestellt werden, ob sich diese sogenannte Spezifität nicht einfach auf Grund der verschiedenen Absorption erklären ließe.

Die Absorption der kurzwelligen Strahlen geschieht bekanntlich in den allerobersten Schichten. Was noch bis zur Intima der Hautkapillaren vordringt, wird dort unerbittlich restlos transformiert, ganz abgesehen davon, daß schon in den obersten Schichten die Absorption der kurzwelligen Strahlen eine weit stärkere ist als bei den langwelligen. Für das Stratum germinativum, welches von den Kurzwelligen besonders stark geschädigt wird (vielleicht auch die Intima der Kapillaren) steht es wohl außer Zweifel, daß es von den Kurzwelligen einen weit größern Bruchteil absorbiert, als von den Langwelligen. Auch hier kann nur eine quantitative Betrachtung unter Berücksichtigung der Halbwertschichten die Frage nach der Spezifität der Strahlenqualität entscheiden.

#### E. Die Zukunft der Dosierungsfrage.

Auf dem letzten Röntgenkongreß (Berlin 1912) wurde vom Vorsitzenden gesagt, die Arbeiten über Dosierung seien auf einem toten Punkte angelangt. Fragen wir nach dem Grund, so müssen wir erkennen, daß wir gegenwärtig auf einem Punkte stehen, von wo ein weiteres Fortkommen nicht sowohl durch Erfindung neuer Apparate, als vielmehr durch Klärung der theoretischen Grundlagen möglich ist.

Darum habe ich auch einen großen Teil dieser Schrift auf möglichste Klarlegung all dieser Fragen verwendet. Das größte Hindernis praktischer Art ist heute noch die Schwierigkeit, für die Flächenenergie ein Maß zu finden, welches vom Härtegrad unabhängig ist. Möglich ist jedoch die Lösung des Problems mit einer radioelektrischen Methode oder mit der vorgeschlagenen Modifikation des Schwarzschen Kalomelverfahrens, eventuell auch mit einer verbesserten jodometrischen Methode nach Freund bzw. Bordier und Gallimard.

Wir werden dann wissen, wie viel Sabouraud Dosen wir bei einem bestimmten niedrigen Härtegrad, oder welchen Bruchteil einer Sabouraud Dosis wir bei einem bestimmten hohen Härtegrad geben müssen, um die Flächenenergie einer Sabouraud Dosis bei deren Normalhärte zu erreichen. Wir werden kontrollieren, ob dieses Ergebnis mit den Halbwertschichten der betreffenden Strahlungen im Ba-Pt-Cy stimmt, entsprechend Gleichung (57). Wir werden daraus die Anzahl der Sabouraud Dosen ableiten, welche wir geben müssen, um mit harten Strahlen die gleiche Hautreaktion auszulösen, wie wir sie mit der Normalhärte erreichen. Wir werden das Ergebnis dieser Rechnung mit den Erfahrungen der Kliniker vergleichen, welche unter dessen die gleiche Frage an der lebenden Haut geprüft haben werden. Die qualitativen Beobachtungen von H. E. Schmidt sind ja von andern bestätigt worden, dagegen die quantitativen Verhältnisse sind noch nicht genügend erforscht. Und dann wird uns der Vergleich der Ergebnisse der physikalischen Messung und der klinischen Beobachtung erkennen lassen, ob und in welchem Grade eine spezifische Reaktion der Haut auf verschiedene Härtegrade vorliegt oder ob sich deren Verhalten rein physikalisch erklären läßt.

#### F. Die Dosierungsmethoden für die Oberflächentherapie.

Nach den gleichen Grundsätzen, die uns bei der Beurteilung der Methoden der Intensitäts- bzw. Flächenenergiemessung geleitet haben, werden wir auch die Dosierungsmethoden einzuteilen haben, denn jede unter ihnen fußt auf einer der erstgenannten Messungen. Zur Vermeidung von Wiederholungen wird daher vielfach auf den zweiten Abschnitt zurückverwiesen werden.

Wir werden auch hier den unzutreffenden Ausdruck „direkte“ und „indirekte“ Methoden fallen lassen und von primären oder elektrodynamischen und von sekundären oder radiodynamischen Methoden sprechen.

##### 1. Die elektrodynamischen Methoden.

Alle elektrodynamischen Methoden, welche wirklich praktische Verwendung gefunden haben, beruhen auf der Messung von solchen Größen, welche sich auf den Sekundärstrom beziehen. Daß man mit bloßer Beobachtung der Sekundärstromstärke nur dann auskommt, wenn man stets mit dem gleichen Härtegrade arbeitet, ist im zweiten Abschnitt ausführlich dargelegt und begründet worden. Sobald man aber Vergleiche zwischen verschiedenen Strahlenqualitäten ziehen will, wird man die Berücksichtigung der Sekundärspannung nicht umgehen können.

##### a) Messung der Sekundärspannung.

##### a) Die parallele Funkenstrecke.

Es ist von Kromayer der Vorschlag gemacht worden, die parallele Funkenstrecke als Maß für die Sekundärspannung zu verwenden. Man könnte dann die Leistung des Sekundärstromes berechnen als das Produkt aus der Länge des parallelen Funkens und der Milliampèrezahl des Sekundärstromes. Daraus erhielt man die Sekundärstromenergie durch Multiplikation mit der Betriebszeit. Da die Funkenlängen in Zentimetern und die Sekundärstromstärken in Milliampères gemessen werden, so erhielt man nach Kromayer für die Leistung des Sekundärstromes eine in „Milliampèrezentimeter“ gemessene Größe.

Dieser Vorschlag ist mit Recht kritisiert worden mit dem Hinweis auf die Unzuverlässigkeit der Angaben über parallele Funkenlängen für verschiedene Betriebsweise.

β) Spannungsmessung nach Klingelfuß und nach Bergonié.

Bereits im zweiten Abschnitt haben wir darauf hingewiesen, welche Bedeutung die Messung der wirksamen Sekundärspannung für die Bestimmung der elektrischen Energie des Sekundärstromes hat. Es sei daran erinnert, daß die Verwendung solcher Spannungsgrößen zu Messungen der Röntgenenergie nur unter folgenden Voraussetzungen berechtigt ist:

1. Während des Stromdurchganges durch die Röhre muß die Spannung soweit konstant sein, daß man die Sekundärenergie nach der Formel

$$S = s \cdot \int_0^T i \, dt \quad (63)$$

berechnen darf, anstatt die rigorosere Gleichung

$$S = \int_0^T s \cdot i \cdot dt \quad (64)$$

zu benutzen. Denn die Instrumente von Klingelfuß und Bergonié liefern uns ja nicht die Spannung als Funktion der Zeit, sondern nur deren Mittelwert für die Zeit des Stromdurchganges durch die Röhre.

2. Die genannten Spannungsmesser müssen zuverlässige Zahlen liefern. Ihre Angaben müssen der wirksamen Spannung zum mindesten proportional sein.

3. Die zwischen die Sekundärstromenergie und die Röntgenenergie geschalteten Transformationen müssen konstanten Nutzeffekt haben, d. h. diese Nutzeffekte müssen von der Sekundärspannung, bzw. vom Härtegrade unabhängig sein.

Ist Bedingung 1. erfüllt, so hat überhaupt erst die Messung der Sekundärspannung einen Sinn, denn wenn man Gleichung (64) anwenden sollte, so müßte man die Spannung  $s$  als Funktion der Zeit kennen, und dies ist mit den Instrumenten von Klingelfuß und Bergonié unmöglich. Es verbleibt dann nur das Integral in Gleichung (63), dessen Wert wir am elektromagnetischen Milliampèremeter ablesen. Dasselbe gibt uns ja auch nicht die Sekundärstromstärke als Funktion der Zeit, sondern einen Mittelwert

$$i_m = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i \cdot dt \quad (65)$$

und damit geht Gleichung (63) über in

$$S = s \cdot i_m \cdot T. \quad (66)$$

Ist Bedingung 2. erfüllt, so darf man in diese Gleichung für die Größe  $s$  die Angabe eines der genannten Spannungsmesser einsetzen.

Wir führen dann den Wert der Sekundärstromenergie aus Gleichung (66) ein in Gleichung (26) und erhalten:

$$R = \frac{n \cdot k \cdot s \cdot i_m \cdot d}{2^{\frac{g}{c}}} \quad (67)$$

Die Flächenenergie der Röntgenstrahlung,  $F$ , ist dann proportional der Größe  $R$ , und umgekehrt proportional dem Quadrate der Fokaldistanz,  $r$ . Den Proportionalitätsfaktor bezeichnen wir mit  $p$  und schreiben:

$$F = \frac{p \cdot n \cdot k \cdot s \cdot i_m \cdot T}{r^2 \cdot 2^{\frac{g}{c}}} \quad (68)$$

Eine Vereinfachung tritt hier ein, wenn wir unsere auf Seite 98 ff. definierte technische Bestrahlungsgröße entsprechend Gleichung (28) einführen und schreiben:

$$F = \frac{p \cdot n \cdot k \cdot s \cdot B}{2^c \cdot g} \quad (69)$$

Erinnern wir uns endlich an die Beziehung, welche laut Gleichung (54) zwischen der Flächenenergie und der Dosis besteht, so geht Gleichung (69) über in

$$D = \frac{7 \cdot p \cdot n \cdot k \cdot s \cdot B}{10 \cdot a \cdot 2^c \cdot g} \quad (70)$$

Ist nun endlich noch Bedingung 3. erfüllt, so dürfen wir alle Konstanten in eine einzige, C, zusammenfassen und erhalten:

$$D = C \cdot \frac{s}{a} \cdot \frac{B}{2^c \cdot g} \quad (71)$$

An dieser Gleichung ist die Verwendbarkeit aller elektrodynamischen Dosierungsmethoden zu ermessen, denn sie alle stützen sich auf die elektrische Energie des Sekundärstromes.

Dabei kommt es natürlich darauf an, ob man seine Messungen auf einen bestimmten Härtegrad beschränken will oder nicht. Ersteres ist für viele Aufgaben der Röntgentechnik eine sehr lästige Beschränkung. Da aber, wo man sich damit begnügen kann, vereinfacht sich allerdings die Beurteilung ganz wesentlich. Man kann dann die Größe s als konstant betrachten, mit C vereinigen und hat damit eine Veränderliche wenigen in Gleichung (71). Nur muß dann jeweils angegeben werden, bei welchem Härtegrade die Messung ausgeführt worden ist.

Sollen aber Resultate allgemeiner Natur erhalten werden, d. h. wünschen wir eine Dosierungsmethode zu besitzen, welche für alle Härtegrade brauchbare Angaben liefert, so müssen wir die genannte Beschränkung kassieren und die Größe s als Veränderliche in Gleichung (71) stehen lassen.

Dann müssen aber auch alle drei obengenannten Bedingungen erfüllt sein. Stoßen wir aber irgendwo auf Widersprüche, so ergibt sich mit Notwendigkeit, daß eine der drei Bedingungen nicht erfüllt ist.

Gehen wir jetzt zu einem bestimmten Problem über, welches uns die Bedeutung der Änderung des Härtegrades veranschaulichen soll. Wir bestrahlen zwei Hautpartien, mit der gleichen Bestrahlungsgröße, d. h. aus gleicher Fokaldistanz, während gleich langer Zeit und mit der gleichen Sekundärstromstärke (also gleich viele Milliampères, abgelesen an einem elektromagnetischen Instrument), aber bei verschiedenem Härtegrad.

Die Dosis wird dann nicht in beiden Fällen die gleiche sein. Bezeichnet man wieder, wie früher, mit \* alle Größen, welche sich auf die härtere Strahlung beziehen, so gilt für die weichere der beiden Strahlungen die Gleichung (71) und für die härtere

$$D^* = C \cdot \frac{s^*}{a^*} \cdot \frac{B}{2^{c^*} \cdot g} \quad (72)$$

und die beiden Dosen verhalten sich, wie folgt:

$$\frac{D^*}{D} = \frac{a}{a^*} \cdot \frac{s^*}{s} \cdot 2^{\frac{g(c^* - c)}{c \cdot c^*}} \quad (73)$$

Nicht zu vergessen ist hierbei, daß dies die physikalischen Dosen sind. Sollte es sich herausstellen, daß die Haut auf die gleichen physikalischen Dosen Röntgenlichtes von verschiedenem Härtegrade verschieden reagiert, so müßte die rechte Seite der Gleichung (73) noch

mit dem Quotienten der Sensibilitätskoeffizienten multipliziert werden, damit man aus dem Quotienten der physikalischen Dosen denjenigen der biologischen Dosen erhalte.

Um die Ideen noch besser zu fixieren, gehen wir zu einem bestimmten Beispiel über. Klingelfuß und Bergonié haben ihre Instrumente nach Benoistgraden geeicht. Man überzeugt sich aus Tafel I daß beide Kurven zwischen B. 4. und B. 7. einen ziemlich genau geradlinigen Verlauf haben. Wir wählen dieses Intervall in der Annahme, daß hier die regelmäßigsten Verhältnisse vorliegen, und entnehmen dem Schema Fig. 9, daß den Benoistgraden 4. und 7. die Halbwertschichten (im Wasser) von 0,63 cm und 0,84 cm entsprechen. Danach wird in Gleichung (73)

$$\frac{a}{a^*} = \frac{0,63}{0,84} = 0,75. \quad (74)$$

Der dritte Faktor, die Potenz von 2, ist um so größer, je dicker das Röhrenglas ist. Die dünnsten Röhren messen 0,02 cm und die dicksten 0,11 cm für den Zentralstrahl. Was die Größen  $c$  und  $c^*$  betrifft, so haben wir auf Seite 92 festgestellt, daß die Halbwertschichten im Glas ziemlich genau den elften Teil derjenigen im Wasser betragen. Wir haben also zu setzen:

$$c = 0,057 \quad \text{und} \quad c^* = 0,076 \quad (75)$$

und erhalten damit

$$2^{\frac{g(c^* - c)}{c \cdot c^*}} = \begin{cases} 1,06 \text{ für die dünnsten Röhren.} \\ 1,40 \text{ für die dicksten Röhren.} \end{cases} \quad (76)$$

Was endlich den zweiten Faktor, den Quotienten der Spannungen betrifft, so erhält man verschiedene Werte, je nachdem man nach Klingelfuß oder nach Bergonié mißt. Entsprechend Tafel I berechnet man

$$s^* = \begin{cases} 2,5 \text{ nach Klingelfuß.} \\ 1,7 \text{ nach Bergonié.} \end{cases} \quad (77)$$

Daraus wird endlich

$$\frac{D^*}{D} = \begin{cases} \left. \begin{array}{l} 3,75 \text{ für dickste Röhren} \\ 2,65 \text{ für dünnste Röhren} \end{array} \right\} \text{ nach Klingelfuß.} \\ \left. \begin{array}{l} 2,4 \text{ für dickste Röhren} \\ 1,8 \text{ für dünnste Röhren} \end{array} \right\} \text{ nach Bergonié.} \end{cases} \quad (78)$$

Wie stimmt dieses Ergebnis mit unsern Erfahrungen? Ich wage auf Grund der bisher veröffentlichten Zahlen noch kein Urteil zu fällen, doch scheint mir, die Verhältniszahlen nach Klingelfuß seien reichlich hoch. Man denke, daß nach diesem Ergebnis die gleiche Zahl von Milliampèreminuten in gegebener Fokaldistanz bei einer Strahlung von 7. B. die  $2^{1/2}$  bis beinahe vierfache Dosis gegenüber 4. B. erzeugen soll, wobei die dünnsten Röhren an der untern, die dicksten an der obern Grenze stehen. Wollte man zur Erklärung verschiedene Sensibilitätskoeffizienten bei verschiedenem Härtegrade annehmen, so käme man auf eine Abnahme dieses Koeffizienten bei zunehmender Härte, ein Ergebnis, welches zu den Versuchen von H. Meyer (s. S. 74) in Widerspruch stünde.

Am ehesten wird sich diese Frage entscheiden lassen, wenn einmal die radioelektrischen Methoden soweit entwickelt sind, daß man sie praktisch verwerten kann.

#### $\gamma$ ) Die Halbwertschicht.

Hat sich erst einmal eine der beiden Skalen (Klingelfuß und Bergonié) als richtig erwiesen, oder ist an den beiden eine zutreffende Korrektur angebracht worden, so kann man auch die Halbwertschicht als Maß der Sekundärspannung gebrauchen, denn sobald der Zusammenhang zwischen den Größen  $s$  und  $a$  endgültig festgestellt ist, läßt sich der Wert des Quotienten  $\frac{s}{a}$  für jeden einzelnen Fall leicht berechnen.

Selbstverständlich müssen dabei die gleichen drei Bedingungen erfüllt sein, welche

für die Anwendung der Spannungsmesser aufgestellt wurden. Es soll hier nur festgestellt werden, daß sich die Ableitung der Dosis aus der Sekundärstromenergie mit dem absoluten Härtemesser ebensogut durchführen läßt, wie mit einem Sekundärspannungsmesser.

#### b) Die Messung der Sekundärstromstärke.

##### α) Das Milliampèremeter.

Unter der Voraussetzung eines bestimmten Härtegrades kann man, wie im letzten Kapitel angedeutet, die Sekundärspannung aus der Rechnung weglassen und nur die Sekundärstromstärke als Maß für die Dosis benützen, unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Fokaldistanz und der Bestrahlungszeit. Mit andern Worten, man hat einfach eine bestimmte Bestrahlungsgröße, B, zu geben. Nachdem wir gesehen haben, wie einfach man diese Größe bestimmen kann, und nachdem zu ihrer Messung die Einheit

$$1 \text{ Walter} = \frac{1 \text{ Milliampère} \cdot 1 \text{ Sekunde}}{1 \text{ Quadratcentimeter}}$$

eingeführt worden ist, fällt für die Anwendung dieser Methode jede Rechnung fort. Wir kommen hierauf unter der Überschrift „kombinierte Methoden“ zurück. Es sei aber schon hier daran erinnert, daß man die Methode nur für einen bestimmten Härtegrad anwenden kann, es sei denn, daß man die Zahl der nötigen Bestrahlungseinheiten für verschiedene Härtegrade festgestellt habe.

##### β) Das Voltameter.

Das Voltameter hat vor dem Milliampèremeter den Vorteil, daß es nicht den Strom mißt, sondern das Produkt aus Strom und Betriebszeit. Es fällt also die Multiplikation der Sekundärstromstärke mit der Bestrahlungszeit fort. Da wir uns aber sowieso die Rechnung durch eine Graphik oder ein Schiebelineal ersparen, so hat dieser Vorteil nicht so gar große Bedeutung.

Immerhin bringt der Fortfall einer Veränderlichen eine Vereinfachung, die auch der graphischen Darstellung zugute kommt. Man erhält dann anstatt einer Hyperbelschar kombiniert mit einem Strahlenbüschel (Tafel III) ein einziges Strahlenbüschel (Tafel IV). Man mißt alsdann einfach die Fokaldistanz, sucht die entsprechende Gerade in der Figur, verfolgt sie bis zum Schnitt mit demjenigen Niveau, welches der beabsichtigten Zahl von Bestrahlungseinheiten entspricht und geht von dem gefundenen Schnittpunkte senkrecht nach unten bis auf die horizontale Skala. Dort trifft man auf diejenige Zahl von Milliampèreminuten bzw. Milliampèresekunden, bis zu welchen man das Voltameter muß steigen lassen, damit die gewollte Zahl von Bestrahlungseinheiten verabreicht werde.

Haben wir z. B. eine Fokaldistanz von 18 cm gemessen, und wollen wir 4,2 Walter verabreichen, so verfolgen wir die Gerade 18 bis zum Schnitt mit dem Niveau 4,2, gehen von diesem Punkte hinunter bis auf die horizontale Skala und treffen dort auf die Zahl  $22\frac{2}{3}$ . Das will sagen, daß wir das Voltameter auf rund 23 Milliampèreminuten müssen steigen lassen, damit bei 18 cm Fokaldistanz die Bestrahlungsgröße von 4,2 Walter erreicht werde.

Auch das Schiebelineal würde sich noch mehr vereinfachen. Ich habe aber von der Konstruktion eines solchen abgesehen, weil ja für das Voltameter schon die Graphik die denkbar einfachste Gestalt annimmt, und überdies meines Wissens das Voltameter nur wenig im Gebrauch ist.

## 2. Die radiodynamischen Methoden.

Nach der Art der Energietransformation, welche für die Dosierung nutzbar gemacht wird, gruppieren sich die radiodynamischen Dosierungsmethoden in gleicher Weise, wie die radiodynamischen Methoden der Intensitätsmessung. Die theoretischen und experimentellen Grundlagen dieser Methoden sind daher zum großen Teile bereits im zweiten Abschnitt ent-

halten und zur Vermeidung von Wiederholungen werden wir hin und wieder auf jene Erörterungen zu verweisen haben.

Besprochen werden in diesem Abschnitte diejenigen Punkte, worin sich die Dosierung von der Intensitätsmessung grundsätzlich unterscheidet, außerdem aber auch die praktische Verwertung der theoretisch und experimentell festgelegten Tatsachen.

a) Die Thermometerröhre nach Köhler (1905).

Die Köhlersche Methode der Dosierung darf insofern unter die radiodynamischen Methoden eingereicht werden, als sie die Transformation von Strahlungsenergie (sekundäre Kathodenstrahlen) in Wärmeenergie der Messung dienstbar macht. Sie steht aber dadurch in Gegensatz zu allen andern radiodynamischen Methoden, daß es nicht die Röntgenenergie ist, welche dieser Transformation unterliegt, sondern eine gleichzeitig mit der Röntgenenergie auftretende, und mit ihr aus den Kathodenstrahlen hervorgehende Energieform. Stehen die Nutzeffekte dieser Transformationen in einem konstanten Verhältnis, so ist gegen das Köhlersche Prinzip von diesem Standpunkte aus nichts einzuwenden.

Einer persönlichen Mitteilung des Herrn Dr. Köhler entnehme ich, daß die „Thermometerröhren“ nicht mit Hilfe eines Reagenzkörpers, sondern mit Hauterythemdosen geeicht werden, so daß das aus der Röhre mitgegebene Dokument die biologische Dosis angibt.

Auch die Köhlersche Methode nimmt bisher auf den Härtegrad nicht ausführlich Rücksicht. Es werden bloß die Grenzen angegeben, innerhalb welcher die Eichung gültig sein soll, nämlich 5 und 8 Grad Benoist, entsprechend 7 und 9,5 mm Halbwertschicht. Die mittlere Härte wäre demnach 8,25 mm und die äußerste Abweichung  $\pm 1,25$  mm, was einem prozentualen Fehler von  $1,25 : 8,25 = 15\%$  entspricht. Dieser Fehler wird aber durch die geringere Absorption der härteren Strahlung im Glas wieder teilweise oder ganz kompensiert, je nach der Dicke des

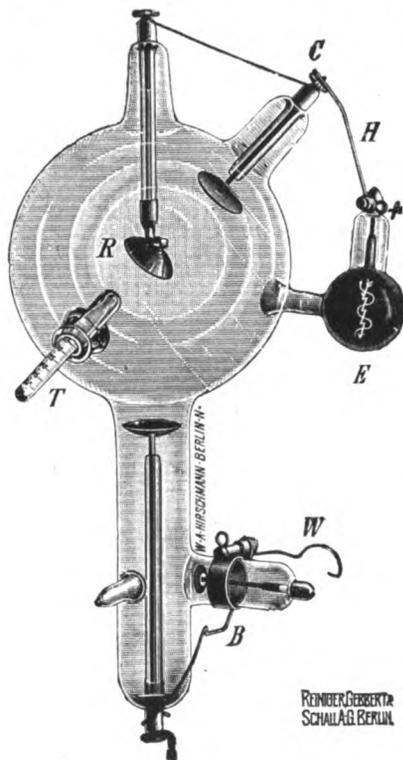


Fig. 14.

Thermometerröhre nach Köhler.

Glases für den Zentralstrahl. Führt man die Rechnung durch, so findet man für dünnstes Röhrenglas (0,2 mm) eine Kompensation von 3% und für dickstes Glas (1,1 mm) 16%, so daß also an den Grenzen der zulässigen Härtegrade der Fehler bei dünnem Röhrenglas bis auf 12% ansteigt, während er für dickstes Glas vollständig kompensiert wird. Einen möglichen Fehler von 12% müssen wir aber bei allen andern Methoden sicherlich ebenfalls in Kauf nehmen.

Die Thermometerröhre ist durch Fig. 13 dargestellt. Für den Gebrauch derselben gibt der Erfinder folgende Vorschrift:

„Bevor die Röhre das erstmal zur Therapie gebraucht wird, fülle man den in die Röhre ragenden Glaszylinder 5 mm hoch mit dem beigegebenen Metallpulver an, darauf stelle man das Thermometer auf letzteres, umgebe es ebenfalls mit Metallpulver (das man bequem auf einem gefalteten Stück Papier eingeleiten lassen kann) und dränge am oberen Rande des Gefäßes ein kleines Streifchen Mull oder dergleichen derart um das Thermometer, daß letzteres und das Metallpulver absolut fest sitzen, wie man die Röhre auch halten mag.

„Der Patient liegt oder sitzt. Die Umgebung der zu bestrahlenden Partie wird auf eine Ausdehnung von etwa 40 cm mit  $\frac{1}{8}$  mm dickem Blei geschützt, die Augen besser doppelt bedeckt.





„Nun wird die Röhre (Glaswand) genau 5 cm über die betreffende Partie richtig eingestellt, und zwar derart, daß das Thermometer auf der vom Induktor abgewandten Seite, die Skala nach oben gerichtet, sich befindet, weil nur so, ein bequemes Ablesen der Grade möglich ist. Nachdem man dafür gesorgt hat, daß keine Leitungsschnüre den Patienten berühren, schaltet man zuerst den Unterbrecher, dann den Induktor ein. In diesem Augenblicke sehe man nach der Uhr; dann schaltet man die Widerstände so, daß spätestens nach 2 Minuten die Röhre ruhig und gleichmäßig arbeitet und von jetzt ab am Schaltbrett nichts mehr geändert zu werden braucht.

„Genau am Ende der ersten Minute sehe man zum ersten Male nach, wie viel Grade, bzw. halbe Grade das Thermometer zeigt. Dasselbe tue man mit Schluß der 10. Minute. Die sich aus beiden Temperaturen ergebende Differenz suche man in untenstehender Tabelle auf; daselbst findet man rechts daneben die Anzahl von Minuten, welche die Sitzung im ganzen zu dauern hat, um in einer einzigen Sitzung die für eine Reaktion mittlern Grades bei erkrankter Haut eines Erwachsenen erforderliche Röntgenstrahlendosis zu verabfolgen.“

Da die Röhre ihren Härtegrad über die angegebenen Grenzen hinaus nicht verändern darf, so muß im voraus diejenige Belastung ausprobiert werden, welche die Röhre aushält, denn man kann selbstverständlich nicht mitten im Betriebe die Röhre wechseln.

Eben so wichtig ist, daß die vorgeschriebene Glas-Haut-Distanz von 5 cm genau eingehalten werde, weil bei einem Röhrendurchmesser von 15 cm (dies ist die Größe des bisherigen Modelles) jeder Fehler von 1 cm auf die Dosis einen Fehler von ca. 10% ihres Wertes ausmacht. Diese Kontrolle geschieht am einfachsten mit einem Pappstreifen von 5 cm Breite, welchen man zwischen Röhre und Haut schiebt.

#### Dosierungstabelle nach Köhler.

Differenz zwischen 5. und 10. Minute	Gesamtdauer einer Bestrahlung
5°,0	45 min
5°,5	40 "
6°,0	36 "
6°,5	32 "
7°,0	28,5 "
7°,5	25,5 "
8°,0	23,5 "
8°,5	21,5 "
9°,0	19,5 "
9°,5	18 "
10°,0	16,5 "
10°,5	15 "

#### b) Die radioelektrischen Methoden.

Wie schon im zweiten Abschnitt hervorgehoben wurde, bieten die radiodynamischen Methoden den großen Vorteil, daß ihre Angaben vom Härtegrade unabhängig sind. Große Schwierigkeiten hat aber die praktische Ausführung gemacht. So viel mir bekannt, hat weder der Vorschlag von Piffard noch derjenige von Beez (S. 61) zu einer praktisch verwertbaren Lösung geführt. In allerneuester Zeit ist das von Fürstenau konstruierte Instrument auf den Markt gebracht worden.

#### c) Die radiochemischen Methoden.

##### a) Das Holzknechtsche Chromoradiometer (1902).

hat heute nur noch historisches Interesse, insofern es den ersten Versuch darstellt, auf die Farbveränderung abzustellen, welche durch Röntgenstrahlen in gewissen Substanzen hervorgerufen werden. Holzknecht benutzte hierzu die Halogensalze. Leider war die Farb-

veränderung zu wenig deutlich und zu sehr von verschiedenen Einflüssen, namentlich Temperatur und Feuchtigkeit, abhängig.

β) Der Immelmanssche Röntgenstrahlenmesser (1904).

Dieses Instrument, heute ebenfalls verlassen, ist dadurch von Bedeutung geworden, daß es den ersten und neben dem Kienböckschen Quantimeter und allenfalls noch dem Straußschen Lichtpapierverfahren den einzigen erwähnenswerten Versuch darstellt, die photographische Wirkung der Röntgenstrahlen zu Meßzwecken auszubeuten.

Eine im Entwickler liegende photographische Platte wird zugleich mit der Haut bestrahlt und nachher fixiert. Dabei ist dem Erfinder besonders hoch anzurechnen, daß er die gleichzeitige Mitbestrahlung einer Härteskala angeordnet hat, während die im folgenden beschriebenen Reagenzkörpermethoden allzusehr in Versuchung führen, die Bedeutung des Härtegrades zu vernachlässigen.

γ) Das Kienböcksche Quantimeter.

Das Quantimeter stellt bis heute die beste Lösung der photographischen Dosierung dar und es ist diese Methode wohl auch die einzige photographische, welche in weitem Kreisen Eingang in die Röntgentechnik gefunden hat.

Sie beruht darauf, daß auf die bestrahlte Hautpartie kleine gegen das Tageslicht abgeschlossene Streifen lichtempfindlichen Papierses aufgelegt, mitbestrahlt, und hernach nach bestimmter Vorschrift entwickelt und fixiert werden. Der Grad der Schwärzung dient als Maß für die Dosis. Der einzelne Grad wird mit „1x“ bezeichnet. Die Größe desselben ist praktischer Weise so gewählt, daß die gebräuchlichste Einheit, die „Erythemdosis“ oder „Volldosis“ gerade gleich 10x ist.

Da auch Kienböck die große Bedeutung des Härtegrades für die Dosierung wohl erkannt hat, so empfiehlt er, gleichzeitig mehrere Streifen zu exponieren, von welchen der eine unbedeckt, die andern mit Aluminiumplättchen von steigender Dicke bedeckt sind. Das Aluminium hat nämlich die bequeme Eigenschaft, daß 1 mm desselben ungefähr gleich viel absorbiert, wie 1 cm Wasser, bzw. Weichteile. Daraus folgert Kienböck, daß, wenn man einen Quantimeterstreifen unter einer Aluminiumschicht von beispielsweise 2 mm Dicke exponiert, die Schwärzung dieses Streifens der Dosis unter einer Weichteilschicht von 2 cm entsprechen müsse.

Gegen diese Argumentation kann nun aber ein Bedenken nicht ganz unterdrückt werden. Infolge des Durchganges durch das Aluminium wird die Röntgenstrahlung bekanntlich gehärtet, d. h. die durch das Aluminium gedrungene Strahlung hat einen härteren Härtegrad als die neben demselben vorbeigegangene. Zwar wird auch die durch eine entsprechende Weichteilschicht dringende Strahlung gehärtet, aber wir wissen nicht, ob dies in gleicher Weise geschieht. Hauptsächlich aber müssen wir damit rechnen, daß die durch das Aluminium gehärtete auf das Quantimeterpapier sehr wahrscheinlich anders wirkt als auf die lebenden Organe. Soviel mir bekannt, warten die beiden folgenden Fragen noch einer exakten Erledigung:

1. Wird eine Röntgenstrahlung in einer Aluminiumschicht von bestimmter Dicke in gleichem Verhältnis gehärtet wie in der zehnfachen Weichteilschicht?

2. Ist für den so vergrößerten Härtegrad die Angabe des Quantimeters noch brauchbar?

Nach den Erfahrungen, welche wir über die Sabouraudpastille besitzen (s. S. 72 ff.), muß die Gültigkeit der Dosierung mit dem Quantimeter für mehr als einen bestimmten Härtegrad sehr in Zweifel gezogen werden. Auch kann ich in den Veröffentlichungen Kienböcks keine unzweideutigen Angaben über diesen Punkt finden. In seinem neuesten Aufsatz „Über das Quantimeter“, Strahlentherapie, Bd. I, S. 68, sagt der Verfasser allerdings auf S. 86 unter Ziffer 3:

„Das Quantimeterpapier reagiert, da die sensible Schicht sehr dünn ist, auf das einfallende Röntgenlicht ähnlich wie die obere Hautschicht, nämlich weniger auf hartes und mehr auf weiches Licht, so daß man die oberflächlichen Hautdosen genau kennen lernt.

Die andern Radiometer besitzen Reagenzkörper von größerer Dicke, sie reagieren daher nicht oder zu wenig auf weiches Licht.\*

Wir haben aber gesehen (vgl. S. 64), daß eine geringe Dicke des Reagenzkörpers nur die Anwendbarkeit der Gleichung (44) ermöglicht, daß sie aber an und für sich kein Kriterium für die Brauchbarkeit eines Verfahrens bei verschiedenen Härtegraden darstellt. Zur Entscheidung dieser Frage kommt es auf die Halbwertschichten der verschiedenen Strahlen in dem betreffenden Reagenzkörper an. Andererseits wird das biologische Experiment entscheiden müssen, ob man nicht auch mit dem Quantimeter — analog der Sabouraudmethode — bei harten Strahlen unterdosiert und bei weichen Strahlen überdosiert. Auch wird die Kontrolle durch die radioelektrischen Methoden weitere Klarheit schaffen.

Da aber die Silbersalze, welche das Reagens des Quantimeters darstellen dem Ba-Pt-Cy chemisch näherstehen, als den Weichteilen unseres Körpers, so ist zu erwarten, daß die Absorptionsverhältnisse sich eher an diejenigen der Sabouraudpastillen, als der Körpergewebe anlehnen werden.

Zudem darf man nicht vergessen, daß alle Sekundärstrahlen für dasjenige Medium, in welchem sie entstehen, eine besonders große Durchdringungsfähigkeit haben. Nun sind unter einer Weichteildecke von bestimmter Dicke stets eine gewisse Menge Sekundärstrahlen vorhanden, welche in den Körpergeweben, denen sie ihr Entstehen verdanken, nur wenig absorbiert werden, also auch nur eine geringe biologische Wirkung haben. Diese Sekundärstrahlen entfalten aber eine ganz beträchtliche photographische Wirkung, müssen also auch das Quantimeterpapier dementsprechend beeinflussen.

Wollte man also nach dem Vorschlage von Kienböck das Quantimeterpapier in Körperhöhlen einführen, um damit Tiefendosen zu bestimmen, so müßte man — dank der Sekundärstrahlenwirkung — unvermeidlich zu hohe Dosen ablesen.

Abgesehen von diesen Beschränkungen, welchen das quantimetrische Verfahren unterliegt, ist dasselbe heute die genaueste der radiochemischen Methoden, insofern keine andere so feine Unterschiede — Zehntel-Erythemdosen — mit der gleichen Sicherheit erkennen läßt. Immerhin bleibt abzuwarten, ob es in Zukunft möglich sein wird, stets zuverlässige Papiere und zuverlässige Reagentien zu erhalten. Daß dies nicht stets der Fall war, zeigt die Diskussion, welche sich an den „Fall Bucky“ in der Münchner Med. Wochenschrift (1911) angeschlossen hat.

Einen besonderen Vorteil bietet das quantimetrische Verfahren vor allen andern Methoden der Dosierung: der entwickelte und fixierte Quantimeterstreifen kann in die Krankengeschichte eingeklebt werden und wird dadurch zu einem bleibenden Dokument. Es gibt zurzeit kein anderes Mittel, um auch später noch zu beweisen, daß man einem Patienten eine bestimmte Dosis verabfolgt hat.

Zwei Eigenschaften endlich hat das Quantimeterpapier, welche es für den praktischen Gebrauch besonders geeignet machen:

1. Seine hohe Empfindlichkeit gestattet, es in gleicher Fokaldistanz anzubringen, wie die bestrahlte Hautpartie, während die meisten andern Reagenzkörper infolge ihrer Unterempfindlichkeit in halber Fokaldistanz angebracht werden müssen, was doch stets eine lästige Komplikation bedeutet.

2. Seine geringe Dickendimension erlaubt das direkte Auflegen auf die bestrahlte Hautpartie, ohne daß man befürchten muß, dadurch einen nennenswerten Anteil der Strahlung von der Haut abzuhalten. Auch dies ist bei den meisten andern Reagenzkörpern nicht der Fall. Diese müssen dann stets durch besondere Kautelen so angebracht werden, daß sie entweder im gleichen wirksamen Strahlenkegel, wie die Haut, oder in symmetrischer Stellung zu derselben in bezug auf die Symmetrieebene der Röhre liegen. Auch diese Komplikation fällt bei der Quantimetrie dahin.

Ein anderer Umstand dagegen ist der Verbreitung des Verfahrens sehr hinderlich

gewesen; die Notwendigkeit der Entwicklung. In dieser Beziehung sind die sogenannten „offenen“ Dosimeter dem Quantimeter überlegen, insofern es sich dort um Reagenzkörper handelt, deren Veränderung unter der Röntgenwirkung man jederzeit mit einem Blick feststellen kann.

Die Bezeichnung „offene Dosimeter“ ist nicht gerade sehr glücklich. Allerdings sind diese Reagenzkörper längst nicht so lichtempfindlich, wie das Quantimeterpapier, müssen daher nicht gleich ängstlich vor dem Einfluß des Tageslichtes geschützt werden. Immerhin dürfen dieselben doch nicht unbedenklich — namentlich nicht durch die Sonne — belichtet werden; speziell die Ba-Pt-Cy-Präparate müssen während der Bestrahlung vor dem Tageslicht geschützt werden, weil dieses die Eigenschaft hat, die von den Röntgenstrahlen erzeugten Veränderungen rückgängig zu machen.

Das Quantimeterpapier muß wegen seiner hohen Lichtempfindlichkeit in schwarzem Papier eingehüllt der Wirkung der Röntgenstrahlen ausgesetzt werden und darf erst im Dunkelmzimmer aus dieser Umhüllung genommen werden. Die Kuverts und die Streifen tragen Nummern, die jeweils im Bestrahlungsprotokoll vermerkt werden. An Stelle dieser Nummern werden nachher die fixierten, ausgewaschenen und getrockneten Streifen eingeklebt.

Die Umständlichkeit des Verfahrens wird dadurch etwas vereinfacht, daß man die exponierten Streifen verschiedener Patienten beiseite legen und gelegentlich gemeinsam entwickeln kann. Immerhin länger als 3, höchstens 6 Tage sollen die unentwickelten Streifen nicht liegen bleiben, weil der Lichteindruck auf dem Quantimeterpapier allmählich wieder zurückgeht.

Durch dieses Aufsparen geht man allerdings der sofortigen Kontrolle verlustig. Kienböck empfiehlt deshalb, gleichzeitig mit drei Meßverfahren zu arbeiten: mit geeichter Röhre, Sabouraudpastille und Quantimeter. Ob mancher Praktiker sich diese dreifache Kontrollarbeit auferlegt, möchte ich einigermaßen bezweifeln.

Man darf aber auch die Zuverlässigkeit der Protokollierung nach Kienböck nicht überschätzen. Wer garantiert denn später noch, daß die Entwicklung eines eingeklebten Streifens vorschriftsmäßig bei 18°C und nicht allzulange nach der Exposition vorgenommen wurde, daß sie genau eine Minute gedauert hat und nicht am Ende die Streifen verschiedener Patienten verwechselt worden sind, besonders wenn man nach Kienböcks Vorschlag die Entwicklung einem „geschulten Personal“ überträgt?

Die Emulsion hat nicht stets die gleiche Empfindlichkeit. Deshalb muß jeder Lieferung eine Vergleichsskala beigegeben werden. Außerdem gibt Kienböck eine Reihe von Kontrollversuchen an, welche dem Käufer des Quantimeters dazu dienen sollen, die Zuverlässigkeit des gelieferten Papieres zu prüfen. Unter diesen Methoden seien als die praktisch wichtigsten angeführt:

1. Schwärzung des Quantimeterpapiers in der Dunkelkammer vermittelt einer Glühlampe in gemessener Entfernung. Die hierzu nötige Zeit muß bei Verwendung der gleichen Lampe stets die gleiche bleiben, wenn die Empfindlichkeit des Papieres unverändert geblieben ist. Allfällige Schwankungen der Spannung in der Lichtleitung müssen mit einem Präzisionsvoltmeter kontrolliert und mit einem Rheostaten ausgeglichen werden.

2. Vergleich der neuen Lieferung des Quantimeterpapieres mit der frühern durch Röntgenbestrahlung, und zwar einmal bei schwacher, das andere Mal bei hoher Dosierung.

3. Vergleich mit der Sabouraudpastille, wobei entweder eine „Volldosis“ zu verabfolgen oder die Holzknechtsche Skala (S. 86) zu benutzen ist.

Als das sicherste Verfahren bezeichnet Kienböck selbst die jeweilige Vornahme der Glühlichtkontrolle, bevor mit der Entwicklung einer Serie von therapeutischen Streifen begonnen wird.

Alles in allem ist das Kienböcksche Quantimeter ein exaktes und zuverlässiges Dosierungsinstrument, vorausgesetzt, daß alle genannten Vorsichtsmaßregeln peinlich beobachtet werden. Seine Angaben sind für mittlere Härtegrade und für die Haut gültig. Für höhere

Härtegrade ist die Übereinstimmung mit der Hautwirkung nicht erwiesen, und auch nicht wahrscheinlich. Die Tiefenwirkung wird mit dem Quantimeter zu hoch eingeschätzt.

#### δ) Das Lichtpapierverfahren nach Strauß.

Eine Vereinfachung des Kienböckschen Verfahrens hat Strauß angegeben. Er verwendet an Stelle des Quantimeterpapiers das Satrappapier, Marke G der Firma Schering. Als Kontrolle der Schwärzung dient die Kienböcksche Skala. Die Unterschiede zwischen den Farbveränderungen des Satrappapieres und des Quantimeterpapiers sind im Allgemeinen nur gering. Fallen Sie einmal größer aus, so notiert man sich deren Betrag und trägt demselben Rechnung.

Das Straußsche Verfahren stellt somit keine selbständige Methode dar, indem es einer ständigen Kontrolle durch das Quantimeter bedarf. Dagegen ist es billiger und einfacher, weil man kein Dunkelzimmer braucht (man entwickelt im leicht verdunkelten Raum bei künstlichem Licht) und für die Temperatur des Entwicklers keine Vorschriften nötig zu sein scheinen. Die Genauigkeit mag für die Aufgaben der Röntgentherapie genügen.

#### ε) Die Jodausscheidung nach Freund, Bordier und Gallimard (1904).

Nachdem wir auf S. 65 feststellen mußten, daß die Zersetzung einer Lösung von Jodoform in Chloroform durch die Röntgenstrahlen einstweilen zu keiner eindeutigen Meßmethode für die Intensität geführt hat, so liegt es auf der Hand, daß daraus auch keine zuverlässige Dosierungsmethode abgeleitet werden konnte. Ob diese Reaktion nicht doch noch verwertet werden kann, muß der Zukunft überlassen bleiben.

#### ζ) Die Verfärbung des Ba-Pt-Cy, nach Sabouraud und Noiré.

Die Verwendung der Ba-Pt-Cy-Pastillen zur Flächenenergie wurde bereits auf S. 64 ausführlich besprochen. Es sei an dieser Stelle nur noch einmal auf die wichtige Tatsache aufmerksam gemacht, daß bei harten Strahlen zu kleine und bei weichen Strahlen zu große Werte für die Flächenenergie gefunden werden, weil die chemische Wirkung der Strahlen auf die Sabouraudpastille nicht der auffallenden, sondern der absorbierten Röntgenenergiemenge proportional ist. Hat also eine harte Strahlung die gleiche Wirkung auf die Pastille hervorgerufen, wie eine weiche, von welcher doch prozentual mehr absorbiert wurde, so muß die Flächenenergie der härteren Strahlung größer gewesen sein.

Andrerseits könnte man erwarten, daß dieser Fehler durch das wechselnde Absorptionsvermögen der Haut kompensiert würde, denn auch die Haut, nicht bloß die Pastille, absorbiert von der härteren Strahlung weniger als von der weicheren.

Sicher ist zunächst so viel, daß die Wirkungen der beiden Fehler eine entgegengesetzte ist: sie subtrahieren sich. Tatsächlich subtrahieren sie sich aber nicht zu Null, sondern die Abnahme der Absorption in der Haut beim Übergang zu einer härteren Strahlung muß eine beträchtlichere sein, als im Ba-Pt-Cy, da sämtliche Beobachter darin übereinstimmen, daß bei harten Strahlen die biologische Wirkung bedeutend geringer ist, als man nach den Angaben der Sabouraudpastillen erwarten sollte. Wir müssen hieraus den folgenden Schluß ziehen:

Wird je eine Sabouraudpastille von zwei Strahlungen verschiedenen Härtegrades auf die Testfarbe B gebracht, so hat die härtere Strahlung mit der größeren Flächenenergie gewirkt. Trotzdem ist bei gleicher Wirkung auf die Pastille die Hautwirkung der härteren Strahlung die geringere, weil die Zunahme an Flächenenergie überkompensiert wird durch die Abnahme der Absorptionsfähigkeit der Gewebe.

Leider sind noch nicht genügend Erfahrungen gesammelt, welche uns gestatten würden, einen genauen Zusammenhang zwischen den Angaben der Sabouraudpastille und den

biologischen Wirkungen bei verschiedenen Härtegraden aufzustellen. Wir wissen einstweilen bloß, daß man bei sehr harten Strahlen weit mehr als eine Volldosis nach Sabouraud geben darf, ohne ein Erythem erwarten zu müssen, und daß man bei sehr weichen Strahlen das Erythem schon bei einem Bruchteil der Erythemdosis nach Sabouraud erwarten kann.

Allerdings ist ein solches Weichstrahlenerythem einem Hartstrahlenerythem wohl weder anatomisch noch klinisch gleichwertig. Als feststehend dürfen wir aber die Tatsache annehmen, daß man mit der Sabouraudpastille überdosiert bei weichen und unterdosiert bei harten Strahlen (vgl. S. 72 ff.).

Als Volldosis bezeichnet man diejenige Menge absorbierter Röntgenenergie, welche gerade noch ertragen wird, ohne daß ein Erythem entsteht. Sehr exakt ist diese Definition nicht, indem die Empfindlichkeit der Haut an verschiedenen Körperteilen und mit dem Alter wechselt. Man kann vielleicht besser sagen, die Volldosis nach Sabouraud sei diejenige absorbierte Röntgenenergiemenge, welche die Ba-Pt-Cy-Pastille bis auf den ein für alle Mal festgesetzten Grad bräune. Nur ist man dann wieder auf die Zuverlässigkeit des jeweiligen Fabrikates angewiesen. Bisher sind zwar diesbezügliche Klagen meines Wissens nicht laut geworden, und so viel ich beurteilen kann, hat sich das Sabouraudsche Verfahren dank seiner Einfachheit von allen radiodynamischen Dosierungsmethoden am meisten eingebürgert.

Infolge relativ geringer Empfindlichkeit der Reaktion muß die Pastille in halber Fokaldistanz angebracht werden, wodurch eine Verschleuderung von 75% Röntgenenergie bedingt ist. Da ferner das Tageslicht die durch die Röntgenstrahlen hervorgerufene Verfärbung rückgängig macht, so muß die Pastille während der Exposition in schwarzes Papier eingewickelt werden. Außerdem kommt sie — zum Schutz gegen Sekundärstrahlen — auf eine Metallunterlage. Endlich muß auf den Einfluß Rücksicht genommen werden, welchen die Temperatur auf den Prozeß ausübt: die Pastille muß in einer Entfernung von mindestens 2 cm von der Röhrenwand angebracht werden, weil letztere sich während des Betriebes beträchtlich erwärmt und infolgedessen Wärme ausstrahlt.

Der Vorgang der Messung ist also folgender: Man schlägt die Pastille in lichtdichtes Papier ein und befestigt sie in halber Fokaldistanz auf einer metallenen Unterlage. Sie ist so anzubringen, daß sie möglichst im gleichen Strahlenkegel liegt, wie die bestrahlte Hautpartie ohne aber die Haut zu „beschatten“, d. h. ohne irgendwo zwischen der Strahlenquelle und der bestrahlten Hautpartie zu liegen. Die Bestrahlung muß dann von Zeit zu Zeit unterbrochen werden, damit man feststellen kann, ob die Testfarbe (Teinte B) erreicht ist. Dabei darf die Pastille aber nur für kurze Zeit dem Tageslicht ausgesetzt werden, weil dessen Wirkung die Röntgenreaktion rückgängig machen würde.

Gebrauchte Pastillen können „regeneriert“ werden, indem man sie dem diffusen Tageslicht aussetzt, nicht dem Sonnenlicht, weil die Wärmestrahlen des letztern ihrerseits eine Bräunung erzeugen, so daß die Pastille nie ganz auf ihre ursprüngliche Farbe (Teinte A) zurückgelangt, sondern eine sogenannte „Residualfarbe“ behält.

Weil die Pastillen nicht immer ganz gleich ausfallen, wird jeder Lieferung eine Kontrolle für Teinte A und Teinte B beigegeben.

#### η) Die Holzknechtskala.

Holzknecht hat es mit Recht als einen Mangel der Sabouraudschen Methode empfunden, daß mit derselben nur ein einziger Vergleichswert erhältlich ist. Er hat sich deshalb bemüht, eine Skala herzustellen, welche gestattet, Teildosen abzulesen, oder sich Rechenschaft zu geben, wie weit die zu irgend einer Zeit beobachtete Verfärbung noch von der Teinte B entfernt ist.

Von größter Bedeutung für die Lösung dieser Aufgabe war es, daß Holzknecht ein Mittel fand, um den Einfluß verschiedener Beleuchtung auf die Ablesung auszuschalten. Die Sabouraudsche Vorschrift, bei Tageslicht abzulesen, bringt die Unannehmlichkeit, daß man

die Ablesung rasch vornehmen muß, um nicht durch längere Lichtwirkung die Röntgenwirkung rückgängig zu machen. Ferner ist man gehemmt, wenn man einmal am Abend (besonders im Winter!) die Ablesung vornehmen sollte.

Die erste Forderung ist nun die, daß der Vergleichskörper aus dem gleichen Materiale bestehen muß, wie die exponierte Pastille, und daß die beiden verglichenen Farbentöne gleiche Form und gleiche Größe haben. Zu diesem Zwecke empfiehlt sich am besten die Form von zwei Halbkreisen, welche sich zu einem Vollkreis ergänzen. Die Versuche Holzknachts

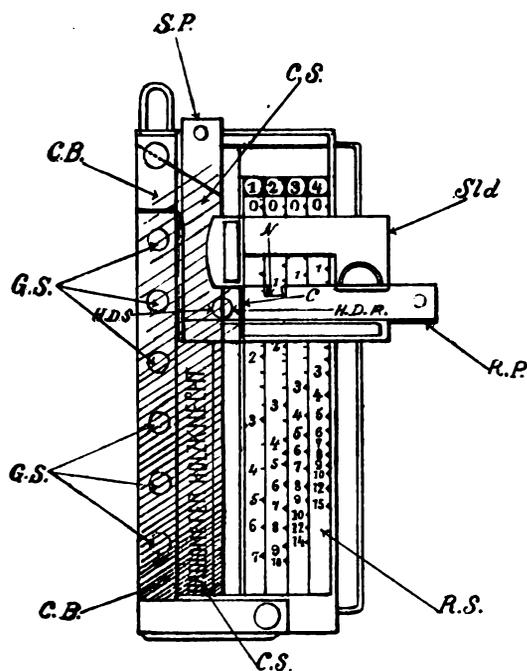


Fig. 15.

Fig. 15. Das Wichtige ist der eine geteilte helle Kreis. Die Reihe heller Scheiben ist nebensächlich.

C.S. rotbraunes Farbband von zunehmender Färbung, unter dem ein halbkreisförmiges Leuchtschirmstückchen (Skalenstück, H.D.S.) verschoben wird. Im gleichen Schlitten (Slid.) verschiebt sich das mitbestrahlte Meßstück (H.D.R.) und zwar beide solange, bis die beiden Halbkreise einen gleichfärbigen Kreis bilden. Dann liest man an derjenigen Skala ab, welche vom Ausschnitt des Kartons des Meßstückes automatisch indiziert wird. Die anderen Skalen dienen für andersempfindliche Meßstücke. G.S. Stufenskala zur vorläufigen Ablesung.

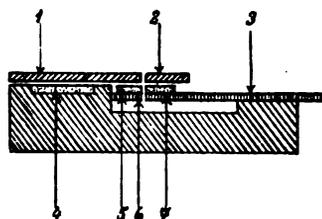


Fig. 16. Querschnitt.

1. Farbband.
2. Gleich dicke weiße Zelluloidschicht.
3. Karton des Meßstückes.
4. Empfindliches Scheibchen der Stufenskala.
5. Empfindliches Scheibchen des Skalenstückes.
6. Karton des Skalenstückes.
7. Empfindliches Scheibchen des Meßstückes.

haben dann in der Tat ergeben, daß sein nach diesen Regeln konstruiertes Instrument von der Natur der Lichtquelle unabhängige Ablesungen liefert. Die beste Kontrastwirkung aber erhält man mit der Kohlenfadenlampe.

Die verschiedenen Unterabteilungen der Skala werden dadurch hergestellt, daß über eine Reihe von Testkörpern ein Zelluloidband läuft, welches vom einen Ende gegen das andere zunehmend dunkler gefärbt ist.

Besser als jede weitere Beschreibung erläutern die Figuren 15 und 16 das Wesen des Instrumentes.

### 3) Das sensibilisierte Ba-Pt-Cy nach Bordier.

Bordier ist es gelungen, ein Präparat herzustellen, welches auf Röntgenbestrahlung intensiver reagiert, als die Sabouraudpastille. Da er außerdem die Substanz in dünnen Plättchen verwendet, so erreicht er den großen Vorteil, daß das Reagens direkt auf die Haut aufgelegt werden kann, weil es, wie das Quantimeterpapier, empfindlich genug ist, um keine Verkleinerung der Fokaldistanz zu verlangen, und dünn genug, um keine nennenswerte Menge von Röntgenenergie von der Haut abzuhalten. Die jeweilige Aufsuchung der halben Fokaldistanz und einer passenden Stellung im Strahlenkegel, wie dies bei den Methoden von Sabouraud und Schwarz sich als notwendig erwiesen hat, ist immerhin eine lästige Komplikation.

Leider ist mit dem neuen Bordierschen Reagens auch eine neue Skala entstanden,

wobei eine Bordiereinheit zu 3x (Kienböck) gerechnet wird. Die Angaben Bordiers sind von Kienböck nachgeprüft worden. Seiner „Radiotherapie“ (Stuttgart 1907, S. 68) sind die Zahlen der dritten Reihe in folgender Tabelle entnommen:

Teinte	0	I	II	III	IV
	1,8	3,6	5,8	10,0	15,0 Bordiereinheiten
	7	10	14	26	44 x Äquivalent nach Bordier
	10	14	18	32	56 x Äquivalent nach Kienböck.

Es ist nicht unmöglich, daß die Differenz darauf beruhe, daß Bordier ausdrücklich harte Strahlung verlangt, während das Quantimeter offenbar auf einen mittlern Härtegrad eingestellt ist.

Damit stimmt die Angabe, daß Teinte 0, also Bordier 1,8 mit der Erythemdosis zusammenfällt. In der Tat ist die damit zusammenfallende Zahl von 14x ungefähr diejenige „Dosis“, welche man anwenden muß, um bei harter Strahlung die Grenze des Erythemas zu erreichen, während dies mit einer Strahlung mittlern Härtegrades schon bei 10x der Fall ist.

Man sieht, daß zwar gegenüber Sabouraud, welcher nur einen einzigen Wert der Dosis bestimmt, Bordier immerhin über fünf Skalenwerte verfügt, daß aber trotzdem gegenüber Kienböck die Abstufung eine weit geringere ist, indem schon die erste Bordierstufe nach Kienböck bereits in zehn Teile untergeteilt werden kann. Andererseits betont Bordier die Nützlichkeit hoher Dosen, wie sie mit seinem Instrument gemessen werden, so z. B. Stufe IV bei hartnäckigen Epitheliomen.

#### c) Die Kalomelausscheidung nach Schwarz (1906).

Die Verwertung der Zersetzung einer Ammoniumoxalat-Sublimat-Lösung unter der Wirkung der Röntgenstrahlen zur Messung von Intensitätswerten wurde auf S. 131 ff. ausführlich besprochen. Gleichzeitig wurde darauf hingewiesen, wie gerade die „Flüssigkeitsmethoden“ die Möglichkeit bieten, die Bedeutung des Härtegrades für die Dosierung exakt zu studieren. In der jetzigen Form allerdings ist die Kalomelmethode nur auf einen bestimmten Härtegrad eingestellt. Sie teilt aber diese Beschränkung mit allen andern radiodynamischen (außer gewissen radioelektrischen) Methoden.

Wichtig ist die richtige Einstellung der Reagenzflüssigkeit. Um jeden Verlust an Röntgenstrahlen durch Absorption in den Wänden des Behälters nach Möglichkeit auszuschalten, füllt Schwarz seine Lösung in gläserne Prü fzellen, welche mit einem Gummihütchen überdeckt sind. Die Exposition geschieht dann in einer solchen Stellung, daß die Strahlung durch den wenig absorbierenden Gummi hindurch auf die Flüssigkeit fällt. Nach Beendigung der Exposition wird die Prü fzelle umgekehrt und man vergleicht den Grad der Trübung, welche das ausgefällte Kalomel verursacht, mit einer Standardskala.

Infolge relativ geringer Empfindlichkeit dieser Reaktion muß die Prü fzelle in halber Fokaldistanz angebracht werden. Da ferner die Flüssigkeit einen beträchtlichen Anteil der eindringenden Röntgenstrahlung absorbiert, so darf sie nicht über dem bestrahlten Hautfeld angebracht werden, weil hinter ihr, d. h. in ihrem Schatten, die Haut zu wenig Röntgenenergie erhalten würde. Bringt man sie aber seitlich an, so muß man darauf achten, daß man sie nicht in einen weniger wirksamen Teil des Strahlenkegels bringt, als die Haut.

Dementsprechend hat Schwarz vorgeschlagen, die Röhre so zu stellen, daß die Haut und der Meßapparat symmetrisch zur Symmetrieebene der Röhre liegen.

Um dies leicht und sicher zu erreichen, zeichnet man auf die Röhre zwei Kreise in der angegebenen symmetrischen Lage und bezeichnet sie mit A und M, erinnernd an „Arbeitsfeld“ und „Meßfeld“. Allerdings kann man dann die üblichen Blendenkästen nicht anwenden. Die Fixierung in halber Fokaldistanz geschieht mit Hilfe eines biegsamen Bleiarmes, an welchem die Prü fzelle befestigt wird.

Die Einheit, in welcher nach dieser Methode gemessen wird, ist das Kalom, d. h.

diejenige Röntgenlichtmenge, welche in halber Fokaldistanz die erste deutliche Trübung hervorruft. Zur Feststellung dieser „ersten deutlichen Trübung“ wird die Bestrahlung alle drei Minuten unterbrochen, das Prüfglas umgekehrt und gegen einen hellen Hintergrund gehalten.

Auch die Einheit „Kalom“ steht in einfacher Beziehung zu den andern Einheiten. 1 K entspricht ungefähr 3x und die Erythemdosis wird mit 3 K erreicht.

Es können aber auch höhere Dosen als 1 K abgelesen werden, wenn man eine Trübungsskala benutzt.

Diese Skala besteht aus mehreren übereinandergelegten Zelluloidstreifen. Dasselbe könnte man auch mit einem getrühten Glaskeil erreichen, und es soll ein solcher in Vorbereitung sein.

Schwarz selbst empfiehlt, lieber jeweilen nach Ablesungen von 1 K die Flüssigkeit wegzugießen, frisch einzufüllen, und wieder bis zu 1 K zu bestrahlen.

Die Kalomelmethode soll von dem Einfluß störender Faktoren, wie Temperatur, Beleuchtung, Farbenempfindung des Beobachters, unabhängig sein. Einen kleinen Nachteil könnte man darin erblicken, daß man nicht mit dem Zentralstrahl der Röhre arbeitet, womit eine Verschwendung von Röntgenenergie verbunden ist; denn das Röhrenglas ist zu beiden Seiten der Symmetrieebene etwas dicker als in der Mitte. Verlegt man aber die beiden Felder nicht allzuweit weg von der Symmetrieebene, so ist die Dickendifferenz des Glases unbedeutend. Nach den Messungen Kienböcks nimmt bis zu einer Distanz von 50° von der Symmetrieebene der Röhre die Intensität der Strahlung nur um 15% ab.

Die Testflüssigkeit, von Schwarz „Kalmelogen“ genannt, wird fertig geliefert, kann aber auch nach folgender Vorschrift von jedermann hergestellt werden.

Das Kalmelogen ist eine Mischung zu gleichen Teilen aus zwei Lösungen:

Lösung A.

Ammon. oxal. puriss. pro anal. (Merk)	8,0.
Aq. dest. puriss.	210,0.

Lösung B.

Hg. bichlorati corr. puriss. pro anal. (Merk)	5,0.
Aq. dest. puriss.	105,0.

Beide Lösungen sind gesättigt. Man stellt sie daher am besten unter Erwärmung her.

Wichtig ist, daß reinstes destilliertes Wasser verwendet werde, weil sonst sehr leicht beim Zusammengießen der beiden Lösungen Niederschläge entstehen, welche eine Trübung verursachen würden.

Jede Lösung für sich ist unempfindlich gegen Licht- und Röntgenstrahlen. Die Mischung zu gleichen Teilen, das Kalmelogen, ist empfindlich sowohl gegen die kurzwelligigen Lichtstrahlen, als gegen Röntgenstrahlen. Die einmal hergestellte Mischung ist daher in einer für Tageslicht und Röntgenstrahlen undurchlässigen Schachtel aufzubewahren. Mit der Zeit kristallisiert ein Bodensatz aus, den man nicht aufschütteln darf, weil sonst eine Trübung entstehen würde. Die Prü fzellen müssen sorgfältig gereinigt und getrocknet sein, weil schon geringe Mengen gewöhnlichen Brunnenwassers trübende Niederschläge erzeugen.

Die Kalomelmethode nach Schwarz ist sicherlich weniger umständlich als die Quantimetrie nach Kienböck. Außerdem gestattet sie, jederzeit den Stand der Dosierung zu übersehen. Dafür ist sie — gleich wie die Sabouraudsche Methode — mit dem Nachteil behaftet, daß das Reagens, infolge seiner Unterempfindlichkeit, in halber Fokaldistanz angebracht werden muß. Man wird also die Fokaldistanz stets größer wählen müssen, als der Röhrendurchmesser. Das bedeutet für viele Fälle eine große Verschwendung von Röntgenenergie. Bei jeder andern Methode kann man die Haut an diejenige Stelle bringen, welche bei der Kalomelmethode der Prü fzelle und bei der Sabouraudschen Methode der Pastille zukommt. Das bedeutet aber eine Vergrößerung der Röntgenwirkung auf das Vierfache, so daß bei der Dosierung nach Schwarz oder nach Sabouraud 75% der Röntgenenergie nutzlos vergeudet werden.

\*) Die Fluoreszenzermüdung nach Gaiffe (1906).

Auf Seite 118ff. haben wir die geistreiche Methode von Gaiffe beschrieben, welche die Größe der Flächenenergie auf Grund der Fluoreszenzermüdung des Ba-Pt-Cy mißt. Wenn gegen diese Methode der Einwand erhoben wurde, daß sie die Wirkung des Härtegrades nicht berücksichtige, so wäre dies insofern noch kein Grund gegen ihre Verwendung als Dosierungsmittel, als bis heute alle radiochemischen Methoden an dem gleichen Fehler leiden. Schwerwiegender ist schon der Übelstand, daß die verschiedenen Ba-Pt-Cy-Präparate allzu ungleich reagieren. Ob dies oder ob die Unbequemlichkeit einer ständigen optischen Kontrolle der Grund war, daß die Methode nicht Fuß gefaßt hat, ist mir unbekannt.

### 3. Kombinationen.

Unter Kombination verstehe ich nicht eine gleichzeitige Anwendung verschiedener Dosierungsmethoden, wie dies Kienböck vorschlägt, sondern die Verwendung eines einzigen Verfahrens, welches sich aber auf verschiedene Meßmethoden gründet, und zwar bestehen die Verfahren stets in der Durchführung einer elektrodynamischen Methode auf Grund einer einmaligen radiodynamischen oder biologischen Messung.

Die verschiedenen radiodynamischen Methoden, welche wir in den vorausgehenden Kapiteln beschrieben haben, bieten uns alle den einen großen Vorteil, daß ihre Angaben, wenn auch nicht vom Härtegrad, so doch sicher von der Art des verwendeten Röntgeninstrumentariums unabhängig sind. Weder die Konstruktion des elektrischen Transformators (Induktor, Hochspannungsgleichrichter, mechanischer oder elektrolytischer Unterbrecher usw.) noch die Form der Sekundärstromkurve oder der Sekundärspannungskurve ist von irgendwelchem Einfluß auf die Angaben der Reagenzkörper. Halten wir uns an einen vorgeschriebenen Härtegrad, so scheint es heute nach dem allgemeinen Urteil, daß wir die Angaben der Sabouraudpastille, der Bordierplättchen, der Kienböckstreifen und der Schwarzschen Prüfpzellen als zuverlässig betrachten dürfen. Diese Methoden geben uns also innerhalb bestimmter Grenzen des Härtegrades ein zuverlässiges absolutes Maß für die biologische Wirkung der Röntgenstrahlen.

Die elektrodynamischen Methoden sind dessen zurzeit nicht fähig. Hat man aber einen einzigen absoluten Wert ein für allemal festgestellt, so genügt für die Zukunft eine relative Messung. Relative Messungen sind aber mit den elektrodynamischen Methoden nicht nur recht genau, sondern überdies weit bequemer ausführbar. Man hat also bloß für sein Instrumentarium und für jede Röhre (letzteres kann mit der Zeit auch der Fabrikant besorgen lernen) ein für allemal festzustellen, unter welchen Betriebsverhältnissen die „Erythemdosis“ oder das „Kalom“ usw. erreicht wird, um dann fernerhin jede weitere Dosierung entweder unter gleichen (wenn man gerade eine solche Dosis geben will) oder unter entsprechend veränderten Betriebsverhältnissen zu verabfolgen.

Dabei handelt es sich stets in erster Linie um Messung von Sekundärstromstärke, Fokaldistanz und Bestrahlungszeit. Von Rechts wegen sollte allerdings auch die Sekundärspannung mit in Rechnung gezogen werden. Da aber alle Dosierungsmethoden einstweilen noch auf einen bestimmten Härtegrad beschränkt sind, so muß ja doch der Härtegrad auf einer bestimmten Höhe konstant gehalten werden, und damit ist auch die Sekundärspannung gegeben. Die Sekundärstromstärke,  $i$ , die Fokaldistanz,  $r$ , und die Bestrahlungszeit,  $T$ , dürfen aber in ziemlich weiten Grenzen schwanken, solange nur die Betriebsgröße

$$B = \frac{i \cdot T}{r^2} \quad (79)$$

einen unveränderten Wert behält. Deshalb ist auch diese Größe auf Seite 98ff. eingehend besprochen und als deren Einheit

$$1 \text{ Walter} = \frac{1 \text{ Milliampère} \cdot 1 \text{ Sekunde}}{1 \text{ Quadratzentimeter}}$$

eingeführt worden.

Hat man also z. B. eine Röhre, welche mit 4 Walter 10 x gibt, so verabfolgt man mit derselben 5 x mit 2 Walter, 3 x mit 1,2 Walter usw. Wie man an Hand einer Tabelle, einer Hyperbelschar oder mit Hilfe eines Schiebelineales die für eine gegebene Walterzahl nötige Bestrahlungszeit findet, ist auf Seite 51 ff. ausführlich dargetan worden. Die meisten Praktiker dosieren ja überhaupt nur nach der Zeit, die Minderzahl verwendet jedesmal wieder einen Reagenzkörper. Es hat aber bisher eine prägnante Bezeichnung für diejenigen Daten gefehlt, welche man nötig wissen muß, um jederzeit eine gewollte Dosis zu verabfolgen. Dies ist der Grund, warum ich der deutschen Röntgengesellschaft den Antrag auf offizielle Einführung der Waltereinheit gestellt habe.

Etwas Ähnliches ist bereits durch Kienböck (Radiotherapie, S. 60) versucht worden, als er seine Größe E eingeführt hat. Nur leidet seine Darstellung an der Unklarheit, daß er mit E das eine Mal (z. B. in den Minutentabellen) die veränderliche „Oberflächenenergie“ (in Wirklichkeit ist es eine Intensitätsgröße) und das andere Mal die Einheit bezeichnet, in welcher diese Größe gemessen wird. Ich habe deshalb streng auseinandergehalten:

1. die veränderliche Bestrahlungsgröße, B, welche durch Gleichung (79) definiert ist, und
2. die Einheit „1 Walter“, in welcher die Bestrahlungsgröße, B, gemessen wird.

Wer einmal den — für manche Mediziner vielleicht etwas ungewohnten — Gebrauch der Hyperbelschar oder des Schiebelineales sich angeeignet hat, wird erstaunt sein, wie rasch und sicher er damit elektrodynamisch dosieren kann. Es werden dann auch die Röhrenfabrikanten sich dazu verstehen, jeder Röhre ein Dokument mitzugeben, welches aussagt, mit wie viel Walter bestimmte Wirkungen erzielt werden, und damit dem Käufer die Mühe ersparen, die Röhre selbst zu eichen. Immerhin wird in der ersten Zeit darüber zu wachen sein, ob diese Eichung, für den einen Apparat ausgeführt, auch für einen andern Apparat gilt. Sollte dies nicht der Fall sein, so müßte entweder der Fabrikant die Art des Apparates des Bestellers kennen oder der Besteller müßte die einmalige Eichungsarbeit selbst ausführen.

Einer Kombination muß an dieser Stelle noch gedacht werden: der Bestimmung der Dosis mit dem Klingelfußschen Sklerometer, bzw. dem elektrostatischen Voltmeter nach Bergonié. So hat Klingelfuß vorgeschlagen, das Produkt aus Sklerometergrad, Milliampèrezahl und Betriebszeit als Maß für die Dosis festzulegen. Nach unsern frühern Erörterungen über diesen Gegenstand muß aber dieses Produkt noch dividiert werden durch die Halbwertschicht und durch die Potenz

$$\frac{g}{2^a},$$

welche die Korrektur für die Absorption der Röntgenstrahlen im Glas der Röhre darstellt. Die Unterlassung dieser Korrektur kann ohne merklichen Einfluß auf das Resultat sein, je nach der Dicke des Glases spielt sie aber doch eine nicht zu unterschätzende Rolle. Erinnern wir uns, daß nach frühern Ergebnissen (s. S. 46) die Halbwertschicht im Glas etwa den elften Teil derjenigen im Wasser beträgt, so hat der Korrekturfaktor den Wert

$$K = a \cdot 2^{\frac{11 \cdot g}{a}}. \quad (80)$$

Nach dieser Gleichung sind einzelne Werte des Korrekturfaktors K berechnet worden, welche in der folgenden Tabelle niedergelegt sind:

Glasdicke	g = 0,2 mm	0,7 mm	1,1 mm
Halbwertschicht			
a = 0,5 cm	6,8	14,5	26,7
0,8 cm	9,7	15,5	22,7
1,0 cm	11,7	17,2	23,1

Man ersieht hieraus, daß der Korrekturfaktor für dickes Röhrenglas nahezu eine Konstante ist, indem sein Minimum von 22,7 gegenüber dem ersten Werte von 26,7 eine Ab-

weichung von 17% zeigt. Beim dünnsten Röhrenglas dagegen wächst der Korrekturfaktor mit zunehmender Härte beinahe auf seinen doppelten Wert.

Die Dosierung bei verschiedenen Härtegraden unter Kontrolle durch die Sekundärspannungsmesser ist also nur bei dickem Röhrenglas zulässig, wobei Abweichungen von 17% zu erwarten sind. Außerdem muß aber erst noch ergründet werden, ob die Abweichungen zwischen den beiden Instrumenten von Klingelfuß und von Bergonié dem einen oder andern derselben, oder am Ende beider zur Last fallen (vgl. S. 30 und 78).

Aus alledem geht aber hervor, daß zwischen den einzelnen bestimmteren Größen und der Dosis kein gerade einfacher Zusammenhang besteht, sobald man den Einfluß verschiedener Härtegrade in Rechnung ziehen will. Dies würde zwar an und für sich noch nicht ausschließen, daß nicht ein Schiebelineal konstruiert werden könnte, welches allen diesen Faktoren Rechnung trägt. Aber bevor der Zusammenhang zwischen Sekundärspannung und Härtegrad bzw. Halbwertschicht und außerdem auch zwischen der physikalischen Dosis und der biologischen Dosis mit genügender Genauigkeit zahlenmäßig festgelegt ist, würde jede derartige Konstruktion in der Luft schweben.

Deshalb ist es bei dem heutigen Stande unseres Wissens das Gegebene, daß wir uns einstweilen an den Begriff der Volldosis nach Sabouraud oder 10 x nach Kienböck oder 5 H nach Holzknacht halten, und dabei nie vergessen, daß die mit den Methoden dieser Autoren gemessenen Dosen für harte Strahlen zu klein und für weiche zu groß ausfallen. In welcher Weise dann die jeweilige Dosis bestimmt wird, ob durch regelmäßige Verwendung der Reagenzkörper oder durch die in diesem Abschnitte besprochene Kombinationsverfahren, ist mehr oder weniger Geschmacksache.

Die wichtigste Aufgabe für die nächste Zeit wird aber die Ermittlung der quantitativen Verhältnisse zwischen der Reagenzkörperdosis und der biologischen Dosis bei verschiedenen Härtegraden sein, d. h. die Feststellung, wie viel Reagenzkörpervolldosen man bei einem bestimmten hohen Härtegrade, bzw. welchen Bruchteil einer Reagenzkörpervolldosis man bei einem bestimmten niedrigen Härtegrade verabfolgen muß, um eine biologische Volldosis zu erreichen.

#### 4. Dosierung gehärteter Strahlen.

Es wird als ganz besonderer Vorteil der radiodynamischen Methoden gerühmt, daß sie allein auf die „filtrierten“ Strahlen anwendbar seien. In der Tat, wenn wir zwischen die Röhre und die Haut absorbierende Schicht bringen, so ändert sich im Sekundärstromkreis gar nichts, während doch die Dosis ganz sicher bedeutend verändert wird. Denn die absorbierende Substanz wird 1. die Intensität der Strahlung schwächen und 2. deren Härtegrad erhöhen. Dosierte man elektrodynamisch, so kann diese Veränderung nur auf dem Wege der Rechnung in das Ergebnis der Messung eingeführt werden.

Anders bei den radiodynamischen Methoden. Hier braucht man einfach den Reagenzkörper zwischen die absorbierende Substanz, das Härtemittel (alias „Filter“) und die Haut zu schalten; dann misst man tatsächlich die gehärtete („filtrierte“) Strahlung. Nur darf dabei das eine nicht vergessen werden: wenn der Zweck der Härtung in angemessenem Grade erreicht wird, so ist der Härtegrad so groß geworden, daß der Gültigkeitsbereich der radiochemischen Methoden sicherlich überschritten ist. Einzig die radioelektrischen Messungen bleiben hiervon unberührt. Aber auch da darf man nicht übersehen, daß die radioelektrischen Methoden zwar die durch das Härtemittel veränderte Intensität richtig messen, nicht aber den veränderten Härtegrad, welcher auf die Größe der Dosis ebenfalls von Einfluß ist.

#### 5. Vergleich und Bewertung der verschiedenen Dosierungsmethoden.

Der Vergleich verschiedener Meßmethoden hat unter verschiedenen Gesichtspunkten stattzufinden.

1. Eine Messung soll so genau wie möglich sein. Man hat aber dabei auf die unvermeidlichen Fehlerquellen Rücksicht zu nehmen, insofern als es z. B. keinen Zweck hat, eine Fehlerquelle zu beseitigen, welche Fehler im Betrage von einigen Prozent verursacht, wenn gleichzeitig Fehler von 20% aus einer andern Quelle unvermeidbar sind.

2. Eine für den Praktiker bestimmte Messmethode soll aber auch so einfach wie möglich sein. Erfüllt sie diese Bedingung nicht so ist ihr Schicksal von vornherein besiegelt: sie wird von den Praktikern einfach unter den Tisch gewischt. So hat Holzknicht vollkommen recht, wenn er sagt, daß die einfache, aber weniger exakte Methode der exaktern, aber komplizierteren unter allen Umständen vorzuziehen sei. Auch dürfte in diesem Zusammenhange die überraschende Mitteilung von Beclère auf dem IV. internationalen Kongreß für Elektrologie und Röntgenologie in Amsterdam (1908) angeführt werden, welcher sich auf einer Studienreise überzeugt hatte, daß die Röntgenologen, deren Messverfahren in der damaligen Literatur am meisten gepriesen wurde, dieselben gar nicht anwenden.

Was nun die Genauigkeit der Dosierung anbetrifft, so hört man sehr oft bei der Verteidigung einer Methode das Argument: „Ich habe noch keine Klage über Versagen der Methode vernommen.“ Überlegt man aber, worin eine solche Klage bestehen könnte, so handelt es sich wohl ausschließlich darum, daß bei der Methode keine Verbrennungen, bzw. Überdosierungen vorgekommen sind. Das ist ja schließlich auch das Wichtigste, nachdem allzuviel unliebsame Fälle von Röntgenschädigungen die Gerichte beschäftigt haben.

Viel weniger leicht aber werden Klagen wegen Unterdosierung einlaufen. Hat man unterdosiert, so ist man meist geneigt, der therapeutischen Unwirksamkeit der Röntgenstrahlen das Versagen in dem betreffenden Falle zuzuschreiben. Auch will man ja in sehr vielen Fällen, z. B. in der ganzen Tiefentherapie, nie ein Erythem erzeugen. Man ist also zufrieden, wenn man nicht überdosiert. Ob man vielleicht unterdosiert hat, wird gewöhnlich gar nicht untersucht.

Auf Grund dieser Überlegung erklärt sich auch die Tatsache, warum die Unzuverlässigkeit der üblichen radiochemischen Dosierungsmethoden für verschiedene Härtegrade so lange verborgen bleiben konnte. Mit der Entwicklung der Tiefentherapie ist man mehr und mehr zu der Verwendung harter Strahlen übergegangen. Dabei hat man aber, wie mehrfach erörtert, notwendig unterdosieren müssen. Diese Unterdosierung ist aber aus den genannten Gründen nicht bemerkt worden.

Man kann also die Bewertung der Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit der verschiedenen Dosierungsmethoden nicht lediglich danach ermessen, ob man vor Verbrennung geschützt ist oder nicht, sondern es ist jeweilen auch festzustellen, ob die „Erythemdosis“, gemessen mit der betreffenden Methode, auch wirklich an die Grenze des Erythems führt.

Leider ist ja nun auch die „Erythemdosis“ nicht ein streng bestimmter Begriff, indem die Empfindlichkeit der Haut an verschiedenen Körperstellen und in verschiedenen Altern erheblich schwankt. Dagegen wird heute wohl von den meisten Autoren eine ausgesprochene individuelle Überempfindlichkeit für das eigentliche Röntgenerythem (nicht für die Frühreaktion) in Abrede gestellt, wenn auch die Empfindlichkeit einzelner Individuen sicherlich um  $\pm 10$ , wenn nicht 20% schwanken kann. Das heißt es ist wohl anzunehmen, daß es Individuen gibt, welche schon mit 8 x oder erst mit 12 x an die Grenze des Erythems gebracht werden.

Wichtig ist ferner die Forderung von Jadassohn, Überempfindlichkeit und Idiosynkrasie auseinanderzuhalten. Während der Überempfindliche auf etwas kleinere Dosen reagiert, als der Normale, antwortet der mit Idiosynkrasie behaftete mit heftiger Reaktion schon auf Dosen, welche an dem Normalen noch spurlos vorübergehen. Eine Idiosynkrasie in diesem Sinne gibt es gegenüber den Röntgenstrahlen nicht.

Auf Grund dieser Überlegungen dürfen wir an unsere Dosierungsmethoden wohl keine höhern Anforderungen stellen, als daß sie die Dosis mit einer Genauigkeit von 10% angeben.

Auch die Genauigkeit der pharmakologischen Dosierung bewegt sich ja in ähnlichen Grenzen. Wir injizieren z. B. das Morphinum in Dosen von 1 oder 2 ausnahmsweise einmal 1,5 Zentigrammen, aber wohl kaum in Mengen von 1,2 oder 0,8 Zentigrammen. Höchstens Reklamepräparate, wie das Migränin, leisten sich den Scherz, Dosen von 1,1 Gramm vorzuschreiben.

Was nun die Genauigkeit der Röntgendosierungsmethoden betrifft, so sind wir leider in der schlimmen Lage, daß wir die Zuverlässigkeit ihrer Ergebnisse nicht so leicht ständig kontrollieren können, weil wir doch nicht jedesmal ein Stück lebender Menschenhaut zur Verfügung haben, und bekanntlich die Tierhaut anders reagiert.

Aus diesem Grunde sind Meyer und Ritter auf den Gedanken verfallen, eine „Mausdosis“ zu definieren, in dem Sinne, daß diejenige von der Maus absorbierte Röntgenenergie festgestellt wird, welche den Tod des Tieres herbeiführt. Bewährt sich dieses Maß als zuverlässig, so wird es ein wertvolles Hilfsmittel zum weiteren Studium mancher noch ungelöster Fragen, z. B. auch des Einflusses des Härtegrades auf die Dosis, werden. Immerhin müßte dann vorerst sichergestellt sein, welches der Angriffspunkt der tödlichen Wirkung ist, weil doch auch bei der Maus, trotz ihrer Kleinheit, in verschiedenen Tiefen des Körpers verschiedene Mengen von Röntgenenergie zur Absorption gelangen.

Endlich wird sich gerade hier feststellen lassen, ob die Genauigkeit solcher Reaktionen größer als  $\pm 20\%$  ist.

Gestattet man aber eine Fehlergrenze von  $\pm 20\%$ , so braucht man sich bei der Forderung eines bestimmten Härtegrades nicht in allzuenge Grenzen einzuzwängen.

Alle unsere Reagenzkörper sind auf Strahlen mittlerer Durchdringungsfähigkeit eingestellt, also etwa auf 7 mm Halbwertschicht (ausgenommen bei Bordier, welcher ausdrücklich harte Strahlen vorschreibt). Arbeitet man anstatt dessen mit einer harten Strahlung, von 1 cm Halbwertschicht (Wh. 10), so hat die Halbwertschicht um 30% zugenommen. Dementsprechend hat — bei gleicher Flächenenergie — die Dosis im Verhältnis von 7:10 abgenommen, was einem Fehler von — 30% entspricht. Gleichzeitig hat aber auch die Halbwertschicht im Ba-Pt-Cy (wenn man nach Sabouraud dosiert) abgenommen, so daß bei der härteren Strahlung die Flächenenergie tatsächlich größer ist, als bei der weicheren. Die genauen Zahlen sind, meines Wissens, noch nicht bekannt. Aber wenn die Zunahme der Halbwertschicht im Wasser 30% beträgt, so dürfte sie schätzungsweise im Ba-Pt-Cy etwa 10% betragen. Dadurch würde der Fehler von 30% auf 20% reduziert und wir wären damit wieder auf denjenigen Grenzwert der Genauigkeit gekommen, den wir anderorts als eben noch zulässig bezeichnet haben.

Man sieht nun aber auch, daß bei noch höhern Härtegraden die Reagenzkörpermethoden auch für bescheidene Ansprüche an Genauigkeit versagen müssen. Denn wenn wir eine 2-cm-Strahlung anwenden, so hat sich gegenüber der 7-mm-Strahlung die Halbwertschicht verdreifacht und wir müßten bei gleicher Flächenenergie nur den dritten Teil der Dosis erhalten. Mit Berücksichtigung der Zunahme der Halbwertschicht im Ba-Pt-Cy dürfte mit einer Reduktion der Dosis vielleicht doch noch auf die Hälfte anstatt auf ein Drittel zu rechnen sein, eine Zahl, welche mit den spärlichen quantitativen Angaben der bisherigen Literatur über diese Frage recht gut stimmt.

Aus dem gleichen Grunde wird man auch nach unten die Grenze bis zu einem gewissen Grade erweitern dürfen. Geht man von 7 mm um 30% herunter, so kommt man auf 5 mm. Mit Berücksichtigung der Eigenschaften des Ba-Pt-Cy wird man also eine Zunahme der Dosis von 20% für die 5-mm-Strahlung gegenüber der 7-mm-Strahlung annehmen dürfen, falls die Sabouraudpastille die gleiche Dosis anzeigt. Bei noch weicheren Strahlen würde die Grenze von 20% überschritten.

Ähnliche Verhältnisse müssen bei allen andern Metallsalzdosimetern bestehen.

Aus diesen Erörterungen ziehen wir folgenden Schluß:

Läßt man eine äußerste Fehlergrenze von  $\pm 20\%$  zu, so sind die Angaben der dünn-schichtigen Metallsalzdosimeter zuverlässig innerhalb der Grenzen von

5 mm und 1 cm Halbwertschicht, wobei die biologischen Wirkungen an der untern Grenze etwas höher, an der obern etwas niedriger ausfallen, als man nach den Angaben dieser Instrumente erwarten sollte.

Zu den dünn-schichtigen Metallsalzreagenzkörpern gehören sowohl das Quantimeterpapier, als das Bordiersche Plättchen und mit größter Wahrscheinlichkeit auch die Sabouraudpastille, weil es ja doch nur die oberflächlichste Schicht derselben ist, welche unserm Auge den Farbeindruck übermittelt. Inwiefern die Schwarzsche Prü fzelle in dieser Hinsicht eine Sonderstellung einnimmt, ist auf Seite 66 bereits erörtert worden.

Diese Betrachtungen beziehen sich nun allerdings nur auf den Einfluß des Härtegrades. Was die Zuverlässigkeit der einzelnen Dosierungsmethoden für ein und denselben Härtegrad betrifft, so sind wir einstweilen noch völlig auf den guten Glauben der Fabrik gegenüber angewiesen. Einzig in den von Kienböck angegebenen Kontrollen für das Quantimeterpapier ist uns ein Mittel an die Hand gegeben, etwaige Fehler einer Lieferung aufzudecken.

Selbstverständlich sind wir auch bei den elektrodynamischen Methoden darauf angewiesen, dem Fabrikanten die Lieferung eines zuverlässigen Milliampèremeters oder Sekundärvoltmeters zuzutrauen, es kann sich gegenüber den radiodynamischen Methoden nur darum handeln zu entscheiden, welche Fabrikation mehr Verlaß auf gleichmäßige Lieferung verdient.

Es muß an dieser Stelle nochmals auf die Frage nach der Brauchbarkeit des elektromagnetischen Milliampèremeters für Zwecke der Dosierung zurückgekommen werden. Wir haben bereits festgestellt, daß bei hoher Belastung die Angaben dieses Instrumentes für die Hochspannungstransformatoren im Vergleich mit den Induktorapparaten relativ zu hoch ausfallen, wobei von Wertheim-Salomonson regelmäßig Abweichungen von 25% fand, während bei schwacher Belastung gleiche Werte für beide Instrumente erhalten wurden. Immerhin kommt auch Wertheim-Salomonson zu dem Schluß, daß bei Verwendung ein und desselben Apparates mit nur wenig veränderlicher Unterbrechungszahl die für die Dosierung nötigen Angaben ohne weiteres gebraucht werden dürfen, solange die Belastung innerhalb der Grenzen von 1—3 Milliampère oder 2—5 Milliampère bleibt.

Nun hat man aber bekanntlich sowieso Veranlassung, bei therapeutischen Dispositionen mit der Belastung diese Grenzen nicht zu überschreiten. Darüber geht man nicht, weil sonst die Röhren zu schnell ermüden, weich werden und damit eine ganz andere Wirkung geben würden, als beabsichtigt war. Darunter geht man schon deshalb nicht, um zur Erreichung der gewollten Wirkung die Sitzung nicht ungebührlich verlängern oder allzuoft wiederholen zu müssen, abgesehen davon, daß manche Röhren bei geringer Belastung hart werden.

Diejenigen hohen Belastungen, welche bei den Wertheim-Salomonsonschen Versuchen für verschiedene Apparate eine Differenz von 25% ergeben haben, kommen also praktisch nicht in Betracht. Wie groß die Unterschiede innerhalb der praktisch wichtigen Belastungsgrenzen sind, darüber kenne ich keine veröffentlichten Zahlen. Nach dem übereinstimmenden Urteile der Praktiker, welche elektrodynamisch dosieren, dürften sie kaum beträchtliche Dimensionen annehmen.

Was nun den zweiten Punkt, die Einfachheit der Methode, anbelangt, so darf man sich von vornherein nicht verhehlen, daß es sich hier vielfach um Gewöhnung und Geschmacksache handelt.

Bei der heutigen, mehr auf das Experimentelle gerichteten Ausbildung unserer Mediziner werden im allgemeinen die Reagenzkörpermethoden von vornherein mehr Sympathie finden, während die elektrodynamischen Methoden, infolge ihres „theoretischen Anstriches“, d. h. der Notwendigkeit einer mathematisch-physikalischen Begründung, nicht mit ungetrübter Freude aufgenommen werden.

Wollen wir objektiv bleiben, so tun wir wohl am besten, einfach die sämtlichen Schwierigkeiten und Umständlichkeiten aufzuzählen, zu welchen uns die einen und andern Methoden zwingen. Wo deren am wenigsten sind, da ist offenbar die Einfachheit am größten.

1. Die Berücksichtigung des Härtegrades muß bei allen, bis heute bekannten Methoden verlangt werden. Dies festzustellen ist deshalb von größter Wichtigkeit, weil man neuerdings, namentlich in der Tiefentherapie, solch hohe Härtegrade anwendet, für welche die Angaben sämtlicher radiochemischer Methoden nicht mehr zuverlässig sind. Die radioelektrischen und die elektrodynamischen Methoden, einschließlich der Köhlerschen kalorimetrischen Messung, können erst recht dieser Komplikation nicht entraten, weil sie alle entweder die Intensität oder die Flächenenergie messen, während zur Berechnung der Dosis noch die Division durch die Halbwertschicht nötig ist.

Unabhängig vom Härtegrade könnten nur die Angaben eines solchen dünn-schichtigen Reagenzkörpers sein, dessen Halbwertschichten für verschiedene Strahlungen zu denjenigen des Wassers in annähernd konstantem Verhältnis stünden. Tatsächlich ist der Nachweis für ein solches Verhalten für keinen der heute gebräuchlichen Reagenzkörper geleistet worden.

Da wir außerdem zurzeit den Einfluß des Härtegrades auf den Sensibilitätskoeffizienten (d. h. auf das Verhältnis zwischen der physikalischen und der biologischen Dosis) noch nicht kennen, so muß die Forderung, daß während einer Sitzung der Härtegrad in gewissen Grenzen bleibe, allen Methoden auferlegt werden.

2. Die Bestimmung der Fokaldistanz kann umgangen werden bei allen denjenigen radiodynamischen Methoden, deren Reagenzkörper in gleicher Entfernung wie die bestrahlte Haut angebracht werden können, also beim Quantimeter, bei der Methode Bordiers und bei den radioelektrischen Methoden. Unumgänglich ist sie dagegen bei den andern radiodynamischen (Sabouraud, Schwarz) und bei allen elektrodynamischen Methoden.

Ausgeführt wird diese Bestimmung durch Messung der Entfernung zwischen Röhrenwand und Haut und Addition des Röhrenradius. Zu der erstgenannten Distanzmessung eignet sich das von Schwarz angegebene Teleskopmaß recht gut. Aber jedes Bandmaß tut den Dienst auch.

3. Das Aufsuchen der halben Fokaldistanz und Anbringen der Reagens an dieser Stelle ist bei denjenigen radiodynamischen Methoden notwendig, welche mit unterempfindlichen Reagenzkörpern arbeiten, so bei den Methoden von Sabouraud und von Schwarz.

4. Die Vermeidung der Beschattung der bestrahlten Stelle durch den Reagenzkörper ist überall da zu verlangen, wo der Reagenzkörper so dick oder so stark absorbierend ist, daß er einen wesentlichen Bruchteil der auffallenden Strahlung absorbiert. Es ist dies der Fall bei der Sabouraudpastille, der Schwarzschen Prüfwelle und den Rezeptoren der radioelektrischen Apparate.

5. Die Notwendigkeit einer Rechnung ist nur bei den elektrodynamischen Methoden vorhanden, vornehmlich deshalb, weil stets auf die Fokaldistanz und die Sekundärstromstärke, meist auch auf die Bestrahlungszeit Rücksicht genommen werden muß. Bei den radiodynamischen Methoden ist dies nicht nötig, weil das Reagens stets entweder in der gleichen oder in der halben Fokaldistanz wie die Haut angebracht wird, so daß der Einfluß verschieden großer Fokaldistanzen aus dem Problem automatisch eliminiert wird.

Dies ist der hauptsächliche Grund, warum die elektrodynamischen Dosierungsmethoden bei den wenig mathematikfreundlichen Medizinern nicht leicht Eingang finden.

Das ist aber auch der Grund, warum ich die Benutzung eines Schiebelineales empfohlen habe, dessen Gebrauch in einigen Minuten erlernt ist, und fürderhin alle Rechnung überflüssig macht, indem durch einen Griff und einen Blick das gesuchte Rechnungsergebnis unmittelbar erhalten wird.

6. Die Anwendung einer chemischen Prozedur ist nur bei den photographischen Methoden notwendig. Bei der Kienböckschen Quantimetrie verlangt sie eine Dunkelkammer, beim Straußschen Lichtpapierverfahren genügt ein schwach verdunkelter Raum.

7. Schwierigkeit beim Abschätzen von Farbentönen oder Trübungsgraden kommen nur bei den radiochemischen Methoden in Frage, wobei das größere Zutrauen zu der einen oder andern Methode, zum Teil Geschmackssache, zum Teil Übungssache ist.

Auf Grund dieser Zusammenstellung, welche durch die folgende Tabelle noch etwas anschaulicher gemacht ist, kann sich jeder Leser selbst ein Urteil über die Einfachheit der verschiedenen Methoden bilden, soweit dies ohne praktische Prüfung überhaupt möglich ist.

	Fokal- distanz	$\frac{1}{8}$ Fokal- distanz	Beschat- tung	Rech- nung	Entwick- lung	Farben- töne
Elektrodynamische Methoden	+	0	0	+	0	0
Köhler . . . . .	+	0	0	+	0	0
Radioelektrische Methode .	0	0	+	0	0	0
Kienböck und Strauß .	0	0	0	0	+	+
Sabouraud und Schwarz	+	+	+	0	0	+
Bordier . . . . .	0	0	0	0	0	+

#### G. Tiefentherapie.

Mit allen den im Vorigen beschriebenen Dosierungsmethoden können wir zunächst bloß die Dosis bestimmen, welche in der dünnsten Oberflächenschicht verabfolgt wird. Einzig Kienböck hat den Versuch gemacht, zu bestimmen, wieviel von der verabfolgten Röntgenstrahlung in bestimmter Tiefe noch wirksam ist. Weil 1 mm Aluminium ungefähr gleich viel Röntgenenergie absorbiert, wie 1 cm Weichteile, so bestrahlt Kienböck sein Quantimeterpapier unter ebensoviele Millimetern Aluminium, wie im gegebenen Falle die Weichteildecke Zentimeter mißt, und schließt aus der Schwärzung des Streifens auf die unter solcher Weichteildecke verabfolgte Dosis.

Wir haben bereits festgestellt (S. 82 ff), daß auf diese Weise die Tiefendosis stets zu hoch eingeschätzt wird, weil das Aluminium die Strahlung härtet, und bei harter Strahlung die Metallsalzreagenzkörper zu hohe Dosen anzeigen. Die andere, von Kienböck vorgeschlagene Methode, daß man Quantimeterstreifen nicht unter Aluminium, sondern unter der entsprechenden Weichteildecke selbst, z. B. in Körperhöhlen, bestrahlt, muß die Dosis erst recht überschätzen, weil die in den Geweben entstehenden Sekundärstrahlen auf die photographische Schicht recht beträchtliche, auf die Gewebe selbst dagegen (infolge ihrer besonders schwachen Absorption) nur eine ganz untergeordnete Wirkung haben.

Es gibt nun aber ein anderes Mittel, welches wenigstens eine gewisse Abschätzung der Tiefendosis gestattet. Von einer genauen Messung kann schon deshalb nicht die Rede sein, weil man ja die Tiefe des bestrahlten Gewebes nie genau kennt, und weil überdies die Ausdehnung solcher Organe oder Tumoren oft so groß ist, daß verschiedene Teile derselben in ganz verschiedenen Tiefen unter Haut liegen, also verschieden große Dosen erhalten. Es handelt sich aber bei den folgenden Erörterungen nicht sowohl um Aufstellung einer genauen Dosierung für die Tiefe, als vielmehr überhaupt erst um eine Klärung der Ideen, die mir im Hinblick auf die gegenwärtige Journalliteratur als dringende Notwendigkeit erscheint.

Ich vermeide es absichtlich, Beispiele aus der Literatur aufzuführen, welche den Beweis für diese meine Behauptung erbringen könnten, denn es soll ja nicht der Zweck dieses Buches sein, eine Polemik zu entfachen. Überdies habe ich mich durch persönliche Besprechung und Korrespondenz mit zahlreichen kompetenten Beurteilern überzeugt, daß meine diesbezügliche Ansicht in den maßgebenden Kreisen geteilt wird.

#### 1. „Filtration“ und Sekundärstrahlen.

Vor allem muß es ausgesprochen werden, daß die sogenannte „Filtrationstheorie“ vieles zur Entstehung solcher Begriffsverwirrungen beigetragen hat.

Die Auffassung, daß die Röntgenstrahlen nicht homogen seien, sondern ein Gemisch aus Komponenten verschiedenen Härtegrades darstellen, und daß die Härtung einer Strahlung darauf beruhe, daß sie beim Durchgang durch ein absorbierendes Medium infolge stärkerer Absorption der weicheren Komponenten einer Art Filterwirkung unterliege, hat die Vorstellung erweckt, daß, wie bei einem Filter, gewisse Bestandteile zurückgehalten und andere durchgelassen

werden. Es besteht aber zwischen diesen beiden Vorgängen — der chemischen Filtrierung und der „Strahlenfiltrierung“ — ein grundlegend wichtiger Unterschied, auf welchen hier ausdrücklich aufmerksam gemacht werden muß.

Mit einem Filter werden im chemischen Laboratorium die Niederschläge von den Lösungen getrennt. Die Niederschläge bleiben auf dem Filter und die Lösungen gehen hindurch. Wäscht man noch mit dem Lösungsmittel nach, so bleibt nichts von der gelösten Substanz auf dem Filter, alles findet sich im Filtrat. Ebenso muß ein zuverlässiges Filter den Niederschlag vollständig zurückhalten. Gleich verhält es sich auch mit der Dialyse, welche sich in diesem Punkte in gar nichts von der Filtration unterscheidet: auf der einen Seite der Membran verbleiben die nicht dialysierbaren Stoffe, während alle dialysierbaren auf die andere Seite der Membran überwandern.

Ganz anders steht es mit der „Filtrierung“ von Strahlen. Eine absorbierende Schicht mag von einer sehr harten Strahlung 80% durchlassen und von einer sehr weichen nur 20%. Aber an eine absolute Scheidung in zwei getrennte Teile, absorbierte weiche und durchgehende harte Strahlen, ist nicht zu denken, namentlich nicht mit Rücksicht auf die tatsächliche Zusammensetzung der Röntgenstrahlungsmische.

Es hat sich ferner die Vorstellung gebildet, daß in dem supponierten Röntgenstrahlungsgemisch solche weiche Strahlen enthalten seien, welche die Haut schädigen, und die man daher „abfiltrieren“ müsse, und solche harte Strahlen, welche ohne Hautschädigung eine Tiefenwirkung entfalten, die man daher durch das Filter durchlassen müsse. Daher der Eifer, bestimmte Materialien zu finden, welche diesen erhofften Filterdienst versehen möchten.

Da fand nun der Eine, es eigne sich hierzu am besten das Stanniol, der Andere rühmte diesen Vorzug dem Silber nach, wieder ein Anderer meinte, besser als die Haut selbst könne kein Material diesen Dienst versehen, deshalb müsse man Leder nehmen.

Alle diese Versuche werden erst beweiskräftig, wenn man die Wirkung der einzelnen Faktoren sorgfältig trennt. Will man eine „filtrierte“ Strahlung in ihrer Wirkung mit einer „unfiltrierten“ Strahlung vergleichen, so muß man vorerst den Beweis leisten, daß sie beide von gleichem Härtegrade waren und die gleiche Flächenenergie erzeugten, was bekanntlich keine so einfache Sache ist, weil die vom „Filter“ ausgehenden Sekundärstrahlen andere Eigenschaften haben, als die primären Röntgenstrahlen. Nicht nur gehen sie nicht mehr von einem einzigen Punkte aus, sondern sie haben auch noch die Eigenschaft, gerade in demjenigen Material, welches sie erzeugte, besonders leicht absorbiert zu werden.

Denken wir z. B. an die vom Aluminium ausgehenden Sekundärstrahlen, welche das Aluminium so leicht durchdringen, daß die zweimetalligen Härteskalen ganz bedeutende Erhöhungen des Härtegrades angeben, während der absolute Härtemesser, welcher die Durchdringungsfähigkeit für Wasser mißt, zwar auch eine Härtung, aber längst nicht im gleichen Maße feststellt.

Erinnern wir uns endlich daran, daß nach den magnetischen Ablenkungsversuchen die Verschiedenheit der Kathodenstrahlengeschwindigkeiten einer Röhre, und daher auch die Unterschiede der Härtegrade eines Röntgenstrahlungsgemisches so unbedeutend sind, daß nur mit einem besondern Kunstgriff deren Existenz nachgewiesen werden kann, so dürfte es sich doch empfehlen, unsere diesbezüglichen landläufigen Vorstellungen von der Wirkung der „Filter“ auf die „Strahlungsmische“ einer gründlichen Revision zu unterziehen.

Hierzu kommt noch die Tatsache, daß die Verfolgung der Vorgänge, welche sich bei der Absorption eines Strahlungsgemisches vollziehen, so wenig übersichtlich und daher schwierig zu behandeln ist, daß an eine exakte Durchführung dieses Problems in dieser Schrift nicht zu denken ist. Immerhin lassen sich einige wichtige Dinge auch ohne dies klären, und es soll dies im folgenden nach Möglichkeit geschehen.

Beruhet die Härtung der Röntgenstrahlen beim Durchgang durch ein absorbierendes Medium nicht — oder doch nur in untergeordnetem Maße — auf „Filterwirkung“, so ist sie mit Wahrscheinlichkeit auf die Beimischung von harten Sekundärstrahlen zurückzuführen. Genauer auf diesen Punkt einzugehen muß ich mir versagen, bevor einige hierauf bezügliche





Experimente zu unzweideutigen Ergebnissen geführt haben. Tatsache ist immerhin, daß jede Strahlung, welche in tierisches oder menschliches Gewebe eindringt, harte Sekundärstrahlen erzeugt und durch deren Beimischung selbst härter wird. In jedem Falle wird dadurch die ursprünglich homogene (oder annähernd homogene) Strahlung inhomogen, d. h. es entsteht ein Strahlungsgemisch aus einer weicheren und einer härteren Komponente. Damit scheint die gefürchtete Komplikation der Berücksichtigung eines Strahlungsgemisches unvermeidlich.

Trotzdem können wir ohne Bedenken auf die Berechnung der Vorgänge in einem Strahlungsgemisch verzichten; denn wir wissen aus den bisherigen Erörterungen, daß die im Körper entstehenden Sekundärstrahlen im Körper selbst nur sehr wenig absorbiert werden, und schließen daraus, daß ihre biologische Wirkung gegenüber derjenigen der Sekundärstrahlen so gering sein muß, daß wir sie ohne Bedenken vernachlässigen können.

## 2. Tiefenwirkung der Primärstrahlen.

### a) Theorie.

Alle folgenden Entwicklungen beziehen sich also nur auf die Primärstrahlung, während die Wirkung der Sekundärstrahlung grundsätzlich nicht berücksichtigt wird. Es lassen sich also gegen die folgenden Argumentationen niemals irgendwelche Beweise mit Reagenzkörpern aufführen, weil alle bisher bekannten Reagenzkörper auf die Sekundärstrahlen der Körpergewebe kräftig reagieren, gegen welche die Körpergewebe selbst immun sind.

Lassen wir aber die Sekundärstrahlen aus dem Spiele, so erlangen wir den großen Vorteil, daß wir auf die allein wirksame Primärstrahlung das Exponentialgesetz anwenden dürfen. Das will sagen: Nimmt die Schichtdicke in arithmetischer Progression zu, so fällt die Intensität und damit auch die Flächenenergie und die Dosis in geometrischer Progression. Seinen mathematischen Ausdruck findet dieses Gesetz durch die Gleichungen (2) und (4).

Um nun aber meinen Lesern jede Rechnung, ja selbst jede mathematische Überlegung zu ersparen, habe ich den Zusammenhang zwischen dem Härtegrade, der Weichteildicke und der Absorption in einer graphischen Darstellung veranschaulicht, welche auch dem in mathematischen Dingen Unerfahrensten auf die einfachste Art jede gewünschte Auskunft erteilt. Es ist auch dies wieder möglich mit Hilfe des Begriffes der Halbwertschicht: Die Intensität einer homogenen Strahlung wird durch Absorption in ihrer Halbwertschicht auf 50% reduziert, in der doppelten Halbwertschicht auf 25%, in der dreifachen Halbwertschicht auf 12,5% usw.

Um aber auch denjenigen Lesern, welche noch an einer der konventionellen Skalen hängen, den Gebrauch der Graphik zu ermöglichen, habe ich neben der Halbwertschicht auch alle anderen Skalen mit berücksichtigt.

Zum Gebrauch der Graphik sei folgendes vorausgeschickt: Am rechten Rande der Tafel V sind die Härtegrade und auf einer horizontalen Skala am untern Rande die Weichteildicken angegeben. Außerdem ziehen über die ganze Fläche Strahlen nach einem Punkte C am linken Rande der Figur.

Will man nun wissen, wie stark eine gegebene Strahlung durch eine Weichteilschicht von gegebener Dicke durch Absorption geschwächt wird, so sucht man auf der horizontalen Skala am untern Rande der Figur die gegebene Weichteildicke und steigt von hier aus senkrecht nach oben bis auf dasjenige Niveau, welches dem gegebenen Härtegrade entspricht. Von dem so gefundenen Punkte geht man in der schrägen, nach dem Punkte C weisenden Richtung bis auf die Nulllinie 0—0. Die über diesem Punkte stehende Ordinate der Absorptionskurve gibt dann stets das Absorptionsverhältnis an.

Hat man z. B. eine 2-cm-Strahlung und eine Weichteilschicht von 3 cm, so sucht man auf der horizontalen Skala „3 cm“ und steigt senkrecht auf bis zu dem Niveau „2 cm“. Von dem so gefundenen Punkte geht man schräg in der Richtung gegen C und trifft die Nulllinie in einem Punkte, über welchem die Ordinate der Absorptionskurve die Höhe von 35% zeigt. Dies sagt uns, daß eine 2-cm-Strahlung durch Absorption in einer Weichteilschicht von 3 cm Dicke auf 35% ihres Wertes reduziert wird.



Wünschen wir z. B. zu wissen, wie sich eine 2,5-cm-Strahlung in 1 cm Tiefe verhält, so suchen wir in der horizontalen Reihe die Halbwertschicht 2,5 cm und in der vertikalen Reihe die Weichteildicke 1 cm und finden in der Tabelle die Zahl 21. Das will sagen: Dringt eine 2,5-cm-Strahlung bis in die Tiefe von 1 cm vor, so kommen an dieser Stelle in einem Millimeter Weichteilschicht  $21\text{‰}$  der ursprünglichen Flächenenergie zur Absorption. Oder: Von einer 1-cm-Strahlung werden zwischen dem 25. und dem 26. Millimeter Weichteildicke  $2\text{‰}$  absorbiert.

Verfolgt man die Zahlen der obigen Tabelle in senkrechter Richtung, so sieht man zunächst, daß sie mit steigender Schichtdicke abnehmen. Die Abnahme ist um so rascher, je weicher die Strahlung ist. Dies ist ja nicht neu, aber meines Wissens war diese Tatsache stets mehr nur qualitativ festgestellt, nicht aber in solch ausführlicher und übersichtlicher Form quantitativ geordnet worden.

Noch interessanter ist die Verfolgung der horizontalen Reihe. Hier findet man von der vierten Reihe an, daß von links nach rechts die Zahlen zuerst steigen, ein Maximum erreichen, und dann wieder fallen. Bei den Reihen unter 4 mm und über 4 cm Weichteildicke liegt das Maximum außerhalb der Tabelle. Wir werden später noch ausführlicher auf diese Erscheinung eingehen, nachdem wir gezeigt haben, warum und an welcher Stelle, d. h. für welchen Härtegrad, dieses Maximum auftreten muß.

Wichtig sind aber nicht nur die absoluten Werte des in verschiedenen Tiefen absorbierten Anteiles an Röntgenenergie, sondern das Verhältnis zwischen dem an der Oberfläche und dem in der Tiefe absorbierten Anteil.

Wenn die Tiefendosis stets kleiner ist, als die Oberflächendosis, so hat dies einen doppelten Grund:

1. Die Oberfläche liegt stets näher an der Strahlenquelle, als die Tiefe. Es ist daher die Flächenenergie in der Tiefe entsprechend geringer. Die beiden Flächenenergien verhalten sich umgekehrt wie die Quadrate der Fokaldistanzen.

2. Zwischen der Oberfläche und der Tiefe liegt eine absorbierende Schicht. Nur die in dieser Schicht nicht absorbierte Röntgenenergiemenge erreicht die Tiefe.

Wir müssen aber im folgenden die Einflüsse dieser beiden Faktoren auseinanderhalten und unterscheiden daher zwischen folgenden zwei Größen:

1. Dispersionsquotient, d. h. das Verhältnis zwischen den beiden Flächenenergien an der Oberfläche und in der Tiefe, bedingt durch die verschiedenen Fokaldistanzen.

2. Absorptionsquotient, d. h. das Verhältnis der ursprünglichen zu der durch Absorption geschwächten Strahlung.

Da beide Faktoren gleichzeitig wirken, müssen wir also den

3. Dosenquotienten definieren als das Produkt aus den beiden vorgenannten Quotienten.

Um die Tabelle für den Absorptionsquotienten zu konstruieren, brauchen wir nur jede Zahl der „Tabelle für Tiefendosen“ auf Seite 100 als Nenner und die oberste Zahl ihrer senkrechten Reihe als Zähler zu setzen und die Division auszuführen.

Wir erhalten auf diese Weise:

## Tabelle für den Absorptionsquotienten

gibt das Verhältnis der ungeschwächten zu der durch eine Weichteilschicht von bestimmter Dicke geschwächten Strahlung.

Halbwertschicht =	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	1 cm	1,2 cm	1,4 cm	1,6 cm	1,8 cm	2 cm	2,5 cm	3 cm
Weichteildicke = 2 mm	2	1,5	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1	1
4 mm	4	2	1,6	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1
6 mm	8	3	2	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1
8 mm	16	3,5	2,5	2	1,7	1,5	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2
1 cm	33	5,5	3	2,3	2	1,7	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3
1,5 cm	175	11	5,5	3,5	3	2,5	2	2	1,8	1,7	1,5	1,4
2 cm			10	6	4	3	3	2,5	2	2	2	1,5
3 cm			27	13	8	6	4,5	3,5	3	3	2	2
4 cm				29	17	9,5	7	6	4,5	4	3	2,5
5 cm					35	19	12	8,5	6	6	4	3
6 cm						29	20	14	10	9	5,5	4
7 cm								22	15	11	7	5
8 cm										17	9	6
9 cm											14	8
10 cm												12

Haben wir also z. B. eine 1,6-cm-Strahlung und soll dieselbe durch eine Weichteilschicht von 5 cm hindurch wirken, so ist (abgesehen von der Dispersion, welche natürlich von der Stellung der Röhre abhängt) das Verhältnis zwischen Oberflächendosis und Tiefendosis gleich  $8^{1/2}$ . Das will sagen von einer 1,6-cm-Strahlung wird an der Oberfläche  $8^{1/2}$  mal so viel absorbiert als in 5 cm Tiefe; dementsprechend ist die Tiefenwirkung  $8^{1/2}$  mal geringer, wozu dann noch die Dispersionsreduktion kommt.

Auf den unter 3. definierten Dosenquotienten werden wir in einem besondern Kapitel zurückkommen.

## b) Nutzeffekt. Halbwertregel.

Wenn wir die Verhältnisse bei der Tiefenwirkung näher ins Auge fassen, so drängt sich uns folgende Überlegung auf: Die Leistungsfähigkeit unserer Apparate und der rationelle Betrieb, d. h. eine solche Disposition, bei welcher die Röhren möglichst lang ihren Härtegrad unverändert behalten, auferlegt uns eine Beschränkung, nämlich die Belastung (Sekundärstromstärke) nicht über ein gewisses Maß hinaus zu steigern. Es ist daher eine technische Unmöglichkeit, in einer beschränkten Zeit mehr als eine entsprechend beschränkte Menge Röntgenenergie herzustellen. Aus diesem Grunde ist es auch nicht möglich, selbst durch tunlichste Verkleinerung der Fokaldistanz und Verlängerung der therapeutischen Sitzung mehr als eine beschränkte Menge von Flächenenergie zu erzeugen.

Wir sehen uns daher im Interesse eines rationellen Betriebes veranlaßt, diese beschränkte Menge der verfügbaren Flächenenergie möglichst auszunutzen. Mit andern Worten: Wir müssen die Aufgabe lösen, in einer gegebenen Tiefe unter der Haut einen möglichst großen Anteil der eindringenden Röntgenenergie zur Absorption zu bringen. Oder noch einfacher ausgedrückt: Wir müssen den Nutzeffekt der Tiefenabsorption auf ein Maximum bringen.

Ich mache aber gleich hier darauf aufmerksam, daß diese Aufgabe streng auseinandergehalten werden muß von einer andern: bei größtmöglicher Tiefenwirkung die Haut möglichst zu schonen. Beide Aufgaben wollen das Gleiche: größtmögliche Tiefenwirkung. Aber die Schwierigkeiten, mit welchen sie zu kämpfen haben, sind verschieden: einmal die beschränkte Menge verfügbarer Flächenenergie, und das andere Mal die Empfindlichkeit der Haut. Hier

an dieser Stelle untersuchen wir also nur die Schwierigkeit, welche in der beschränkten Menge der herstellbaren Flächenenergie liegt.

Haben wir die höchstmögliche Belastung der Röhre und die tunlichste Verkleinerung der Fokaldistanz, also innerhalb einer bestimmten Betriebszeit die größtmögliche Flächenenergie erreicht, so bleibt uns nur noch die Aufsuchung desjenigen Härtegrades, bei welchem in der gegebenen Tiefe der größtmögliche Prozentsatz der eindringenden Röntgenenergie zur Absorption gelangt.

Betrachten wir dieses Problem zunächst bloß qualitativ, so wissen wir zum Voraus, daß die Strahlung nicht allzuweich sein darf, weil sonst ein allzugeringer Prozentsatz von ihr in die Tiefe an den Ort der gewollten Wirkung vordringen würde. Auf der andern Seite aber müssen wir uns sagen, daß die Strahlung auch nicht allzu hart sein darf. Denn was nützt es uns, wenn zwar ein großer Prozentsatz der eindringenden Strahlung an den Ort der gewollten Wirkung gelangt, dort aber wegen des hohen Härtegrades nur so wenig absorbiert wird, daß keine wahrnehmbare biologische Wirkung eintreten kann?

Es muß also für jede gegebene Tiefe unter der Haut einen bestimmten Härtegrad geben, welcher die günstigste Stelle zwischen diesen beiden Extremen einnimmt.

Nun haben wir schon beim ersten Blick auf die „Tabelle für Tiefendosen“ auf Seite 100 erkannt, daß für die mittlern Schichtdicken die Zahlen der horizontalen Reihen von links nach rechts zuerst wachsen, ein Maximum erreichen, und dann wieder abnehmen. Auch läßt sich unschwer ersehen, daß dieses Maximum stets ungefähr da liegt, wo die Halbwertschicht gleich ist der Dicke der überdeckenden Weichteilschicht. Es soll im folgenden kurz der Beweis erbracht werden, warum dies tatsächlich so sein muß.

Wir denken uns für einen Augenblick über der Stelle der gewollten Wirkung die überdeckenden Weichteile weg und bezeichnen mit  $F(o)$  die unter diesen hypothetischen Umständen verabfolgte Flächenenergie. Könnten wir diese Verhältnisse wirklich herstellen, so wäre die Dosis nach Gleichung (54)

$$D = \frac{7 \cdot F(o)}{10 \cdot a} \quad (81)$$

wobei, wie stets,  $a$  die Halbwertschicht der Strahlung bedeutet.

Bringen wir nun die weggedachten Weichteile wieder an Ort und Stelle, und bezeichnen wir deren Schichtdicke mit  $w$ , so wissen wir aus Gleichung (4), daß dadurch die Flächenenergie im Verhältnis von

$$1 : 2^{\frac{w}{a}}$$

geschwächt wird. Die Dosis unter einer Weichteilschicht von der Dicke  $w$  hat daher den Wert:

$$D = \frac{7 \cdot F(o)}{10 \cdot a \cdot 2^{\frac{w}{a}}}, \quad (82)$$

wobei  $F(o)$  diejenige Flächenenergie bedeutet, welche man erhielte, wenn keine absorbierende Schicht vorhanden wäre.

An dieser Gleichung können wir zunächst unsere Feststellung der Unbrauchbarkeit extremer Härtegrade kontrollieren: sowohl für  $a = 0$  als für  $a = \infty$  wird  $D = 0$ . Dazwischen muß also ein Maximum von  $D$  liegen. Wir schreiben nun Gleichung (82) in folgender Form:

$$\log(D) = \log\left(\frac{7 \cdot F(o)}{10}\right) - \log(a) - \frac{w}{a} \cdot \log(2), \quad (83)$$

Diese Gleichung differenzieren wir nach  $a$  und erhalten:

$$\frac{1}{D} \cdot \frac{dD}{da} = -\frac{1}{a} + \frac{w}{a^2} \cdot \log(2). \quad (84)$$

Soll die Größe  $D$  ein Maximum werden, so muß die linke Seite der Gleichung (84) gleich Null werden. Dann ist aber auch die rechte Seite gleich Null, woraus sich ergibt:

$$a = w \cdot \log(2) = \frac{7 \cdot w}{10}. \quad (85)$$

Streng genommen ist also bei gegebener Flächenenergie die Tiefenwirkung dann am größten, wenn man den Härtegrad so aussucht, daß die Halbwertschicht gleich wird sieben Zehnteln der überdeckenden Weichteilschicht.

Ein Blick auf die „Tabelle für Tiefendosen“, Seite 100 bestätigt die Richtigkeit dieses Ergebnisses. Aus der gleichen Tabelle ersehen wir aber auch, daß sich die Tiefendosis nur um einen unbedeutenden Betrag ändert, wenn man anstatt  $\frac{7 \cdot w}{10}$  einfach den Wert  $w$  setzt, in dem man sagt:

Bei gegebener Flächenenergie ist die Tiefenwirkung dann am größten, wenn die Halbwertschicht der Strahlung gleich ist der Dicke der Überschicht<sup>1)</sup>.

Nehmen wir z. B. eine Überschicht von 2 cm an, so erreichen wir das Maximum der Tiefenwirkung mit einer Halbwertschicht von  $\frac{7 \cdot 2}{10}$  oder 1,4 cm, d. h. mit einer 1,4-cm-Strahlung. Nach unserer vereinfachten Regel müßten wir dagegen die 2-cm-Strahlung bevorzugen. Da sagt uns nun die genannte Tabelle, daß in der Tiefe von 2 cm unter der Oberfläche von der 2-cm-Strahlung 17‰ pro Millimeter absorbiert werden, und von der 1,4-cm-Strahlung 18‰; dies ist ein Unterschied, der sicherlich noch längst innerhalb der Genauigkeitsgrenzen für die Tiefendosierung liegt.

Daß der Unterschied nicht nur in dem gewählten Beispiel, sondern allgemein vernachlässigt werden darf, läßt sich leicht zeigen. Für  $a = w$  hat die Dosis den Wert

$$D_1 = \frac{7 \cdot F(o)}{10 \cdot w \cdot 2} \quad (86)$$

und für  $a = \frac{7 \cdot w}{10}$

$$D_2 = \frac{F(o)}{w \cdot 2^7}, \quad (87)$$

woraus

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{10}{7 \cdot 2^7} = 1,06. \quad (88)$$

Das heißt: Ersetzt man die theoretische beste Halbwertschicht  $\frac{7 \cdot w}{10}$  durch den einfachern Wert  $w$ , so begeht man auf die Tiefendosis einen Fehler von 6%. Dies stimmt ausgezeichnet mit den oben gefundenen Zahlen 17 und 18, denn 6% von 17 ist gleich 1 und soviel beträgt die Differenz zwischen 17 und 18.

Man wird aber gerne zugeben, daß eine Verkleinerung der Tiefendosis um 6% ihres Wertes noch lange keinen empfindlichen Verlust an Röntgenenergie bedeutet. Wir bleiben also bei der Regel:

Will man in der Tiefentherapie die zu Gebote stehende Röntgenenergie nach Möglichkeit ausnutzen, so arbeitet man am besten mit derjenigen Strahlung, deren Halbwertschicht gerade so groß ist, wie die Dicke der Überschicht.

Um neben den Zahlen auch die geometrischen Figuren sprechen zu lassen, habe ich dieses Problem noch ins Geometrische übersetzt. Um ferner nicht mit Zahlen argumentieren zu müssen, habe ich ganz allgemein solche Fälle ausgewählt, in welchen die Halbwertschicht,  $a$ , einen bestimmten Bruchteil oder ein bestimmtes Vielfaches der Überschicht,  $w$ , beträgt.

<sup>1)</sup> Die sehr gute und kurze Bezeichnung „Überschicht“ für „Dicke der überlagernden Weichteile“ wurde von Reicher und Lenz geprägt.

Anstatt die Absorption in 1 mm Schichtdicke zu berechnen, habe ich solche Schichten gewählt, die gerade ein Zehntel der überdeckenden Weichteilschicht betragen. Da gibt uns nun zunächst die folgende Tabelle in der ersten Kolonne diejenigen Anteile an Röntgenenergie, welche im obersten Zehntel absorbiert werden. Die zweite Kolonne zeigt diejenigen Röntgenenergiemengen an, welche in einer gleich dicken Schicht, aber unter der gegebenen Weichteildecke von der Dicke  $w$  absorbiert werden. Die dritte Kolonne endlich gibt den Quotienten aus der ersten und der zweiten Zahl, d. h. das Verhältnis zwischen der Oberflächendosis und der Tiefendosis (ohne Rücksicht auf die Dispersion) also den Absorptionsquotienten.

Halbwertschicht	Absorbierte Strahlenmenge		Absorptionsquotient
	oberste Schicht	tiefe Schicht	
$a = \frac{1}{4} \cdot w$	242 <sup>0/100</sup>	15 <sup>0/100</sup>	16,1
$a = \frac{1}{3} \cdot w$	187 <sup>0/100</sup>	23 <sup>0/100</sup>	8,1
$a = \frac{1}{2} \cdot w$	129 <sup>0/100</sup>	32 <sup>0/100</sup>	4,0
$a = \frac{7}{10} \cdot w$	94 <sup>0/100</sup>	35 <sup>0/100</sup>	2,7
$a = w$	67 <sup>0/100</sup>	33 <sup>0/100</sup>	2,0
$a = \frac{10}{7} \cdot w$	47 <sup>0/100</sup>	29 <sup>0/100</sup>	1,6
$a = 2 \cdot w$	34 <sup>0/100</sup>	26 <sup>1/4 0/100</sup>	1,36
$a = 3 \cdot w$	23 <sup>0/100</sup>	18 <sup>0/100</sup>	1,28
$a = 4 \cdot w$	17 <sup>0/100</sup>	15 <sup>1/4 0/100</sup>	1,1

Die Übersetzung dieser Tabelle ins Geometrische gibt Fig. 17, in welche die Absorptionskurven für verschiedene Härtegrade eingetragen sind. Für alle die verschiedenen Strahlungen ist die gleiche Intensität des einfallenden Röntgenlichtes,  $I_0$ , angenommen. Hat die Strahlung ihre Halbwertschicht,  $a$ , durchsetzt, so ist ihre Intensität von  $I = I_0$  auf  $I = \frac{I_0}{2}$  gesunken.

Die weichste der eingezeichneten Strahlungen hat die Halbwertschicht  $a = \frac{w}{4}$ , d. h. sie wird schon im vierten Teil der Überschicht,  $w$ , auf die Hälfte ihrer Intensität reduziert. Sie ergibt selbstverständlich die größte Hautwirkung. Man überzeugt sich hiervon an dem vertikalem Strich links oben, an welchem sich ablesen läßt, wieviel von der einfallenden Strahlung nach dem Durchgang durch den ersten Zehntel der Weichteilschicht absorbiert worden ist.

Bei der Ankunft an der innern Grenze der Weichteilschicht ist die Intensität dieser Strahlung bereits so gering geworden, daß ihre weitere Abnahme, dargestellt durch die Höhe des kleinen schwarzen Dreieckes, nur noch einen geringen Betrag an Röntgenenergie darstellt. Auch hier ist wieder die Grundlinie des Dreieckes gleich dem zehnten Teil der Weichteilschicht gewählt worden; das will sagen, daß die Höhe des Dreieckes diejenige Strahlenmenge darstellt, welche in  $\frac{w}{10}$  Schichtdicke zur Absorption gelangt.

Dieses  $\frac{w}{10}$  ist eine ganz beliebig gewählte Zahl, die nur zur Fixierung der Ideen dienen soll. Man hätte ebensogut  $\frac{w}{20}$  oder  $\frac{w}{30}$  usw. wählen können, und wäre dabei zu den nämlichen Resultaten gekommen, nämlich:

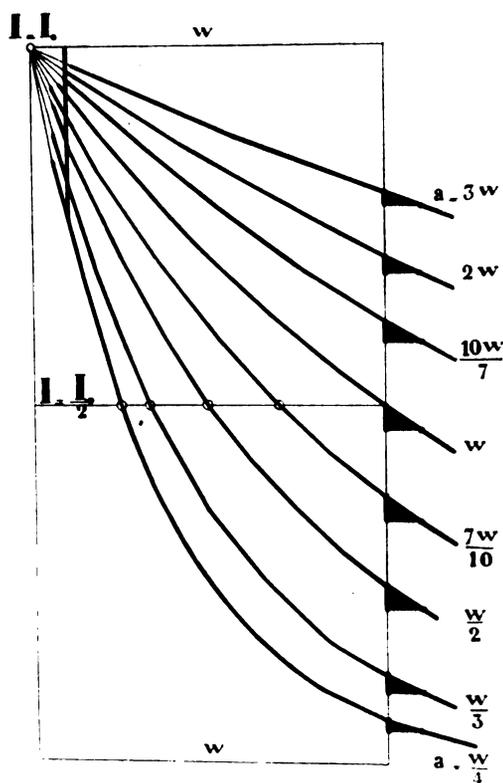


Fig. 17.

Man sieht, daß für die folgenden Härtegrade  $a = \frac{w}{3}$ ,  $a = \frac{w}{2}$  die Höhen der Dreiecke stetig größer werden und bei  $a = \frac{7 \cdot w}{10}$  den größten Wert erreichen.

Bei den nächstfolgenden Härtegraden:  $a = w$ ,  $a = \frac{10 \cdot w}{7}$ ,  $a = 2 \cdot w$  und  $a = 3 \cdot w$  werden die Höhen der Dreiecke, welche die in der Tiefe absorbierte Strahlenmenge darstellen, wieder stetig kleiner.

Entsprechend den Angaben der Tabelle ist auch die Höhe des Dreieckes für  $a = \frac{7 \cdot w}{10}$  am größten. Führt man jetzt noch die Vereinfachung ein,  $a = w$  an Stelle von  $a = \frac{7 \cdot w}{10}$  zu setzen, so lehrt wieder Fig. 17, daß die Höhen der entsprechenden Dreiecke sich kaum unterscheiden lassen. Das Dreieck an der Kurve  $a = w$  ist kaum merklich niedriger als das Dreieck an der Kurve  $a = \frac{7 \cdot w}{10}$ , in vollkommener Bestätigung der rechnerischen Ergebnisse.

### c) Hautschonung. Dosenquotient.

Nun müssen wir weiter an die Beantwortung der zweiten Frage: Welche Vorkehrungen sind zu treffen, damit bei möglicher Tiefenwirkung die Haut nach Möglichkeit geschont werde?

Zur exakten Beantwortung dieser Frage müssen wir die in Betracht kommenden Größen in ihrem gegenseitigen Verhältnis noch etwas genauer ins Auge fassen. Wenn bei möglichst großer Tiefenwirkung eine möglichst geringe Oberflächenwirkung erzielt werden soll, so muß der Dosenquotient, d. h. das Verhältnis der Oberflächendosis zur Tiefendosis möglichst klein sein.

Bezeichnet man die Oberflächendosis mit  $D_0$  und die Tiefendosis mit  $D$ , so ist der Dosenquotient

$$Q = \frac{D_0}{D}. \quad (89)$$

Ist ferner die Flächenenergie an der Oberfläche gleich  $F_0$  und in der Tiefe gleich  $F$ , so ist

$$D_0 = \frac{7 \cdot F_0}{10 \cdot a} \quad \text{und} \quad D = \frac{7 \cdot F}{10 \cdot a}, \quad (90)$$

wonach

$$Q = \frac{F_0}{F}. \quad (91)$$

Nun verhalten sich die Flächenenergien:

1. infolge der Dispersion, wie bei allen punktförmigen Strahlenquellen, umgekehrt wie die Quadrate der Fokaldistanzen; dieselben betragen in diesem Falle  $r$  und  $r + w$ , wenn man mit  $r$  die Fokushautdistanz bezeichnet;

2. infolge der Absorption wie  $2^{\frac{w}{a}} : 1$ .

Wir haben daher zu schreiben:

$$Q = \frac{(r+w)^2}{r^2} \cdot 2^{\frac{w}{a}} = \left(1 + \frac{w}{r}\right)^2 \cdot 2^{\frac{w}{a}}. \quad (92)$$

Dieser Quotient muß nun möglichst klein sein. Nicht beeinflussen läßt sich die Größe  $w$ , d. h. die Dicke der überlagernden Weichteilschicht. Sie ist in jedem einzelnen Falle gegeben. Man sieht aber, daß  $Q$  auf alle Fälle seinen kleinsten Wert,  $Q = 1$ , annimmt, wenn  $w = 0$  ist. Für alle andern Werte von  $w$  ist  $Q$  stets größer als 1. Daraus folgern wir, daß unter allen Umständen der Dosenquotient stets größer als 1 ist, das heißt:

Es ist unter allen Umständen — für jede Fokaldistanz und für jeden Härtegrad — die Oberflächendosis größer als die Tiefendosis an irgendeiner Stelle.

Frei wählen können wir die Fokaldistanz,  $r$ . Da sagt uns Gleichung (92), daß die Größe  $Q$  um so kleiner ist, je größer  $r$  ist, das heißt:

Je größer man die Fokaldistanz wählt, desto kleiner wird der Dosenquotient, um so besser wird, bei gleicher Tiefendosis die Haut geschont.

Daraus ergibt sich mit logischer Notwendigkeit, daß die Hautschonung dann am besten ist, wenn man die Fokaldistanz unendlich groß wählt. Wir kommen aber dadurch in Kollision mit einer Bedingung, welche wir aus der Notwendigkeit eines rationellen Betriebes abgeleitet haben, d. h. eines möglichst großen Nutzeffektes der Tiefenwirkung. Dort haben wir gefunden, daß die Tiefenwirkung um so größer ist, je kleiner man die Fokaldistanz wählt, und wir haben dort bereits gesagt, daß wir dieselbe tunlichst klein wählen müßten.

Eine absolut günstigste Mittelstellung läßt sich nun nicht allgemein herausrechnen, weil es eben darauf ankommt, welchen Nachteil man höher einschätzt, die Vergeudung von Röntgenenergie oder die Gefährdung der Haut.

Um uns dennoch über die quantitativen Verhältnisse ein anschauliches Bild zu machen, wollen wir dieselben an einem kleinen Zahlenbeispiel studieren. So gibt die folgende Tabelle in der ersten Zeile das Verhältnis der Fokaldistanz zu der Weichteildicke, die zweite Zeile das Verhältnis der bei dieser Fokaldistanz erhältlichen Flächenenergie zu derjenigen, welche man erhält, wenn man die Fokaldistanz gleich der Weichteildicke wählt, und die dritte die entsprechenden Werte des Dispersionsquotienten:

$\frac{r}{w}$	=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{F}{F(r=w)}$	=	100%	44%	25%	16%	11%	8%	6%	5%	4%	3,3%
$\frac{(r+w)^2}{r^2}$	=	4	2,3	1,7	1,5	1,4	1,3	1,28	1,26	1,23	1,21

Betrachtet man hier zunächst die Extreme, so sieht man, daß man für  $r=10 \cdot w$  nur noch 3,3% derjenigen Flächenenergie in der Tiefe erhält, welche man bei  $r=w$  haben könnte. Allerdings wäre hier der Dispersionsquotient gleich 4, während er bei  $r=10 \cdot w$  den geringern Wert 1,21 hat.

Sieht man sich aber die Veränderungen näher an, welche beide Größen für die dazwischenliegenden Werte erleiden, so erkennt man, daß etwa in der Mitte, d. h. bei  $r=5 \cdot w$ , die weitgehendste Konzession liegen dürfte, die wir dem Dispersionsquotienten vernünftigerweise zugestehen können. Bei  $r=5 \cdot w$ , d. h. wenn die Fokaldistanz fünfmal größer ist, als die Überschicht, ist gegenüber  $r=w$  die Flächenenergie auf 11% ihres Wertes gesunken. Würden wir auf  $r=10 \cdot w$  gehen, so würde die Flächenenergie auf 3,3% sinken, d. h. wir würden noch einmal  $\frac{7}{10}$  derjenigen Flächenenergie verlieren, welche wir bei  $r=5 \cdot w$  noch haben können. Dabei hat aber der Dispersionsquotient nur von 1,4 auf 1,2 abgenommen, also nur um  $\frac{1}{6}$  seines Wertes. Der gleichen Reduktion würde auch der Dosenquotient unter-

liegen, weil in beiden Fällen der Reduktionsfaktor  $2^{\frac{w}{r}}$  den gleichen Wert hat; denn er enthält die Größe  $r$  überhaupt nicht.

Würde man also anstatt  $r=5 \cdot w$  aus Rücksicht auf den Dispersionsquotienten und den Dosenquotienten  $r=10 \cdot w$  wählen, so müßte man 70% derjenigen Flächenenergie einbüßen, welche man bei  $r=5 \cdot w$  noch haben kann, während man gleichzeitig den Dosenquotienten nur um 17% seines Wertes bei  $r=5 \cdot w$  verbessern würde. Mit andern Worten:

Wählt man aus Rücksicht auf die Hautschonung die Fokaldistanz fünfmal größer als die Überschicht, so würde jede weitere Vergrößerung der Fokaldistanz

eine Verschleuderung an Röntgenenergie verursachen, welche den Gewinn an Hautschonung um das  $\frac{70}{17} =$  vierfache übertreffen müßte.

Zu ganz analogen Ergebnissen führt uns die Berücksichtigung des Härtegrades. So gibt die folgende Tabelle in der ersten Zeile das Verhältnis zwischen der Halbwertschicht und der überlagernden Weichteilschicht, die zweite Zeile gibt die Größe der Tiefendosis in Prozenten der höchstmöglichen Dosis ( $a:w = 7:10$ ) und die dritte Zeile gibt den Absorptionsquotienten:

$a:w =$	1:4	1:3	1:2	7:10	1	10:7	2:1	3:1
$\frac{D}{D_{(\max)}}$	47%	71%	94%	100%	94%	82%	67%	50%
$2^{\frac{w}{a}}$	16	8	4	2,7	2	1,6	1,4	1,25

Hieraus ersieht man, daß bei dem nach unserm Vorschlage auf  $a = w$  eingestellten Härtegrade ein Absorptionsquotient von der Größe 2 erhalten wird, während bei dem theoretisch günstigsten Nutzeffekte (100% in Zeile 2) der Absorptionsquotient bereits auf 2,7 steigen würde. Man erkaufte also mit einer Reduktion des Tiefennutzeffektes von 6% eine Verbesserung des Absorptionsquotienten, und damit auch des Dosenquotienten, von 2,7 auf 2,0, also um 24% seines Wertes.

Folgt man also unserer Regel, wonach die Fokaldistanz fünfmal größer sein soll als die überdeckende Weichteilschicht, und die Halbwertschicht gleich der überdeckenden Weichteilschicht, so wird der Dosenquotient

$$Q = (1,2)^2 \cdot 2^{\frac{w}{a}} = 2,9, \quad (93)$$

das heißt bei dieser Normaleinstellung beträgt die Tiefendosis den dritten Teil der Oberflächendosis.

Will man den gemeinsamen Einfluß beider Faktoren, der Fokaldistanz und des Härtegrades, auf den Dosenquotienten studieren, so orientiert hierüber folgende Tabelle.

Tabelle für den Dosenquotienten.

		r:w = 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		F = 100%	44 $\frac{1}{2}$ %	25%	16%	11%	8%	6%	5%	4%	3,3%
a:w =	D										
	D <sub>(max)</sub>										
1:4	47%	64	36	27	24	23	21	20 $\frac{1}{2}$	20	19 $\frac{1}{2}$	19
1:3	71%	32	18	13 $\frac{1}{2}$	12	11 $\frac{1}{2}$	10 $\frac{1}{2}$	10	10	10	9 $\frac{1}{2}$
1:2	94%	16	9	7	6	6	5	5	5	5	5
7:10	100%	11	6	4 $\frac{1}{3}$	4	4	4	3 $\frac{1}{2}$	3 $\frac{1}{2}$	3	3
1	94%	8	4 $\frac{1}{3}$	3 $\frac{1}{2}$	3	3	2 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{1}{2}$
10:7	82%	6 $\frac{1}{2}$	3 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{1}{2}$	2	2	2	2	2	2
2:1	67%	6	3	2 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{1}{2}$	2	2	2	1 $\frac{1}{2}$	1 $\frac{1}{2}$
3:1	50%	5	3	2	2	2	1 $\frac{1}{2}$	1 $\frac{1}{2}$	1 $\frac{1}{2}$	1 $\frac{1}{2}$	1 $\frac{1}{2}$

Aus dieser Tabelle kann man für alle Dispositionen den entsprechenden Wert des Dosenquotienten entnehmen. Man muß aber gleichzeitig auch kontrollieren können, wie groß jeweils die Vergeudung an Röntgenenergie ist, mit welcher man für jede Verkleinerung des Dosenquotienten zu bezahlen hat. Zu diesem Zwecke stellen wir für die vorliegende Aufgabe die jeweilige Größe des Nutzeffektes fest.

Die Röntgenröhre erzeugt während einer bestimmten Betriebszeit in der Fokaldistanz  $r^*$  die Flächenenergie  $F^*$ . Diese Größe müssen wir als ein für allemal gegeben betrachten, da sie nur von der Leistungsfähigkeit unseres Röntgenapparates abhängig ist.

Die Stelle, an welcher wir möglichst viel Röntgenenergie zur Absorption bringen wollen, liegt in der Tiefe  $w$  unter der Haut, ihre Fokaldistanz beträgt also  $r + w$ , wenn die Fokaldistanz der Haut  $r$  beträgt. Gegenüber der Flächenenergie in der Entfernung  $r^*$  wird also die Flächenenergie in der Tiefe kleiner sein im Verhältnis von  $r^{*2} : (r + w)^2$ . Außerdem liegt zwischen der Strahlenquelle und der Stelle der gewollten Wirkung eine absorbierende Schicht von der Dicke  $w$ , in welcher die Strahlung eine Halbwertschicht von der Größe  $a$  hat.

Infolgedessen wird die Flächenenergie reduziert im Verhältnis von  $1 : 2^{\frac{w}{a}}$ , so daß die Flächenenergie  $F$  in der Tiefe  $r + w$  den Wert hat

$$F = \frac{r^{*2} \cdot F^*}{(r + w)^2 \cdot 2^{\frac{w}{a}}} \quad (94)$$

Geht man noch um die Strecke  $\frac{w}{10}$  weiter in die Tiefe, so ist  $F$  um die Größe  $DF$  kleiner geworden. Wir finden dann aus Gleichung (94) indem wir dort  $w$  ersetzen durch  $w + 1,1$ :

$$F - DF = \frac{r^{*2} \cdot F^*}{(r + w + 1,1)^2 \cdot 2^{\frac{w + 1,1}{a}}} \quad (95)^1$$

woraus dann

$$DF = \left( \frac{r^*}{r + w} \right)^2 \cdot \log(2) \cdot \frac{w \cdot F^*}{10 \cdot a \cdot 2^{\frac{w}{a}}} \quad (96)$$

Der Nutzeffekt,  $N$ , kann in unserm Falle nichts anderes sein, als das Verhältnis der in der Schicht  $\frac{w}{10}$  absorbierten Flächenenergie,  $DF$ , zu der von der Röhre gelieferten Flächenenergie,  $F^*$ , also

$$N = \frac{DF}{F^*} = \left( \frac{r^*}{r + w} \right)^2 \cdot \log(2) \cdot \frac{w}{10 \cdot a \cdot 2^{\frac{w}{a}}} \quad (97)$$

oder wenn man alle Konstanten in eine einzige zusammenfaßt:

$$N = \frac{C}{(r + w)^2 \cdot a \cdot 2^{\frac{w}{a}}} \quad (98)$$

Setzt man daneben die Gleichung (93) für den Dosenquotienten

$$Q = \left( 1 + \frac{w}{r} \right)^2 \cdot 2^{\frac{w}{a}}, \quad (99)$$

so sieht man hieraus ohne weiteres, daß alle Maßnahmen, welche den Nutzeffekt verbessern, notwendig den Dosenquotienten vergrößern, während andererseits jede Verkleinerung des Dosenquotienten eine Verschlechterung des Nutzeffektes nach sich zieht.

Vergrößert man die Fokaldistanz,  $r$ , so nimmt zwar der Dosenquotient,  $Q$ , ab; aber auch der Nutzeffekt,  $N$ , geht herunter.

Geht man zu einer härteren Strahlung über, indem man die Halbwertschicht vergrößert, so wird ebenfalls nicht nur der Dosenquotient, sondern, im Falle  $a > \frac{7}{10}$ , gleichzeitig auch der Nutzeffekt verringert.

Wir können aber aus dieser Überlegung noch einen andern Schluß ziehen: Man sieht aus Gleichung (99), daß man durch verschiedene Werte von  $a$  und  $r$  den gleichen Dosenquotienten erhalten kann. Man kann also z. B. den Dosenquotienten vergrößern durch Ver-

<sup>1)</sup> Streng genommen sollte man im Nenner  $r + w + 1,1$  an Stelle von  $r + w$  schreiben, es läßt sich aber leicht zeigen, daß dieser Fehler stets vernachlässigt werden darf.

kleinerung der Fokaldistanz und dann wieder um den gleichen Betrag verkleinern durch entsprechende Erhöhung des Härtegrades.

Das gleiche sagt uns auch die „Tabelle für den Dosenquotienten“ auf Seite 108. Wir sehen dort, daß z. B. der Dosenquotient 3 an verschiedenen Stellen gefunden wird. Nicht nur dann, wenn wir nach unserer Regel  $r = 5 \cdot w$  und  $a = w$  wählen, sondern auch wenn wir  $r = 2 \cdot w$  und  $a = 2 \cdot w$  wählen. Betrachten wir die beiden entsprechenden Nutzeffekte, so wird im ersten Fall, welcher unserer Normalregel entspricht,

$$N = \frac{C}{72} \quad (100)$$

und im zweiten

$$N = \frac{C}{36} \quad (101)$$

Darnach sollte man glauben, unsere Normalregel sei schlecht, wenn man durch Erhöhung des Härtegrades und gleichzeitige Verkleinerung der Fokaldistanz den Nutzeffekt verdoppeln könnte, ohne gleichzeitig den Dosenquotienten zu vergrößern.

Aber die Sache hat noch einen besondern Haken. Sobald die Weichteilschicht mehr als 1 cm beträgt — und das ist doch meist der Fall — so müßte, wenn  $a = 2 \cdot w$ , die Halbwertschicht größer als 2 cm werden. Nun können wir aber mit keiner Röntgenröhre Strahlen von mehr als 1,5 cm Halbwertschicht erhalten, ohne ein Durchschlagen riskieren zu müssen. Bleibt noch die Härtung durch ein absorbierendes Medium, am besten Aluminium. Dabei darf man aber nie vergessen, daß die Härtung stets mit einer neuen Verschleuderung von Röntgenenergie einhergeht, welche in unserer Rechnung selbstverständlich noch nicht berücksichtigt ist.

Wir können z. B. eine 1,5-cm-Strahlung in eine 2,5-cm-Strahlung umwandeln, indem wir sie durch 2 mm Aluminium gehen lassen. Da die Halbwertschicht im Aluminium ungefähr den zehnten Teil derjenigen im Wasser beträgt, so wird durch diese 2 mm Aluminium die Strahlung geschwächt im Verhältnis von  $1 : 2^{\frac{2}{1,5}} = 1 : 2^{\frac{1}{3}}$ .

Wollten wir also denjenigen Härtegrad herstellen, zu welchem wir durch die oben besprochene „Verbesserung“ gezwungen wären, so würde zwar der Nutzeffekt entsprechend den Gleichungen (100) und (101) im Verhältnis von 2:1 verbessert, durch die Härtung dagegen im Verhältnis von  $1 : 2^{\frac{1}{3}}$  verschlechtert, so daß am Ende nicht eine Verbesserung, sondern eine Verschlechterung des Nutzeffektes im Verhältnis von  $2 : 2^{\frac{1}{3}}$ , d. h. ein Verlust an Röntgenenergie von 20% eintreten würde.

Daraus ergibt sich, daß wir die einfache Normalregel:  $r = 5 \cdot w$  und  $a = w$  allgemein anwenden dürfen, allerdings mit einer Beschränkung, welche sich aus der Begrenztheit der technischen Möglichkeiten ergibt, wie folgt:

Müssen wir mit Rücksicht auf das Röhrenmaterial die Grenze der direkt erhältlichen Härtegrade etwa auf 1,5 cm Halbwertschicht stecken, so ist es zwar mit den bekannten Härtungsmitteln (Vorschalten von Leder, Aluminium usw.) möglich, eine weitere Erhöhung bis 2,5 oder etwa noch 3 cm Halbwertschicht zu erreichen, mehr aber leider einstweilen nicht. Man darf sich hier nicht etwa durch die zweimetallinen Härteskalen täuschen lassen, wie dies schon auf Seite 28 ff. ausgeführt wurde. Denn die Härtung durch Aluminium erhöht das Durchdringungsvermögen für Aluminium weit mehr als für die lebenden Gewebe, und nur auf letztere kommt es an. Richtige Angaben kann nur der absolute Härtemesser liefern, oder ein Instrument nach der Art desjenigen von Villard, vorausgesetzt, daß es möglich ist, das Mittelplättchen seines Elektrometers nicht aus Aluminium, sondern aus einer dem Wasser nahestehenden Substanz, herzustellen.

Müssen wir aber die Beschränkung gelten lassen, daß mit unsern heutigen technischen Hilfsmitteln Härtegrade von mehr als 2,5 cm oder höchstens 3 cm Halbwertschicht nicht her-

zustellen sind, so hat unsere Halbwertregel selbstverständlich nur innerhalb dieser Grenzen Geltung. Wir können daher ruhig sagen, daß die von verschiedenen Autoren aufgestellte Regel, bei der Tiefentherapie die härtest mögliche Strahlung zu verwenden, sich mit unserer Regel deckt, sobald ein subkutanes Gebilde von mehr als 2 cm Weichteilen bedeckt ist. Denn wenn wir entsprechend unserer Halbwertregel die Halbwertschicht so groß nehmen sollen, wie die Dicke der Überschicht, so muß sie in diesem Falle größer als 2 cm sein, also, mit andern Worten, an der Grenze der möglichen Härte liegen.

Es ergibt sich daraus, daß wir für die Mehrzahl der Aufgaben, welche uns die Tiefentherapie stellt, mit der härtesten Strahlung die beste Wirkung erzielen, sowohl mit Rücksicht auf den Nutzeffekt (Röhrenschonung), als auf den Dosenquotienten (Hautschonung).

#### d) Biologische Dosis.

Haben wir im vorigen Abschnitt von dem „Dosenquotienten“ gesprochen, den wir aus Rücksicht auf die Haut so klein wie möglich zu gestalten suchten, so war damit der Quotient der physikalischen Dosen gemeint, d. h. der Quotient derjenigen Röntgenmengen, welche in gleich dicken Schichten an der Oberfläche und in bestimmter Tiefe absorbiert werden.

Geht man aber weiter zu den biologischen Dosen über, so muß man die physikalischen Dosen noch mit dem entsprechenden Sensibilitätskoeffizienten multiplizieren. Ist die physikalische Dosis an der Oberfläche  $D_0$ , so ist die biologische Dosis daselbst

$$D_0^* = \mu_0 \cdot D_0 \quad (102)$$

und die biologische Tiefendosis ist dementsprechend

$$D^* = \mu \cdot D \quad (103)$$

wobei  $\mu_0$  der Sensibilitätskoeffizient der Haut und  $\mu$  derjenige des bestrahlten subkutanen Gewebes ist. Der biologische Dosenquotient wird dann

$$Q^* = \frac{D_0^*}{D^*} = \frac{\mu_0}{\mu} \cdot \frac{D_0}{D} \quad (104)$$

oder nach Gleichung (89)

$$Q^* = \frac{\mu_0}{\mu} \cdot Q. \quad (105)$$

Hieraus ersehen wir, daß überall da, wo das subkutane Gewebe weniger empfindlich ist, als die Haut, d. h. wo  $\mu < \mu_0$ , stets auch der biologische Dosenquotient größer als 1 ist; denn der physikalische Dosenquotient,  $Q$ , ist stets größer als 1.

Ist aber das subkutane Gewebe empfindlicher als die Haut (lymphatische Milz, Ovarium, Testikel, maligner Tumor), dann ist der Sensibilitätskoeffizient in der Tiefe größer als an der Oberfläche, es ist  $\mu > \mu_0$  und damit

$$\frac{\mu_0}{\mu} < 1.$$

Weil aber  $Q$  stets größer ist als 1, so ist von vorneherein gar nicht gesagt, ob nun das Produkt

$$\frac{\mu_0}{\mu} \cdot Q$$

größer ist oder kleiner als 1. Ist die Röntgenempfindlichkeit des subkutanen Gewebes sehr viel größer als dasjenige der Haut, so kann sehr wohl der biologische Dosenquotient kleiner werden als 1.

Kehren wir zu unserer Normaldisposition zurück, welche einen physikalischen Dosenquotienten 3 ergibt, so hat es durchaus nichts Übertriebenes anzunehmen, die Röntgen-

empfindlichkeit eines malignen Tumors oder dergleichen sei zehnmal größer, als diejenige der Haut. Dann würde

$$\frac{\mu_0}{\mu} = \frac{1}{10}$$

und

$$Q^* = 0,3 \cdot Q. \quad (106)$$

In diesem Falle wäre also die biologische Tiefenwirkung 3,3 mal größer als die Hautwirkung.

#### e) Sensibilisierung und Desensibilisierung.

Nach allem, was wir gesehen haben, muß es von größter Bedeutung sein, den biologischen Dosenquotienten  $Q^*$  möglichst klein zu gestalten, und nachdem wir alle Faktoren haben Revue passieren lassen, welche uns gestatten, den physikalischen Dosenquotienten  $Q$  auf ein tunlichst geringes Maß zu reduzieren, verbleibt uns noch der andere Faktor  $\frac{\mu_0}{\mu}$ , der Quotient der Sensibilitätskoeffizienten. Können wir auch noch auf diesen Einfluß gewinnen, um auch ihn möglichst klein werden zu lassen, so ist damit eine weitere Verkleinerung des Produktes  $Q^*$ , erreicht.

Die Verkleinerung eines Quotienten ist durch zwei Mittel zu erstreben: durch Verkleinerung des Zählers und durch Vergrößerung des Nenners.

Die Verkleinerung des Zählers,  $\mu_0$ , bedingt eine Erniedrigung der Hautsensibilität, und die Vergrößerung des Nenners,  $\mu$ , erfordert eine Erhöhung der Sensibilität des in der Tiefe gelegenen Gewebes. Für beide Aufgaben liegen Lösungen und Versuche von solchen vor.

Die Sensibilisierung der subkutanen Gewebe ist bis heute wohl kaum anders zu erreichen, als durch die Thermopenetration mit hochfrequenten Wechselströmen. Immerhin dürfte es nicht leicht sein, dies zur Ausführung zu bringen, ohne zugleich auch die Haut mitzuerwärmen, und dadurch mitzusenibilisieren; damit würde aber das Erreichte illusorisch, denn wenn man an einem Quotienten zugleich den Zähler und den Nenner vergrößert, so wirken sich diese beiden Veränderungen entgegen, und so könnte in unserm Falle die Sensibilisierung des tiefen Gewebes durch gleichzeitige Sensibilisierung der Haut aufgehoben und sogar überkompensiert werden.

Als aussichtsreicher hat sich die Desensibilisierung der Haut erwiesen, deren erste Einführung wir G. Schwarz verdanken. Nachdem dieser Autor nachgewiesen hatte, daß die Röntgenempfindlichkeit irgendeines Gewebes um so größer ist, je beträchtlicher sein Stoffumsatz ist, lag der Gedanke nahe, den Stoffumsatz künstlich hintanzuhalten durch vorübergehende Unterdrückung des Blutkreislaufes. Es ist dann auch der experimentelle Nachweis vollkommen geglückt, daß eine blutleere Haut gegenüber einer normal durchbluteten unter gleichen Umständen eine weit größere Röntgendosis verträgt.

Die hierzu nötige Blutleere stellt Schwarz durch Kompression her.

Eine besondere Vorsichtsmaßregel für diese Methode ist dann von mir angegeben worden, indem ich darauf hinwies, daß in manchen Fällen der Druck auch auf das tief gelegene Gewebe wirken kann, welche der Röntgenwirkung unterworfen werden soll. Es würde dann auch dieses desensibilisiert. Man muß deshalb die Forderung stellen, daß der Druck nicht größer sein dürfe, als zur Erreichung einer genügenden Desensibilisierung der Haut gerade nötig ist. Es gehört also zu der Methode der Druckenämie auch eine Druckmessung.

Die Ausführung dieser Druckmessung ist einfach: Man bindet auf die Haut einen Gummiballon, der mit einem Manometer und einer Pumpe in Verbindung steht, und füllt ihn so weit mit Luft, bis der gewünschte Druck erreicht ist. Um Schwankungen dieses Druckes durch Atembewegungen und andere Zufälligkeiten auszuschalten, ist das ganze pneumatische System noch mit einem Reserveballon verbunden. Die Einrichtung ist auf Figur 18 dargestellt.

Ein sicheres Urteil über die Größe desjenigen Druckes, welcher zu einer richtigen Desensibilisierung eben genügt, ist erst dann zu fällen, wenn eine größere Zahl von Beobachtern zu übereinstimmenden Resultaten gelangt ist. Nach meinen persönlichen Erfahrungen ist dies bei 3 cm Hg, bzw. 40 cm Wasser der Fall. Ich habe diese Zahl schon früher angegeben und habe seither keine Veranlassung gefunden, davon abzugehen; immerhin halte ich mit einem definitiven Urteil noch zurück.

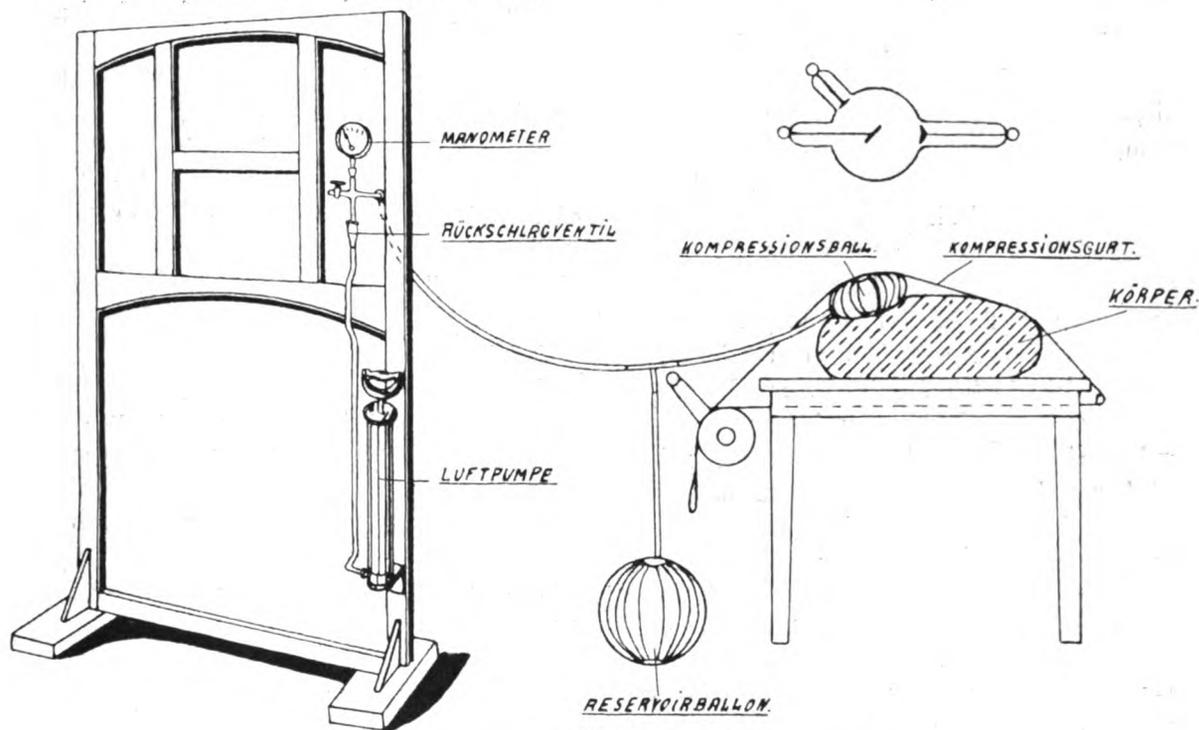


Fig. 18.

Vorrichtung zur Kompression unter dosiertem Druck.

Eine andere Methode der Erzeugung künstlicher Blutleere in der Haut haben Reicher und Lenz angegeben, die Einführung von Adrenalin, sei es durch Injektion, sei es durch Iontophorese. Es unterliegt gar keinen Zweifel, daß die Anämisierung durch Adrenalin auch zu einer Desensibilisierung der Haut führt. Immerhin müssen wir bedenken, daß wir nicht wissen, wie tief diese Wirkung geht, wenn auch gerade für sie die Aussicht besteht, daß ihre Tiefenwirkung weniger beträchtlich ist, wie beim Druck. Liegt ein Gewebe, welches durch die Röntgenstrahlen beeinflußt werden soll, direkt unter der Haut, so ist die Kompressionsmethode sicherlich unbrauchbar, denn in diesem Fall steht das subkutane Gebilde beinahe unter dem gleichen Drucke wie die Haut selbst. Aber gerade in diesem Falle sollte auch die Adrenalinmethode mit besonderer Vorsicht Verwendung finden. Wendet man die Injektion an so sollte jedenfalls nicht subkutan, sondern mit größter Sorgfalt nur intrakutan injiziert werden, damit ja kein desensibilisierender Einfluß sich auf das subkutane Gewebe erstrecke.<sup>1)</sup>

Einer über die Bedeutung dieser Methode geäußerten Auffassung muß ich an dieser Stelle entgegenreten, weil sie auf einem offenbaren Irrtum beruht. Aus der Beobachtungstatsache, daß die Röntgenwirkung auf lebendes Gewebe verkleinert wird,

1. durch Adrenalinwirkung,
2. durch Verminderung des Absorptionsvermögens,

<sup>1)</sup> In neuester Zeit hat Iselin gegen die Anämisierung mit Adrenalin den ebenso plausibeln wie schwerwiegenden Einwand erhoben, daß die Röntgenschädigung der Blutgefäße, wie sie namentlich für die Spätschäden verantwortlich zu machen ist, durch ein Gefäßgift, wie das Adrenalin, kaum abgeschwächt werden dürfte.

wurde der falsche Schluß gezogen, daß die geringere Röntgenwirkung nach Adrenalinverwendung auf verminderter Absorptionsfähigkeit der anämisierten Gewebe beruhe.

Daß diese Auffassung grundsätzlich falsch ist, geht aus einem Blick auf die Gleichung (105) für den biologischen Dosenquotienten  $Q^*$  hervor. Ein vermindertes Absorptionsvermögen verkleinert den physikalischen Dosenquotienten  $Q$ , während das Adrenalin ganz sicher nur den Sensibilitätskoeffizienten der Haut,  $\mu_0$ , verkleinern kann. Es handelt sich dabei um zwei grundsätzlich verschiedene Dinge, deren einzige gemeinsame Eigenschaft die ist, daß sie den biologischen Dosenquotienten  $Q^*$  verkleinern.

Auf einen Punkt, der allenfalls von gewisser Bedeutung sein könnte, muß hier noch hingewiesen werden: Die vorstehenden Erörterungen sind nur dann unanfechtbar, wenn die Röntgenwirkung eine reine Lokalwirkung ist. Nun ist aber bis zur Stunde noch nicht mit Sicherheit bewiesen, ob nicht doch auch die Allgemeinwirkung in Rechnung zu ziehen ist. Ist es aber ein Toxin, welches unter der Röntgenwirkung in der Haut entsteht und, auf dem Blutwege z. B. zu den Ovarien gebracht, die spezifischen Schädigungen derselben auslöst, dann würden wir durch die Anämisierung der Haut die Toxinbildung hintanhaltend und damit wenigstens einen Teil der Wirkung auf das Ovarium einbüßen.

Diese Frage steht aber zurzeit noch zur Diskussion.

Die besten Aussichten auf Erfolg haben wir mit der Kompressionsmethode überall da, wo zwischen der Haut und der Stelle der gewollten Röntgenwirkung solche Gewebe liegen, welche eine Gewölbewirkung entfalten, und dadurch den Druck, der auf die Haut ausgeübt wird, von den tiefen Geweben fernhalten.

Am idealsten ist diese Bedingung am Thorax erfüllt, wo die Rippen das Gewölbe bilden, welches jeden Druck auf eine beschränkte Stelle von dem Inhalt der Brusthöhle fernhalten, während die Interkostalräume die Gewähr bieten, daß doch immerhin eine ordentliche Menge von Röntgenenergie in den Brustraum eindringt.

Weniger günstig liegen die Verhältnisse beim Gehirnschädel; denn hier ist zwar ein tadelloses Gewölbe vorhanden, das aber ein unerfreulich großes Absorptionsvermögen für Röntgenstrahlen besitzt.

Günstiger liegen die Verhältnisse bei den Ovarien, die zwar in wechselnder Tiefe unter der Haut und vielleicht noch unter manchen Darmschlingen liegen, durch den Tonus der Bauchmuskulatur aber völlig gegen jeden Druck von den Bauchdecken her geschützt sind. Hier ist einstweilen das hauptsächlichste Anwendungsgebiet der Kompressionsanämie und hier ist sie auch einfach und sicher durchzuführen.

Eine Aufgabe harret noch der experimentellen Bearbeitung: die Bestimmung derjenigen Dosis, welche man unter einer Kompression von bestimmten Beträge verabfolgen darf. Es sind zwar einige Zahlen darüber publiziert worden, aber erstlich sind sie noch zu wenig zahlreich und zweitens waren die daraus gezogenen Schlüsse nicht immer zutreffend. Wenn z. B. gesagt wurde, daß nach den experimentellen Ergebnissen bei harten Strahlen die doppelte Dosis (gemessen nach Sabouraud) gegeben werden konnte, und daß deshalb die Widerstandsfähigkeit der Haut auf das Doppelte gestiegen sei, so ist dieser Schluß deshalb unrichtig, weil die Haut ja schon ohne Desensibilisierung bei harter Strahlung ungefähr die doppelte Sabouraudosis verträgt.

Es genügt aber hier durchaus nicht, allein mit weichen, mittlern und harten Strahlen zu argumentieren, sondern wir müssen jeweilen über den Härtegrad oder die Grenzen, innerhalb welcher derselbe geschwankt hat, zahlenmäßig orientiert sein. Sind zur Erhöhung des Härtegrades Aluminiumschichten vorgeschaltet worden, so muß der Härtegrad mit dem absoluten Härtemesser bestimmt werden. Auch der Druck, mit welchem man anämisiert, muß gemessen werden. Nur dann kommen wir zu einem exakten Urteil über den Zusammenhang zwischen der Höhe des anämisierenden Druckes, dem Härtegrade und dem Betrage der herabgesetzten Empfindlichkeit der Haut.

## f) Homogenbestrahlung.

Nach all den vorausgegangenen Erörterungen dürfte es klar sein, daß die seinerzeit viel besprochene — und neuerdings wieder ausgegrabene — „Homogenbestrahlung“ physikalisch ein Unding ist.

Gemeint war damit nicht etwa die Verwendung homogener Strahlen, d. h. die Vermeidung eines Strahlengemisches, sondern die Erzeugung eines homogenen Feldes. Dies sollte erreicht werden

1. durch möglichst hohen Härtegrad und
2. durch möglichst große Fokaldistanz.

Nun haben wir ja allerdings gesehen, daß die Abnahme der Intensität mit der Tiefe um so geringer ist, das Feld also um so mehr sich der Homogenität nähert, je höher der Härtegrad und je größer die Fokaldistanz ist. Wir haben uns aber sofort auch überzeugt, daß eine Steigerung ins Ungemessene nicht möglich ist, ja, daß wir sogar sehr rasch an die Grenze des Möglichen gelangen. Noch lange bevor das Feld auch nur annähernd homogen ist, verschleudern wir so gewaltige Mengen von Röntgenenergie, daß an eine therapeutische Wirkung in dem gewollten Sinne nicht zu denken ist. Mit den Härtegraden verhält es sich etwas anders. Sind die Weichteile von einigermaßen beträchtlicher Dimension, so sind wir gar nicht imstande, solche Härtegrade herzustellen, welche uns auch nur annähernde Homogenität des Feldes erzeugen würden. Und wenn wir es könnten, so wäre es das Verkehrteste der Welt, dieses homogene Feld wirklich zu verwenden, denn homogen kann ein Feld nur da sein, wo keine Absorption besteht. Eine Strahlung hat aber stets nur da eine Wirkung, wo sie absorbiert wird.

## g) Induzierte Röntgenwirkung.

Die schönen Erfolge, welche Beck mit seiner Wismutpastenbehandlung erzielt hat, sind leider durch mehrere Unglücksfälle getrübt worden, wo die Resorption des Wismut zu teils vorübergehenden, teils schweren Vergiftungen geführt hat. Beck selbst hat aber schon den Gedanken gehabt, daß es am Ende die Röntgenstrahlen seien, welche bei den folgenden Kontrollaufnahmen, wie er sagte, das Wismut aktiviert und so eine Heilwirkung ausgelöst haben.

Nach dem, was wir über die Wirkungen der Röntgenstrahlen wissen, hat diese Hypothese etwas sehr Bestechendes. In die Tiefe des Beckens und an andere Stellen, wo die eingespritzte Paste liegt, können ja nur harte Strahlen in einigermaßen genügender Menge dringen. Außerdem gelangen dahin wohl in beträchtlicher Menge die Körpersekundärstrahlen. Alle diese Strahlen werden in dem hochatomgewichtigen Wismut vollständig absorbiert. Bei dieser Absorption entstehen aber die Wismutsekundärstrahlen, welche, wie alle Sekundärstrahlen der Schwermetalle, einen geringen Härtegrad haben, und deshalb auf das unmittelbar anliegende Granulationsgewebe kräftig einwirken.

Beruhet nun die Heilwirkung der Kombination von Wismutinjektion und nachfolgender Bestrahlung auf der Bildung solcher Sekundärstrahlen, so muß sich für diesen Zweck das giftige Wismut umgehen lassen. Es genügt, irgendein anderes Material einzuführen, welches bloß die Eigenschaft haben muß, unter der Wirkung einer auftreffenden Röntgenstrahlung weiche Sekundärstrahlen auszusenden.

Da hierdurch das scheinbar unmögliche Problem gelöst ist, weiche Strahlen in großer Tiefe zur Absorption zu bringen, so wäre eine weitere eingehende Untersuchung vieler Substanzen auf ihr diesbezügliches Verhalten eine ebenso dankbare als verdienstvolle Aufgabe. Es würde dabei namentlich darauf ankommen, dasjenige Material — unter den ungiftigen Substanzen — ausfindig zu machen, welches unter der Wirkung harter Röntgenstrahlen und der Körpersekundärstrahlen möglichst viel eigene weiche Sekundärstrahlen aussendet.

## V. Schlußbemerkung.

Nicht nur der Schlußsatz des vorigen Abschnittes, sondern noch viele andere Stellen dieses Buches enthalten anstatt einer fix und fertigen Angabe große Fragezeichen, auf welche der Verfasser noch lange keine Antwort geben kann. Es ist an manchen Orten gezeigt worden, wie Dinge, welche wir zu wissen glaubten, in Wirklichkeit ein anderes Gesicht zeigen. Es ist aber auch ganz unmöglich, daß die Kraft eines Einzelnen auch nur annähernd ausreiche, um die Bearbeitung aller der angeregten Fragen zu unternehmen. Auch stehen einem vereinzelt Praktiker weder die Zeit noch die Mittel noch das klinische Material hierzu zu Gebote.

Andrerseits hoffe und erwarte ich, daß die Fülle von Fragen, welche noch der Erledigung harren, den Lesern so weit nahe gebracht wurden, daß sich Viele an die experimentelle Bearbeitung der Aufgaben wagen mögen, deren theoretische Basis in den vorstehenden Zeilen geschaffen und, soweit möglich, in solcher Form dargestellt worden ist, daß auch den Lesern aus dem Ärztstand das Wesen derselben klar geworden sein dürfte.

Anschließend an diese Bemerkung spreche ich an meine Leser noch die dringende Bitte aus, man möge mir diese und ähnliche Worte nicht als „Mathematikerhochmut“ auslegen. Sie entspringen dem Wunsch, den Medizinern, deren Mitarbeit auf diesem Gebiete unentbehrlich ist, diejenigen Mittel an die Hand zu geben, welche sie zu eben dieser nötigen Mithilfe befähigen sollen. Sie sind nur die Antwort auf viele Fragen, die mir immer wieder brieflich und mündlich vorgelegt werden.

## VI. Anhang.

### A. Dosis und Härtegrad.

Am Röntgenkongreß 1912 in Berlin habe ich die große Bedeutung des Härtegrades für die Dosierung hervorgehoben und am darauffolgenden Kongreß für innere Medizin in Wiesbaden an die Herren Kliniker die Bitte gerichtet, es möchte ein möglichst großes klinisches Material gesammelt werden, aus welchem sich die quantitativen Beziehungen ermitteln lassen zwischen der Wirkung der Röntgenstrahlen auf die Haut und auf die Sabouraudpastille einerseits und dem Härtegrad andererseits.

Nun erhalte ich soeben eine private Mitteilung von Herrn Dr. Hans Meyer an der dermatologischen Klinik in Kiel, aus welcher hervorgeht, daß nach seinen Untersuchungen über diese Frage als vorläufiges Ergebnis folgender Zusammenhang aufgestellt werden konnte:

Bei einer 1 cm-Strahlung wird die Erythemdosis erreicht mit 1 Sabouraud

"	"	1,5	"	"	"	"	"	1,2	"
"	"	2	"	"	"	"	"	1,6	"
"	"	2,5	"	"	"	"	"	2	"

Immerhin sei hier ausdrücklich bemerkt, daß das Hartstrahlenerythem mit zwei Sabouraudvoll Dosen, besonders im Hinblick auf die Spätschäden, von dem Weichstrahlenerythem grundsätzlich verschieden ist. Die obigen Äquivalentzahlen beziehen sich nur auf die äußerste Oberflächenschicht. Die tieferen Hautgefäße, deren Degeneration für die Spätschäden verantwortlich zu machen ist, leiden — bei gleicher Oberflächendosis — mehr unter der harten Strahlung als unter der weichen, wie dies nach den Ausführungen der betreffenden Kapitel dieses Buches ja auch nicht anders erwartet werden kann.

### B. Das Iontoquantimeter.

Die Reiniger, Gebbert & Schall A.-G. hat mich in liebenswürdiger Weise auf dem laufenden erhalten über ihre Untersuchungen betreffend die Verwertung der Ionisation für die Dosimetrie.

Wie schon auf S. 61ff. ausgeführt wurde, beruht das Prinzip der Messung der Intensität vermitteltst Ionisierung darauf, daß man eine Luftstrecke (Ionisierungskammer) durch Röntgenstrahlen ionisiert, deren beide Grenzen auf ein so hohes Potential geladen werden, daß bei Ionisierung der Luftschicht der Sättigungsstrom erreicht wird.

Man kann aber das gleiche Prinzip nicht nur zur Messung der Intensität, sondern, was für uns wichtiger ist, zur Messung der Flächenenergie verwenden. Wird nämlich die eine Grenze der Ionisationskammer geerdet und die andere auf ein bestimmtes Potential geladen, so stellt diese Ladung, zusammen mit der Kapazität ihres Trägers, eine bestimmte Elektrizitätsmenge dar, von welcher dann durch die ionisierte Kammerluft um so mehr abfließt, je intensiver und je länger man bestrahlt.

Steht also einerseits der Sättigungsstrom zu der Intensität der Röntgenstrahlung in Beziehung, so kann man andererseits aus der Abnahme der Ladung auf die Flächenenergie schließen, denn diese Abnahme ist nicht nur von der Intensität, sondern gleichzeitig von der Bestrahlungszeit abhängig. Eine wichtige Bedingung zur Verwirklichung dieser Idee ist selbst-

verständlich eine peinliche Isolation der geladenen Kapazität, damit nicht eine Abnahme der Ladung, auch ohne Röntgenbestrahlung, stattfindet.

Erst in den letzten Tagen hatte ich das Vergnügen, mich persönlich davon zu überzeugen, daß die Aufgabe heute schon als gelöst gelten darf. Das neue Instrument, Iontoquantimeter genannt, weil es die Quantität der Flächenenergie mit Hilfe der Ionisation mißt, besteht aus einer Ionisationskammer, welche auf der Haut zu befestigen ist, einer gut isolierten Leitung, welche vom Patienten hinter die Schutzwand führt, und einem Elektrometer, dessen Nadel die Ladung des Instrumentes anzeigt.

**ROHMERSCHICKL  
SCHULABEITUNG**

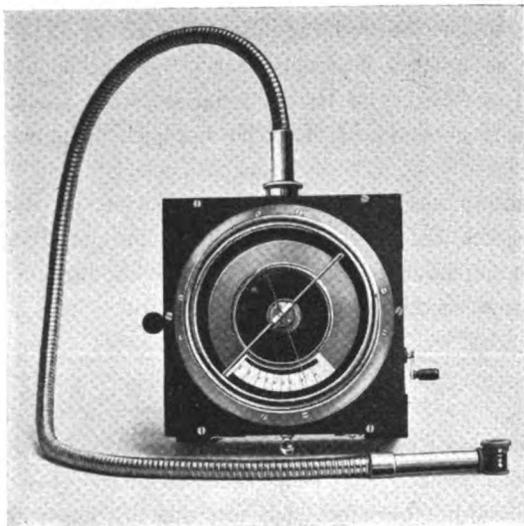


Fig. 19.

Eine kleine Elektrisiermaschine dient zur Herstellung einer Ladung, welche so zu bemessen ist, daß die Elektrometernadel auf Null einsteht. Dort bleibt sie unerschütterlich fest stehen, solange die Luftkammer nicht ionisiert wird. Dringen aber Röntgenstrahlen durch die Ionisationskammer, so beginnt die Elektrometernadel allmählich zu wandern. Die Skala ist nach Kienböckeinheiten geteilt und diese Teilung gilt für mittlere Härtegrade. Die Elektrometernadel bewegt sich stetig von Null über 1 x, 2 x, 3 x usw. Ist die gewollte Dosis erreicht, so wird die Bestrahlung unterbrochen.

Auch hier wieder gilt, wie bemerkt, die Teilung nach Kienböckeinheiten nur für mittlere Härtegrade. Ja, es scheint, nach den bisherigen Versuchen, daß die Unterdosierung bei harten und die Überdosierung bei weichen Strahlen hier noch stärker ausgesprochen ist, als bei der Sabouraudpastille. Dies ist ein Beweis für die Richtigkeit meiner auf S. 62 ausgesprochenen Vermutung, daß die Halbwertschicht der Luft sich mit dem Härtegrad wahrscheinlich nur verhältnismäßig wenig ändere. Ist diese Änderung so gering, daß man sie vernachlässigen darf, so registriert das Iontoquantimeter die exakten Werte der Flächenenergie, und es ist dann der erforderliche Zeigerausschlag für die wahre Erythemdosis einfach der Halbwertschicht der Strahlung proportional. Auch hierüber werden klinische Versuchsreihen Auskunft geben.

Trotzdem diese letzte Arbeit noch nicht getan ist, hielt ich mich dennoch für verpflichtet, in letzter Stunde vor dem Erscheinen dieses Buches diese neueste Erfindung bekanntzugeben. Um deren hohe Bedeutung in wenigen Worten klarzumachen, sei nur kurz folgendes festgestellt:

Alle bisher angewandten Reagenzkörper messen weder die Flächenenergie noch die Dosis für mehr als einen Härtegrad. Bei harten Strahlen überschätzen sie die Dosis und unterschätzen die Flächenenergie. Das Iontoquantimeter dagegen mißt mit bemerkenswerter Annäherung die Flächenenergie, wengleich auch hier noch eine geringe Unterschätzung bei hohen Härtegraden stattfindet. Es kann aber auch so geteilt werden, daß es die Dosis anzeigt, wenn man unter der Elektrometernadel mehrere Skalen anbringt, von denen jede für einen bestimmten Härtegrad Geltung hat.

Alle bisher angewandten Reagenzkörper messen weder die Flächenenergie noch die Dosis für mehr als einen Härtegrad. Bei harten Strahlen überschätzen sie die Dosis und unterschätzen die Flächenenergie. Das Iontoquantimeter dagegen mißt mit bemerkenswerter Annäherung die Flächenenergie, wengleich auch hier noch eine geringe Unterschätzung bei hohen Härtegraden stattfindet. Es kann aber auch so geteilt werden, daß es die Dosis anzeigt, wenn man unter der Elektrometernadel mehrere Skalen anbringt, von denen jede für einen bestimmten Härtegrad Geltung hat.

Diese Teilung hat den großen Vorzug, daß sie es nie vergessen läßt, wie sehr die Dosis vom Härtegrad abhängt. Sie kann allerdings erst auf Grund großer klinischer Versuchsreihen entworfen werden. Aber schon in der jetzigen Form mit einer nur für mittlere Härtegrade gültigen Eichung leistet das Iontoquantimeter mehr als alle anderen Dosimeter. Denn, abgesehen von der stets unumgänglich nötigen Feststellung des Härtegrades, fällt bei seinem

Gebrauche jede weitere Komplikation fort. Es braucht weder Abschätzung von Farbnuancen oder Helligkeitsgraden — wobei doch stets ein persönliches subjektives Moment mitspielt — noch irgendwelche Messung oder Rechnung.

### Druckfehlerverzeichnis.

- Seite 22. Zeile 17 von oben S. 30 und 78 ff. anstatt 57 und 154 ff.  
Seite 25. In sämtlichen Gleichungen ist  $e$  zu ersetzen durch 2.  
Seite 52. Zeile 7 von oben Fig. 12 anstatt Fig. 11.  
Seite 56. Gleichung (43)  $\epsilon$  anstatt E.  
Auf der folgenden Zeile und in den Gleichungen (44) und (45) ist  $\epsilon^*$  zu setzen anstatt E\*.  
Seite 63. Zeile 10 von unten Lichtpapierverfahren anstatt Lichtverfahren.

## Literaturnachweis.

F. = Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen.  
Verh. = Verhandlungen der Deutschen Röntgengesellschaft.

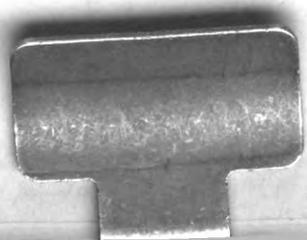
- Adams, Über das Spektrum der Röntgenstrahlen einer Fokusröhre, sowie über die selektive Absorption der Strahlen in gewissen Medien. *Phil. Magaz.* 1907, S. 576. Ref. F. XI, S. 227.
- Albers-Schönberg, Zur Technik gynäkologischer Röntgenbestrahlungen. F. XII, S. 163.
- Albers-Schönberg, Aus der Röntgenologie und Röntgentechnik. *Zeitschr. f. ärztl. Fortbildung*, Nr. 7. Ref. F. XI, S. 297.
- Bauer, Über einige konstruktive Neuerungen (erste Ankündigung des Qualimeters). *Verh.* V, S. 122.
- Bauer, Das Qualimeter. *Verh.* VII, S. 137.
- Béclère, Die Qualität der Röntgenstrahlen in der Rapidphotographie. *Arch. d'él. méd.*, Nr. 255.
- Beez, Ein neuer Härtemesser für Röntgenstrahlen. F. XI, S. 285.
- Beez, Über ein direkt zeigendes elektrisches Röntgenstrahlenenergiemeter. *Verh.* VII, S. 118.
- Beez, Über Röntgenaufnahmen mit Kontrollskala für die richtige Wahl der Röhre und der Expositionszeit. F. XIV, S. 177.
- Belot, Zur Frage der Filter in der Radiotherapie. *Journ. de radiologie. Brux.* 1909. I. Ref. F. XIII, S. 429.
- Benoist, Verfahren zur Messung der Absorption der Röntgenstrahlen. *Arch. d'él. méd.*, Bd. 14. 1906, S. 260.
- Bergonié, Messung des Härtegrades der Röntgenstrahlen mit dem elektrostatischen Voltmeter. *Comptes rendus* 144. 1907, S. 28. Ref. F. XI, S. 71.
- Bordier und Gallimard, Über die Wirkung der Röntgenstrahlen auf die Platinocyanüre. *Arch. d'él. méd.* 1905, S. 323. Ref. F. VIII, S. 455.
- Bordier und Gallimard, A new unit for measuring X rays. *Arch. of the X ray*, Nr. 75—78. Ref. F. X, S. 385.
- Bordier, Neues Chromoradiometer. *Arch. d'él. méd.*, Nr. 300. Ref. F. XVI, S. 405.
- Bordier, Die Behandlung von Epitheliomen. *Arch. d'él. méd.*, Nr. 299. Ref. F. XVI, S. 404.
- Bordier, Radiometric methods. *Arch. of the Roentgen Ray*, Nr. 71. Ref. F. X, S. 194.
- Butcher, Messung des Röntgenlichtes. *Roentgen Society*, 6. II. 1908.
- Christen, Zur Dosierungsfrage. F. XV, S. 31.
- Christen, Röntgenphotographie und Röntgentherapie, zwei komplementäre Probleme. F. XV, S. 348.
- Christen, Einige Anwendungen der Absorptionsgesetze auf die Röntgentherapie. F. XVI, S. 273.
- Christen, Über die physikalischen und physiologischen Grundlagen der Tiefentherapie. *Strahlentherapie*, Bd. I, H. 1.
- Christen, Der absolute Härtemesser. *Strahlentherapie*, Bd. I, H. 3.
- Colombo, Falschheit der durch Ba-Pt-Cy gelieferten radiometrischen Angaben. F. X, S. 102.
- Cole, Experimental researches concernig direct, indirect and secondary radiographic rays. *Arch. of the Roentgen Ray*, Nr. 58—63.
- Cowl, Über ein gangbares Verfahren zur Messung der diagraphischen Kraft der Röntgenstrahlen. F. VIII, S. 308.
- Freund, Vortrag in der k. k. Ges. der Ärzte in Wien, 8. April 1909. F. VII, S. 218.
- Gaiffe, Über ein Verfahren zur Messung der totalen Menge der Röntgenstrahlen, die in einer gegebenen Zeit ausgesandt werden. *Comptes rendus* 142, S. 447. Ref. F. IX, S. 408.
- Grisson, Fehler im Meßverfahren und deren Beseitigung. *Verh.* IV, S. 89.
- Guilleminot, Die biochemische Wirkung verschiedener Strahlen. *Arch. of the Roentgen Ray*, Bd. XV, 1910, S. 99. Ref. F. XVI, S. 76.
- Guilleminot, Neues Quantimeter für Röntgenstrahlen. *Comptes rendus* 145, S. 711. Ref. F. XII, S. 67.
- Hansmann, Frida, Beziehungen zwischen der chemischen Wirkung der aus einer Röntgenröhre austretenden Strahlung zur Wirkung des Lichtes auf dieselbe Bromsilbergelatine. F. V, S. 83.
- Henrard, Über den Wert der äquivalenten Funkenlänge bei der Bestimmung der Härte einer Röntgenröhre. *Brüssel* 1906. F. X, S. 188.

- Heßmann, Zur Dosierung der Röntgenstrahlen in der Praxis. Verh. IV, S. 85.
- Holzknrecht, Demonstration zur Dosierung. Verh. VI, S. 49.
- Holzknrecht, Weitere Mitteilungen über die Skala der Sabouraud. F. XV, S. 372.
- Holzknrecht, Über die Tiefenverteilung der Strahlenwirkung. F. VIII, S. 191.
- Immelmann, Ein neuer Röntgenstrahlenmesser. Verh. IV, S. 84.
- Iselin, Schädigungen der Haut durch Röntgenlicht nach Tiefenbestrahlung (Aluminium). Kumulierende Wirkung. Münch. Med. Wchschr., 1912, Nr. 49.
- v. Jaksch, Über ein neues radiotherapeutisches Verfahren. Zeitschr. f. klin. Med., 1907, Bd. 64, S. 316.
- Janus, Der Expositionsmesser, ein neues Hilfsinstrument für Röntgenaufnahmen. F. XIV, S. 253.
- Jirotko, Die „Dosierung“ der Röntgenstrahlen. F. IX, S. 385.
- Jirotko, Dosierung von Röntgenstrahlen für therapeutische und röntgenographische Zwecke. Verh. II, S. 38.
- Kienböck, Über Dosimeter und quantimetrisches Verfahren. F. IX, S. 276.
- Kienböck, Über die Einwirkung des Röntgenlichtes auf die Haut. Wien. klin. Wchschr. 1900, Nr. 50.
- Kienböck, Zur Pathologie der Hautveränderungen bei Röntgenbestrahlung bei Mensch und Tier. Urban und Schwarzenberg 1901.
- Kienböck, Technik der Röntgentherapie. 73. Vers. deutsch. Naturf. u. Ärzte, Hamburg 1901. F. V, S. 29.
- Kienböck, Die Technik bei Röntgenverbrennungen und ein Maß für die Stärke des Röntgenlichtes. Verh. III, S. 96.
- Klingelfuß, Die Einrichtung zur Messung der Röntgenstrahlen mit dem Sklerometer. Jahresvers. der schw. naturf. Ges. in Basel 1910. Ref. F. XVI, S. 64.
- Klingelfuß, Exakte Dosierung therapeutischer Voll- und Teildosen und praktische Eichung einer Röntgenröhre. Verh. VII, S. 126.
- Klingelfuß, Bericht über Vergleichsmessung der Sabouraud und Noiréschen Reaktionsdosis mit absoluten Einheiten. Verh. VI, S. 123.
- Klingelfuß, Die Änderung der Röntgenstrahlenhärte durch die elektrische Spannung bei einer Röntgenröhre. Verh. V, S. 62.
- Klingelfuß, Über ein neues Verfahren zur kontinuierlichen Ablesung der Härte einer Röntgenröhre. Verh. IV, S. 145.
- Köhler, Theorie einer Methode, bisher unmöglich anwendbar hohe Dosen Röntgenstrahlen in die Tiefe des Gewebes zur therapeutischen Wirksamkeit zu bringen, ohne schwere Schädigung des Patienten, zugleich eine Methode des Schutzes gegen Röntgenverbrennungen überhaupt. F. XIV, S. 27.
- Köhler, Über Dosierung in der Röntgentherapie und Vorgänge im Innern der Röntgenröhre. F. XI, S. 1.
- Kommission zur Festsetzung fester Normen für die Messung der Intensität der Röntgenstrahlen. Sitzung am 31. März 1907. Verh. III, S. 15.
- v. Kowalski, s. Kommission zur Festsetzung usw.
- Kromayer, Die Röntgendosierung in Theorie und Praxis. Verh. V, S. 51.
- Levy-Dorn, Dosierung der Röntgenstrahlen in der Praxis. Verh. II, 1906, S. 35.
- Lewis-Jones, Über den Gebrauch des Milliampèremeters im Röntgenbetriebe. Kongr. f. Physiotherapie. Lüttich 1905. F. IX, S. 146.
- Perthes, Versuch einer Bestimmung der Durchlässigkeit menschlicher Gewebe für Röntgenstrahlen mit Rücksicht auf die Bedeutung der Durchlässigkeit der Gewebe für die Radiotherapie. F. VIII, S. 12.
- Pfahler, Ein Röntgenstrahlenfilter und ein Universaldiaphragma und Schutzschirm. The Arch. of physiolog. Therapy, Nov. 1905. Ref. F. X, S. 71.
- Piffard, Methode zur Messung der Strahlendosis. American Roentgen Society, Jahresvers. 29.—31. Aug. 1906. Ref. F. X, S. 375.
- Pirie, The electrolytic method of measuring X Ray. Royal Soc. of Electroth. section. 27. März 1908. Ref. F. VIII, S. 170.
- Reicher und Lenz, Weitere Mitteilungen zur Verwendung der Adrenalinanämie als Hautschutz in der Röntgen- und Radiumtherapie. D. med. Wchschr. 1912, Nr. 1.
- Savill, On the use of the Sabouraud pastille for the measurement of X Ray. Arch. of the Roentgen Ray, Nr. 94.
- Seitz, Über eine neue Art sehr weicher Röntgenstrahlen. Phys. Zeitschr. 6, S. 756. 1905. Ref. F. X, S. 303.
- Schiller und O'Donnell, Induzierte Radioaktivität durch Röntgenstrahlen, F. XVI, H. 4.
- Schilling, Ein einfacher Härtegradmesser. F. IX, S. 312.
- Schindler, Die Gaiffe-Waltersche Milliampèremetermethode usw. D. med. Wchschr. 1908, Nr. 18.
- Schmidt, H. E., Untersuchungen über Bedeutung der Röntgenstrahlenqualität für die direkte Dosimetrie. F. XV, S. 38.
- Schmidt, H. E., Eine Vorrichtung zur Desensibilisierung der Haut bei Tiefenbestrahlungen. F. XV, S. 117.
- Schmidt, H. E., Zur Röntgentherapie tiefliegender Tumoren. F. XIV, S. 134.
- Schmidt, H. E., Röntgentherapie mit abgekürzter Expositionszeit. F. XIV, S. 265.

- Schmidt, H. E., Zur Bestimmung der Strahlendosen, welche bei den einzelnen zur Röntgenbehandlung geeigneten Erkrankungen erforderlich sind. *Therap. Monatschr.* XIII, H. 9. Ref. F. XIII, S. 3.
- Schmidt, H. E., Zur Dosierung der Röntgenstrahlen. F. X, S. 41.
- Schmidt, H. E., Kasuistischer Beitrag zur Röntgenbehandlung des Kankroides und Karzinomes. *Verh.* IV, S. 128.
- Schwarz, Erste Demonstration des Kalomelradiometer, k. k. Ges. der Ärzte in Wien, 11. Jan. 1906. Ref. F. X, S. 251.
- Schwarz, Über die Einwirkung der Röntgenstrahlen auf Ammoniumoxallat-Sublimatlösung. Das Fällungsradiometer. F. XI, S. 114.
- Schwarz, Desensibilisierung der Haut durch Druckanämie. *Münch. Med. Wchschr.* 1909, Nr. 24.
- Strauß, Die Dosierung der Röntgenstrahlen auf photographischem Weg ohne Anwendung einer Dunkelkammer. *D. med. Wchschr.* 1910, Nr. 9. Ref. F. V, S. 227.
- Tonsey, The measurement of the intensity of the Roentgen Ray. *American electrother. Society, Philadelphia*, Sept. 1906. Ref. F. XI, S. 66.
- Turchini, Veränderungen der äquivalenten Funkenlänge einer Röntgenröhre. *Comptes rendus* 140. 1905, S. 649. Ref. F. VII, S. 456.
- Villard, Das Radioskopometer. *Arch. d'él. méd.* 1908, S. 236. Ref. F. XII, S. 291.
- Villard, Meßinstrumente für die direkte Messung der Röntgenstrahlen. *Bull. et Mém. de la soc. de radiologie méd. de Paris*. Bd. XXX. Ref. F. XIV, S. 76.
- Walter, Über das Röntgensche Absorptionsgesetz und seine Erklärung. F. VIII, S. 297.
- Walter, Zwei Härteskalen für Röntgenröhren. F. VI, S. 68.
- Walter, Verkehrt gerichtete Ströme beim Voltmeter. F. XV, S. 41.
- Walter, Das Milliampèremeter als Dosierungsinstrument. F. XIV, S. 342.
- Walter, Über die Größe der Erythemdosis bei Benutzung des Milliampèremeters. F. XIV, S. 108.
- Walter, Über die Strahlungsregionen der Röntgenröhren und die Absorption ihrer Strahlung in ihrer Glaswand. F. XI, S. 340.
- Walter, Physikalisch technische Mitteilungen. F. I, S. 29, 82, 140, 188, 238.
- Walter, Über die Messung der Intensität der Röntgenstrahlen (III. Mitteilung). *Verh.* V, S. 53.
- Walter, Über die Erzeugung harter Röntgenstrahlen zur therapeutischen Behandlung innerer Organe. *Verh.* IV, S. 110.
- Walter, Zur Dosierungsfrage. *Verh.* III, S. 106.
- Walter, Über die Messung der Intensität der Röntgenstrahlen. *Verh.* I, S. 126.
- Walter, Über das Bauersche Qualimeter. F. XVII, S. 211.
- Walter, Über die durch verschiedene Betriebsweise einer Röntgenröhre bewirkten Härteänderungen derselben. *Verh.* VIII, S. 92.
- Wehnelt, Über eine Röntgenröhre mit veränderlichem Härtegrad und über einen neuen Härtemesser. *Boltzmann Festschrift 1904*, S. 160. Ref. F. VII, S. 221.
- Wertheim-Salomonson, Milliampèremeter und Röntgenlicht. F. XVI, S. 291.
- Wertheim-Salomonson, s. Kommission zur Festsetzung usw.
- Zuppinger, Zur Absorption der Röntgenstrahlen. *Vierteljahrsschr. der naturf. Ges. Zürich* 1907. Bd. LII. S. 249. Ref. F. XI, S. 372.







UNIVERSITY OF MINNESOTA  
biom. per 28  
stack no. 59

Fortschritte auf dem Gebiete der Röntge



3 1951 002 712 868 2

Lucas Gräfe & Siller

ag in Hamburg.

## Archiv und Atlas

der normalen und pathologischen Anatomie in typischen Röntgenbildern

(Ergänzungsbände zu „Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen“).

- Band 1: **Die Entwicklung des menschlichen Knochengerüsts während des fötalen Lebens** von **Lambertz**, Stabsarzt bei der Kaiser-Wilhelms-Akademie für das militärärztliche Bildungswesen. Mit 10 Tafeln und 20 Figuren im Text. Kart. Preis 12 M.
- Band 2: **Die angeborenen Verbildungen der oberen Extremitäten** von Prof. Dr. **Georg Joachims-thal**. Mit 8 Tafeln und 24 Figuren im Text. Kart. Preis 9 M.
- Band 3: **Die angeborene Luxation des Hüftgelenkes** von Geh. Med.-Rat Prof. Dr. **Max Schede**. Mit 8 Tafeln. Kart. Preis 8 M.
- Band 4: **Die topographische Anatomie der oberen Extremität** von Dr. **R. Jedlička**, Dr. **G. Krätzenstein** und Dr. **W. Scheffer**. Mit 14 Tafeln. Kart. Preis 10 M.
- Band 5: **Die Frakturen und Luxationen I.** (Die Frakturen und Luxationen der Finger und des Carpus, die Frakturen des Metacarpus und der Vorderarmknochen) von Prof. Dr. **Oberst** in Halle a. S. Mit 192 Röntgenbildern auf 22 Tafeln. Kart. Preis 20 M.
- Band 6: **Die röntgenologische Diagnostik der Erkrankungen der Brusteingeweide** von Doz. Dr. **Guido Holzknacht** in Wien. 229 Seiten. Mit 60 Abbildungen im Text und 50 Röntgenbildern auf 8 Tafeln. Geb. Preis 25 M.
- Band 7: **Die Schussverletzungen** von Generalarzt Dr. **Schjerning**, Stabsarzt Dr. **Thöle** und Stabsarzt Dr. **Voss**. 2. Auflage bearbeitet von Oberstabsarzt Dr. **Franz** und Stabsarzt Prof. Dr. **Oertel**. Mit 75 Abbildungen im Text und 43 Tafeln. Geb. Preis 50 M.
- Band 8: **Die angeborenen Verbildungen der unteren Extremitäten** von Prof. Dr. **Georg Joachims-thal**. Mit 62 Röntgenbildern auf 9 Tafeln und 52 Abbildungen im Text. Kart. Preis 12 M.
- Band 9: **Die Entwicklung der Knochen der Extremitäten von der Geburt bis zum vollendeten Wachstum.** Obere Extremität von Prof. Dr. **Wilms**. Untere Extremität von Dr. **C. Sick**. Mit 92 Röntgenbildern auf 16 Tafeln. Kart. Preis 16 M.
- Band 10: **Die Diagnose des Nierensteins mit Hilfe der neueren Untersuchungsmethoden** von Dr. **Rumpel**. Mit 50 Röntgenbildern auf 10 Tafeln und 9 Abbildungen im Text. (Aus dem Allg. Krankenhaus Hamburg-Eppendorf, I. chirurg. Abteilung, Prof. Dr. **Kümmell**.) Kart. Preis 11 M.
- Band 11: **Die Schädelbasis im Röntgenbilde** nebst einem Anhang: **Über die Nähte, Gefäßfurchen und traumatischen Fissuren des Schädels** von Dr. **Artur Schüller** in Wien. Mit einem Vorwort von Doz. Dr. **Holzknacht**. Mit 6 Tafeln, 6 zugehörigen Skizzenblättern und 30 Abbildungen im Text. Geb. Preis 14 M.
- Band 12: **Die normale und pathologische Anatomie des Hüftgelenks und Oberschenkels** von Dr. **Alban Köhler** in Wiesbaden. Mit 12 Tafeln und 35 Abbildungen im Text. Geb. Preis 22 M.
- Band 13: **Die Entwicklung der knöchernen Wirbelsäule** von Dr. **Béla Alexander**. Mit 42 Röntgenbildern auf 20 Tafeln und 14 Originalzeichnungen im Text. Geb. Preis 20 M.
- Band 14: **Knochensyphilis im Röntgenbild** von Dr. **R. Hahn** in Hamburg und Prof. Dr. **Deycke-Pascha** in Konstantinopel. Mit 81 Bildern auf 10 Tafeln. Geb. Preis 11 M.
- Band 15: **Die röntgenologische Diagnostik der Erkrankungen des Magendarmkanals** von Dr. **F. Goldammer**. Mit 11 Tafeln und einem Vorwort von Prof. Dr. H. **Kümmell**. Geb. Preis 11 M.
- Band 16: **Über Geschwülste und entzündliche Erkrankungen der Knochen** von Stabsarzt Dr. **O. Rumpel**. Mit 140 Röntgenbildern auf 23 Tafeln. (Aus der königl. chirurg. Universitätsklinik zu Berlin.) Geb. Preis 34 M.
- Band 17: **Die Spondylitis tuberculosa im Röntgenbilde** von Dr. **Ludwig Rauenbusch**. Mit 22 Röntgenbildern auf 11 Tafeln und 11 Skizzenblättern. (Aus der königl. Universitätspoliklinik für orthopäd. Chirurgie in Berlin.) Geb. Preis 11 M.
- Band 18: **Die Möller-Barlowsche Krankheit von Eug. Fraenkel**. Mit 1 farbigen und 5 photographischen Tafeln. (Aus dem patholog. Institut des Allgem. Krankenhauses Hamburg-Eppendorf.) Geb. Preis 10 M.
- Band 19: **Die Pneumonie im Röntgenbilde** von **R. v. Jaksch** und **H. Rotky** in Prag. Mit 59 Röntgenbildern auf 10 Tafeln und 10 Skizzenblättern. Geb. Preis 11 M.
- Band 20: **Röntgendiagnostik des uropoëtischen Systems** von Dr. **G. Fedor Haenisch** in Hamburg. Mit 24 Handzeichnungen und 51 Röntgenbildern auf 16 Tafeln. Geb. Preis 15 M.
- Band 21: **Die Entwicklung und der Bau des Kretinenskeletts im Röntgenogramme** von Dr. **Eugen Bircher**, Assistenzarzt der chirurg. Klinik (Prof. **Wilms**) in Basel. Mit 121 Röntgenbildern auf 12 Tafeln, 21 Abbildungen und 4 Schriftproben im Text. Geb. Preis 24 M.
- Band 22: **Die Rachitis im Röntgenbild** von Prof. Dr. **Eug. Fraenkel** und Dr. **Alex. Lorey** in Hamburg mit 45 Röntgenbildern und 12 Tafeln. Geb. Preis 11 M.
- Band 23: **Die Verletzungen des Ellenbogengelenks im Röntgenogramm mit besonderer Berücksichtigung der Frakturen des unteren Humerusendes** von Dr. **E. Wendt**. Mit 179 Röntgenbildern auf 18 Tafeln. (Aus dem Krankenhaus „Bergmannstrost“ [Geheimrat Oberst] zu Halle a. S.) Geb. Preis 17 M.
- Band 24: **Die angeborene Verrenkung des Hüftgelenks in Röntgenbildern** von Dr. **M. Matsuoka** in Kioto (Japan). 60 Bilder mit Erklärungstext auf 10 Tafeln. Geb. Preis 8 M.
- Band 25: **Anatomie und Pathologie der Zähne und Kiefer im Röntgenbilde** mit besonderer Berücksichtigung der Aufnahmetechnik von Prof. Dr. **W. Dieck**, Abteilungsdirektor am Zahnärztl. Institut der Universität Berlin. Mit 52 Textabbildungen und 251 Röntgenbildern auf 17 Tafeln. Geb. Preis 30 M.
- Band 26: **Die kongenitale Knochensyphilis** von Prof. Dr. **Eug. Fraenkel**. Mit 8 Tafeln. Geb. Preis 8 M.
- Band 27: **Die Magenbewegungen** von Dr. **Franz M. Groedel**, Frankfurt a. M. Mit 340 Abbildungen im Text und 135 Röntgenbildern auf 15 Tafeln. Geb. Preis 34 M.

MINITEL

Minnesota Library Access Center

9ZAR05D04S10TFF