

SAMMLUNG VIEWEG
TAGESFRAGEN AUS DEN GEBIETEN
DER NATURWISSENSCHAFTEN
UND DER TECHNIK

Heft 75

Metallröntgenröhren

(Wirkungsweise · Anlage · Betrieb)

von

Karl Becker und Fritz Ebert



SPRINGER FACHMEDIEN WIESBADEN GMBH



Die „Sammlung Vieweg“ hat sich die Aufgabe gestellt, Wissens- und Forschungsgebiete, Theorien, chemisch-technische Verfahren usw., die im Stadium der Entwicklung stehen, durch zusammenfassende Behandlung unter Beifügung der wichtigsten Literaturangaben weiteren Kreisen bekanntzumachen und ihren augenblicklichen Entwicklungsstand zu beleuchten. Sie will dadurch die Orientierung erleichtern und die Richtung zu zeigen suchen, welche die weitere Forschung einzuschlagen hat.

Als Herausgeber der einzelnen Gebiete, auf welche sich die Sammlung Vieweg zunächst erstreckt, sind tätig, und zwar für:

Physik (theoretische und praktische, und mathematische Probleme):

Herr Geh. Reg.-Rat Professor Dr., Dr. E. h. Karl Scheel, Physikal.-Techn. Reichsanstalt, Charlottenburg;

Chemie (Allgemeine, Organische und Anorganische Chemie, Physikal. Chemie, Elektrochemie, Technische Chemie, Chemie in ihrer Anwendung auf Künste und Gewerbe, Photochemie, Metallurgie, Bergbau):

Herr Professor Dr. B. Neumann, Techn. Hochschule, Breslau;

Technik (Wasser-, Straßen- und Brückenbau, Maschinen- und Elektrotechnik, Schiffsbau, mechanische, physikalische und wirtschaftliche Probleme der Technik):

Herr Professor Dr.-Ing. E. h. Fritz Emde, Techn. Hochschule, Stuttgart.

Bisher erschienene Hefte der „Sammlung Vieweg“

- Heft 1. Dr. Robert Pohl und Dr. P. Pringsheim-Berlin: *Die lichtelektrischen Erscheinungen.* Mit 36 Abbildungen. Vergriffen.
- Heft 2. Dr. C. Freiherr von Girsewald-Berlin-Halensee: *Peroxyde und Persalze.* M. 2,50.
- Heft 3. Diplomingenieur Paul Béjeuhr-Charlottenburg: *Der Blériot-Flugapparat und seine Benutzung durch Pégoud vom Standpunkte des Ingenieurs.* Mit 26 Abbildungen. M. 2,—.
- Heft 4. Dr. Stanislaw Loria-Krakau: *Die Lichtbrechung in Gasen als physikal. und chem. Problem.* Mit 3 Abbild. und 1 Tafel. M. 3,—.
- Heft 5. Professor Dr. A. Gockel-Freiburg i. d. Schweiz: *Die Radioaktivität von Boden und Quellen.* Mit 10 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 6. Ingenieur D. Sidersky-Paris: *Brennereifragen: Kontinuierliche Gärung der Rübensäfte. — Kontinuierliche Destillation und Rektifikation.* Mit 24 Abbildungen. M. 2,—.
- Heft 7. Hofrat Professor Dr. Ed. Donath und Dr. A. Gröger-Brünn: *Die flüssigen Brennstoffe, ihre Bedeutung und Beschaffung.* Mit 1 Abbildung. M. 2,50.
- Heft 8. Geh. Reg.-Rat Professor Dr. Max B. Weinstein-Berlin: *Kräfte und Spannungen. Das Gravitations- und Strahlentfeld.* M. 2,—.
- Heft 9/10. Geh. Reg.-Rat Professor Dr. O. Lummer-Breslau. *Verflüssigung der Kohle und Herstellung der Sonnentemperatur.* Mit 50 Abbildungen. M. 5,—.
- Heft 11. Dr. E. Przybyllok: *Polhöhen-Schwankungen.* Mit 8 Abbildungen. M. 2,—.
- Heft 12. Professor Dr. Albert Opper-Halle a. S.: *Gewebekulturen und Gewebepflege im Explantat.* Mit 32 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 13. Dr. Wilhelm Foerster-Berlin: *Kalenderwesen und Kalenderreform.* M. 1,50.
- Heft 14. Dr. O. Zoth-Graz: *Über die Natur der Mischfarben auf Grund der Undulationshypothese.* Mit 3 Textfiguren und 10 Kurventafeln. M. 3,—.
- Heft 15. Dr. Siegfried Valentiner-Clausthal: *Die Grundlagen der Quantentheorie in elementarer Darstellung.* 3. erweiterte Aufl. Mit 8 Abbild. M. 4,—.

Fortsetzung siehe 3. und 4. Umschlagseite

Metallröntgenröhren

(Wirkungsweise · Anlage · Betrieb)

von

Dr.-Ing. Karl Becker und Fritz Ebert
Berlin-Steglitz

Mit 34 Abbildungen



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Herausgeber dieses Heftes:
Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. Dr.-Ing. e. h. K. Scheel. Berlin

ISBN 978-3-663-01063-0 ISBN 978-3-663-02976-2 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-663-02976-2

Alle Rechte vorbehalten

Vorwort.

Nachdem vor einiger Zeit in dieser Sammlung ein Heft¹⁾ erschienen war, welches die Fragestellungen der Röntgenspektroanalyse und Kristallstrukturanalyse nach der chemischen Seite hin erörtert hatte, soll nun gewissermaßen als Ergänzung dieses neuen Heft die experimentelle und praktische Seite dieses Arbeitsgebietes beleuchten. Von dem Zeitpunkt an, von welchem die Röntgenstrahlen durch Vergrößerung ihrer Anwendungsmöglichkeit ein Hilfsmittel zur Klärung chemischer, mineralogischer, metallographischer, physikalischer und auch biologischer Fragen geworden sind, ging natürlich auch eine stetige Anpassung der apparativen Anlage, und vor allem der Röntgenröhren selbst, an das neue Arbeitsgebiet vor sich. Es wurden im Laufe der Zeit eine Anzahl Röhrentypen konstruiert, deren Körper ganz aus Metall besteht. Natürlich bedingt eine solche Röhre andere Betriebsmaßnahmen als eine Röntgenröhre aus Glas, wie sie heute allgemein in der Medizin Verwendung finden. Bei dem Vorteil der größeren Betriebssicherheit und der Möglichkeit, größere Stromstärken verwenden zu können, haben die Metallröhren den Nachteil, die dauernde Anwesenheit eines Pumpenaggregats zu bedingen, welches während des Betriebes der Röhre an diese angeschlossen ist und dauernd im Gange sein muß. Dies ist wohl ein Grund, weshalb die Metallröntgenröhren bisher noch nicht die Grenzen jener Anwendungsgebiete überschritten haben, für welche sie speziell konstruiert sind, und weshalb sie bisher noch keinen Eingang in die Medizin gefunden haben. Trotzdem erscheint es nicht undenkbar, daß Metallröntgenröhren mit mittlerer Spannung und hoher Stromstärke einmal für Therapie-zwecke von Bedeutung sein können.

Im vorliegenden Heft ist ein kurzer Abriss einer Anzahl von Metallröntgenröhrentypen, ihre Wirkungsweise, Laboratoriumsanlage

¹⁾ Karl B. Körber, Die Röntgenstrahlen als Hilfsmittel der chemischen Forschung (Sammlung Vieweg, Heft 73). 1924.

und Betriebsführung gegeben. Auch auf eine Anzahl von Kunstgriffen bei der Bedienung einer solchen Anlage ist aufmerksam gemacht, die wir in langjährigen Laboratoriumserfahrungen gesammelt haben. Im Vorwort des vorangegangenen Heftes¹⁾ war die Vermutung ausgesprochen worden, daß vielleicht die Zeit nicht mehr fern ist, wo jedes chemische Laboratorium eine Röntgenanlage besitzen wird wie heute einen Spektralapparat. Dieses neue Heft soll nun dazu dienen, bei der Auswahl und Anlage einer Röntgenapparatur mit Metallröhren die gesammelten praktischen Erfahrungen verwerten zu helfen. Unser Wunsch ist es, daß auch die experimentelle Seite dieses Arbeitsgebietes sich erweitern und immer mehr vervollständigen möge. Denn am Anfang jeder naturwissenschaftlichen Forschung steht stets der Versuch.

Der Studiengesellschaft für elektrische Beleuchtung (Osramkonzern) danken wir für die Erlaubnis, die Photographien aus ihrem Röntgenlaboratorium zum Abdruck zu bringen. Frau Dipl.-Ing. Herta Becker-Rose danken wir ebenfalls herzlichst für ihre Hilfe beim Korrekturlesen.

Berlin, im November 1924.

Karl Becker. Fritz Ebert.

¹⁾ Siehe Anmerkung auf voriger Seite.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Einleitung. Wesen der Röntgenstrahlen. Anwendung der Röntgenstrahlen für chemische, physikalische und technische Untersuchungen. Prinzipien der Röntgenröhren. Anforderungen an Röntgenröhren für chemische und physikalische Versuche	1— 7
II. Betrieb mit Metallröntgenröhren	7—46
a) Hochspannungsanlage. Nadelschalter, Ventilgleichrichter, Röntgenröhren als Gleichrichter	7
b) Typen von Metallröntgenröhren. 1. Ionenröhren. 2. Glühkathodenröhren (kreisförmiger Brennfleck, strichförmiger Brennfleck). Eignung der Typen für Kristallgitteraufnahmen und für spektralanalytische Aufnahmen. Optimale Belastung	17
c) Hochspannungsmessungen	27
d) Vakuumanlage	31
e) Kühlanlage	36
f) Kunstgriffe. 1. Verkitten. 2. Fenstermaterial. 3. Antikathodenmaterial. 4. Kathodenzentrierung. 5. Auswechslung und Reinigung. 6. Vakuumregulierung. 7. Verschiedenes	40
III. Optimale Ausnutzung der Röntgenstrahlenintensität und Belichtungszeit. Intensitätsverteilung der Strahlung. Kristalle. Blenden. Filme, Ionisationskammer, Fluoreszenzschirm. Präparatdicke	47—54
IV. Laboratoriumseinrichtung. Schutzmaßnahmen .	55—59
Namen- und Sachregister	60—62

I. Einleitung.

Röntgenstrahlen sind kurzwellige elektromagnetische Schwingungen, welche, anschließend an die kürzesten ultravioletten Strahlen, das Gebiet bis etwa $0,05 \text{ \AA}$ umfassen. Freilich ist für praktische Versuche das anzuwendende Wellenlängegebiet kleiner und wir können es rein empirisch einteilen in ein Gebiet von $0,1$ bis $1,2 \text{ \AA}$ und von $1,2$ bis 12 \AA . Die Grenze von $1,2 \text{ \AA}$ ist dadurch gegeben, daß gewöhnliches Hartglas, aus welchem die medizinischen Therapie- und Diagnostikröhren meistens gebaut werden, längere Wellen nicht mehr durchläßt. Sie werden fast vollständig absorbiert. Längere Wellen als 12 \AA sind nach den Methoden der direkten Wellenlängenmessung nicht mehr nachweisbar. Auch werden sie von Luft leicht absorbiert und können nur mittels indirekter lichtelektrischer Methoden erzeugt und nachgewiesen werden.

Ein Röntgenstrahl entsteht, wenn ein Elektronenstrom, das ist ein Kathodenstrahl, gebremst wird. Je größer die Geschwindigkeit dieses Kathodenstrahls ist, desto härter, d. h. kurzwelliger ist die durch Bremsung erzeugte Röntgenstrahlung. Trifft ein von der Kathode ausgehender Elektronenstrom auf die Anode (Anti-Kathode) mit mehr oder minder großer Geschwindigkeit auf, so zeigen sich zwei voneinander verschiedene Erscheinungen.

Einmal löst der gebremste Elektronenstrom eine Impulsstrahlung aus. Diese besitzt ein kontinuierliches Spektrum, dessen Intensitätsmaximum eine Funktion der Ordnungszahl des Elements ist, aus welchem die Antikathode besteht und dessen kurzwelliges Ende eine Funktion der Geschwindigkeit des Elektronenstroms, mithin der Betriebsspannung der Röhre ist. Nach der Einsteinschen Beziehung ist die Frequenz ν der Minimumwellenlänge durch die Gleichung

$$eV = h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \text{ gegeben, wo } e \text{ die Ladung eines Elektrons, } V \text{ die}$$

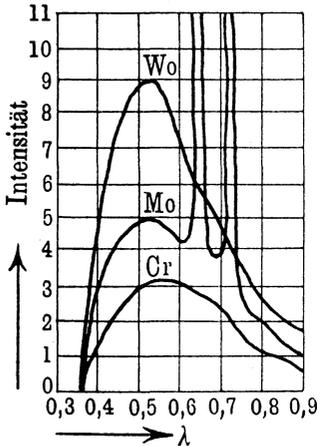
Anregungsspannung und h die Plancksche Konstante ist. Setzt man die Zahlen für c , e und h ein, so vereinfacht sich die Gleichung für den praktischen Gebrauch zu $\lambda V = 12,3$, wenn man λ in Ångströmeinheiten, V in Kilovolt ausdrückt. Die Lage des kurzwelligen

Endes des kontinuierlichen Spektrums ist von dem Antikathodenmaterial unabhängig. Dagegen ist die Intensität der Strahlung desto größer, je höher die Ordnungszahl des Elements ist, aus dem die Antikathode besteht. In Fig. 1 ist die Abhängigkeit der Strahlungsintensität der Bremsstrahlung von der Ordnungszahl der Antikathode bei 35 000 Volt Anregungsspannung dargestellt¹⁾. Die zugehörigen Zahlen sind in folgender Tabelle angegeben:

Antikathode	Atomgewicht	Ordnungszahl	Integral der Strahlungskurve	Intensitätsmaximum
Pt.	195,2	78	100,0	100,0
W.	184,0	74	90,0	89,9
Pd	106,7	46	60,3	58,6
Mo	96,0	42	54,3	50,1
Ni.	58,7	28	45,7	43,7
Cr.	52,0	24	34,6	33,9

Die Zahlen der 4. und 5. Reihe beziehen sich auf relative Einheiten.

Fig. 1.



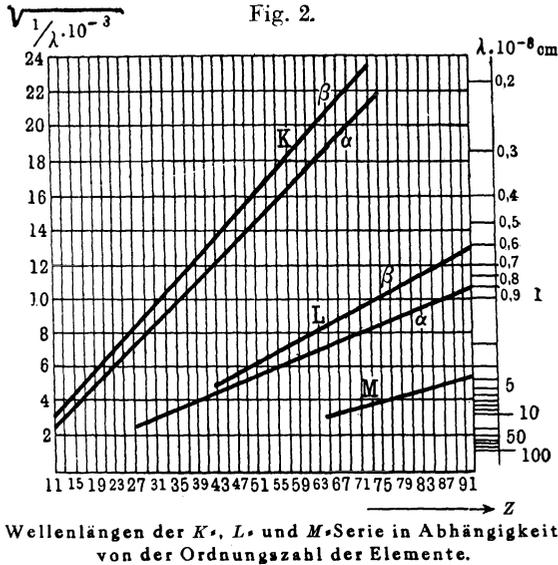
Abhängigkeit der Bremsstrahlungsintensität von der Antikathode. (Die Maxima bei Mo rühren von der Eigenstrahlung her.)

Weiter emittiert aber die Antikathode noch eine Eigenstrahlung, welche ein Linienspektrum besitzt und dessen Frequenzen lediglich eine Funktion der Ordnungszahl des Antikathodenmaterials sind. Die Anregungsspannung der einzelnen Serien dieses Linienspektrums ist wie die Minimumwellenlänge des kontinuierlichen Spektrums ebenfalls durch die Einsteinsche Beziehung gegeben. In den Fig. 1 und 2 ist die Abhängigkeit des Intensitätsmaximums der Bremsstrahlung sowie die Unabhängigkeit der Minimumwellenlänge bei konstanter Spannung und die Abhängigkeit der Eigenfrequenz von der Ordnungszahl des Elements, aus dem die Antikathode besteht, graphisch dargestellt.

Man hat es somit in der Hand, durch geeignete Wahl der Antikathode und Betriebsspannung einer Röntgenröhre eine Strahlung

¹⁾ Ullrey, Phys. Rev. 11, 401 (1918).

von ganz bestimmter Wellenlänge und Intensität zu erzeugen. Nun hatte sich seit der Laueschen Entdeckung der Interferenzerscheinungen von Röntgenstrahlen durch Kristalle eine weite Anwendungsmöglichkeit der Röntgenstrahlen für chemische und physikalische, ja auch für biologische Probleme ergeben. Alle diese Anwendungsmöglichkeiten beruhen auf dem Prinzip, ein Röntgenstrahlenbündel an einem Kristallgitter abzubeugen und, je nachdem ob das Gitter



unbekannt und die Wellenlänge bekannt ist oder umgekehrt, aus der Art der Interferenzerscheinung Rückschlüsse auf das Kristallgitter oder auf das primäre Röntgenstrahlenbündel zu ziehen.

Es haben sich dann im Laufe des letzten Jahrzehnts folgende Anwendungsmöglichkeiten ergeben¹⁾:

1. Röntgenspektroskopie und Spektralanalyse.
2. Kristallgitterbestimmung,
3. Teilchengrößenbestimmung,
4. Bestimmung von Kristalldeformationen durch mechanische und thermische Einflüsse.

Dazu kommt noch als 5. Punkt die Anwendungsmöglichkeit einer technischen Strahlendiagnostik für Materialprüfungszwecke. Diese

¹⁾ Vgl. Becker, Die Röntgenstrahlen als Hilfsmittel für die chemische Forschung. Sammlung Vieweg, Bd. 73, 1924.

beruht jedoch im Gegensatz zu den von 1 bis 4 angeführten Punkten nicht darauf, Röntgenstrahlen zur Interferenz zu bringen, sondern wie auch die medizinische Strahlendiagnostik, auf dem Prinzip, Inhomogenitäten in dem zu durchleuchtenden Objekt mit Hilfe der verschieden starken Absorption von Einschlüssen, Rissen, Hohlräumen usw. nachzuweisen. Für diese Strahlendiagnostik kommen allgemein Röhren zur Verwendung, welche eine möglichst harte durchdringende Strahlung aussenden. Ob in dieser das kontinuierliche oder Linienspektrum vorherrscht, ist gleichgültig. So kann man für diese Zwecke jene Röhrentypen verwenden, welche man auch in der Medizin als Diagnostikröhren verwendet.

Ganz andere Anforderungen stellt man jedoch an Röntgenröhren, welche für die unter 1 bis 4 angeführten Zwecke brauchbar sein sollen. Wie erwähnt, besteht die Wirkungsweise einer Röntgenröhre darin, primär einen Kathodenstrahl zu erzeugen und diesen mit einer bestimmten Geschwindigkeit auf die Anode aufprallen zu lassen. Den Kathodenstrahl kann man erzeugen:

1. durch Gasentladung,
2. „ Thermoionen,
3. „ Photoelektronen.

Für praktischen Röntgenbetrieb bei höheren Spannungen kommt Punkt 3 nicht in Frage.

Bei Gasentladungsröhren werden durch die angelegte Spannung die Gasmoleküle ionisiert und die positiven Ionen von der aufgeladenen Kathode angezogen. Durch ihren Aufprall erzeugen sie den eigentlichen Kathodenstrahl, welcher je nach der angelegten Spannung mit mehr oder minder großer Geschwindigkeit auf die Anode auftrifft. Der optimale Gasdruck in solchen Ionenröhren beträgt für Luft nach Siegbahn¹⁾ 11,6 bis $4,2 \cdot 10^{-3}$ mm. Für Wasserstoff und Helium ist er etwas größer, für Sauerstoff und Kohlensäure etwas kleiner, für Argon annähernd gleich. Doch liegt er für alle die genannten Gase in der gleichen Größenordnung.

Bei den Thermoionenröhren wird der Elektronenstrom durch Emission einer Glühkathode erzeugt (Coolidgeöhren). Aus diesem Grunde ist in diesem Falle das höchst erreichbare Vakuum anzustreben, denn eine Gasentladung darf unter keinen Umständen mehr stattfinden. Auch greifen geringe Spuren von Sauerstoff oder Wasserdampf die Glühkathode außerordentlich leicht an.

¹⁾ Siegbahn, Spektroskopie der Röntgenstrahlen. J. Springer, 1924.

Das bei den Lilienfeldröhren angewendete Prinzip der Autoelektronenemission ist bei Metallröhren nicht anwendbar.

Die Energie des gebremsten Kathodenstrahls wird nur zum geringsten Teil in Röntgenstrahlenenergie umgesetzt. Die Hauptmenge der Energie geht als Wärmeenergie nutzlos verloren. Aus diesem Grunde ist bei den Metallröhren für eine gute Kühlung der Antikathode Sorge zu tragen. Denn es können bei hoher Belastung und Stromstärke trotz sehr guter Wasserkühlung der Antikathode bei spektralanalytischen Versuchen, wo das zu untersuchende Pulver auf eine Metallantikathode aufgerieben wird und infolgedessen die Kühlung nicht so intensiv ist wie bei der kompakten Metallantikathode, Temperaturen über 1500° mit Leichtigkeit erzielt werden. Denn bei hoher Geschwindigkeit und Stromstärke des Kathodenstrahls wirkt die Röhre als Kathodenstrahlenofen.

Im Gegensatz zu einem medizinischen Röntgenbetrieb kommt es nun bei chemisch-physikalischen Röntgenuntersuchungen vor allem darauf an, definierte Wellenlängen zu erzeugen. Es wird hierbei durchweg mit längeren Wellen von etwa 0,5 bis 6,0 Å gearbeitet, welche eine Anregungsspannung von 25000 bis 2000 Volt benötigen. Bei Versuchen mit monochromatischer Strahlung wählt man zu diesem Zweck eine Antikathode aus dem Metall, dessen Eigenstrahlung in dem gewünschten Wellenlängenbereich liegt. Bei Versuchen mit Bremsstrahlung erweist sich am brauchbarsten eine Antikathode aus einem sehr hochatomigen Metall, da hier die Intensitätsausbeute größer ist als bei niedrigatomigen Elementen (vgl. Fig. 1). In Betracht kommen schwer schmelzende Metalle, wie Pt und W.

Da man zudem manche Kristallgitteraufnahmen und spektralanalytische Versuche, bei welchen es sich eventuell um den Nachweis von Elementen handelt, welche in nur geringer Menge vorhanden sind, genügend lange Zeit ausdehnen muß, ergeben sich folgende hauptsächlichsten Anforderungen, welche man bei derartigen Versuchen an eine Röntgenröhre stellen muß:

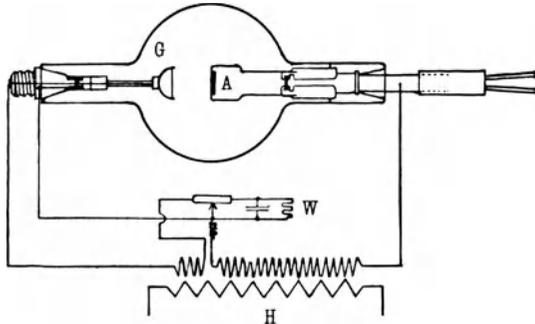
1. Maximale Strahlenausbeute und Durchlässigkeit der längsten, direkt meßbaren Wellen,
2. Belastung mit hoher Spannung und Stromstärke, um hohe Intensitäten zu erzielen,
3. Möglichkeit eines ausgedehnten Dauerbetriebs,
4. Möglichkeit eines raschen Auswechselns der Antikathoden,
5. rasches Wiederinstandsetzen bei Betriebsstörungen.

Dagegen ist, wenigstens bei monochromatischen Versuchen, nicht unbedingt erforderlich:

1. Höhere Spannung als 70000 Volt (Anregungsgrenze der K-Serie des Wolframs),
2. absolute Konstanz der Spannung.

Aus den gestellten Bedingungen ergibt sich, daß Glasröhren schon deshalb nicht zu verwenden sind, weil Glas längere Strahlen als $1,2 \text{ \AA}$ zu stark absorbiert. Aber auch ein leichtes Auswechseln der Antikathode oder anderer Teile ist hier nicht möglich, so daß in den letzten Jahren im Laboratorium Röhrentypen zur Verwendung kamen, welche, abweichend von den Konstruktionen der medizinischen Therapie- und Diagnostikröhren, besonders für Laboratoriumszwecke

Fig. 3.



Röntgenröhre der General Electrical Company mit selbsttätiger Heizungsregulierung. (Die Glühkathode dient gleichzeitig als Hochspannungsgleichrichter, vgl. S. 17.)

A wassergekühlte Antikathode, *G* Glühkathode, *H* Hochspannungstransformator, *W* selbsttätiger Heizungsregulierwiderstand.

Universalröhren darstellen. Im Prinzip bestehen sie alle darin, daß die Kathode oder Anode direkt mit dem Metallkörper der Röhre verbunden ist und der Gegenpol durch eine Hochspannungsisolierung in die Röhre eingeführt wird. Eine solche Metallröhre besteht allgemein aus drei oder vier einzelnen Teilen, welche leicht zusammengefügt und hochvakuumdicht verkittet werden können. Freilich ist zur dauernden Vakuumregulierung notwendig, daß ein Pumpenaggregat an die Röhre angeschlossen ist, um den Druck konstant zu halten. Und das letztere ist wohl der Grund, weshalb solche leicht zu handhabenden Universalröhren in der Strahlentherapie noch keinen Eingang gefunden haben.

Dagegen haben sie heute im Laboratorium Glasröhren fast vollkommen verdrängt, soweit man die letzteren nicht für spezielle sehr harte Strahlung bei möglichst konstanter Spannung, wie z. B. bei Laueaufnahmen, braucht. Nur in Fällen, wo man sich den etwas einfacheren Betrieb von Glasröhren mit Mo- (seltener Rh-)Antikathoden (0,708 bzw. 0,652 Å) bei Kristallgitteraufnahmen auf Kosten der Belichtungszeit leisten kann (bis 60 Stunden), finden solche Spezialröhren Verwendung. In Fig. 3 ist eine solche Röhre abgebildet, wie sie im Versuchslaboratorium der General Electric Comp. bei 30000 Volt und 30 Milliamp. im Dauerbetrieb verwendet wird¹⁾. Doch wird man allgemein den Glasröhren nicht solche hohen Stromstärken zumuten können.

II. Betrieb mit Metallröhren.

a) Hochspannungsanlage.

Die Grundbedingung für einen einwandfreien Betrieb mit Metallröhren ist das Vorhandensein einer geeigneten Apparatur, die sämtlichen Anforderungen eines Dauerbetriebes genügen muß.

Ein kurzer Blick auf die im Prinzip möglichen Hochspannungsquellen, wie Induktoren oder Transformatoren, Gleichstromdynamomaschinen, Akkumulatoren und Influenzmaschinen, läßt die letztgenannten aus technischen Gründen für unseren Zweck ungeeignet erscheinen. Bei den Gleichstromdynamomaschinen liegt die erreichbare Spannungsgrenze noch weit unterhalb der nötigen Betriebsspannung und eine Hintereinanderschaltung mehrerer Dynamos erfordert eine derartig umfangreiche Anlage, deren Anschaffungs- und Betriebskosten in keinem Verhältnis zur tatsächlich benötigten Energie stehen. Ebenso würde eine leistungsfähige Akkumulatoren-batterie die gleichen Anforderungen an Unterbringungsraum und unnatürlich hohe Kosten stellen. Ganz spezielle Zwecke angenommen, wie etwa exakte Spannungsmessungen, welche nur durch Aneinanderschaltung von Akkumulatorenbatterien möglich sind, um z. B. die Einsteinsche Fundamentalgleichung $eV = h\nu$ nachzuprüfen, wird man diese Hochspannungsquelle bei kontinuierlichem Röntgenbetrieb tunlichst vermeiden. Influenzmaschinen geben nur eine verhältnismäßig geringe Ausbeute an Energie und kommen daher nicht in Frage.

¹⁾ Davey, General Electric Review 25, 565 (1922).

Somit bleibt für die praktische Durchführung nur die Verwendung von Wechselstromtransformatoren übrig. Die dadurch erforderliche Gleichrichtung des hochgespannten Wechselstroms fällt gegenüber den genannten Mängeln bei Verwendung anderer Hochspannungsquellen nicht ins Gewicht.

In der Regel trifft man in jeder elektrischen Anlage von vornherein Vorkehrungen, die es ermöglichen, stärkere Belastungen ohne Schädigung der Speise- und sonstigen Zuleitungen vornehmen zu können. Ferner, um nicht bei Hinzunahme einer neuen Apparatur durch Verstärkung der Speiseleitungen oder sonstigen Umbauten unnötige Verzögerungen in Kauf nehmen zu müssen, empfiehlt es sich, bei einer Neueinrichtung eines Röntgenlaboratoriums alle vorkommenden Möglichkeiten zu berücksichtigen. Speiseleitungen von etwa 60 Amp. Dauerbelastungsmöglichkeit sind daher anzustreben. Das gleiche gilt für die Sicherungs- und sonstigen Schaltanlagen.

Die handelsüblichen Schaltanlagen für medizinische Zwecke werden ohne spezielle Umschaltungen, Verstärkungen usw. kaum den Anforderungen genügen. Meist sucht man bei medizinischen Apparaturen möglichst hohe Spannungen erreichen zu können, legt jedoch weniger Wert auf hohe Stromstärken. Die optimale Spannung für Metallröhren mit monochromatischer Cu- oder Mo-Strahlung dagegen liegt bei 40 kV, die Höchstleistung bei 80 kV. Es liegt daher nicht im Vordergrund des Interesses, eine Anlage zu besitzen, die Spannungen bis zur höchstmöglichen Grenze zu erzeugen vermag, sofern man nicht auch einen Betrieb mit harter Bremsstrahlung für Materialprüfungen, Laueaufnahmen, je nach der Umgrenzung des Arbeitsgebietes des Laboratoriums, für notwendig erachten muß. Die Leistungsfähigkeit einer Metallröhre ergibt sich nach erreichter optimaler Spannung lediglich aus der erreichbaren Milliampereszahl. Durchschnittlich belastet man eine Metallröhre vom Haddingtypus mit 20 bis 30 Milliamp. Metallröhren geeigneter Konstruktion mit Glühkathoden gestatten auch Belastungen bis zu 200 Milliamp. Eine Anlage, die diese enormen Stromstärken hergeben soll, erfordert jedoch sehr leistungsfähige Transformatoren und Gleichrichter.

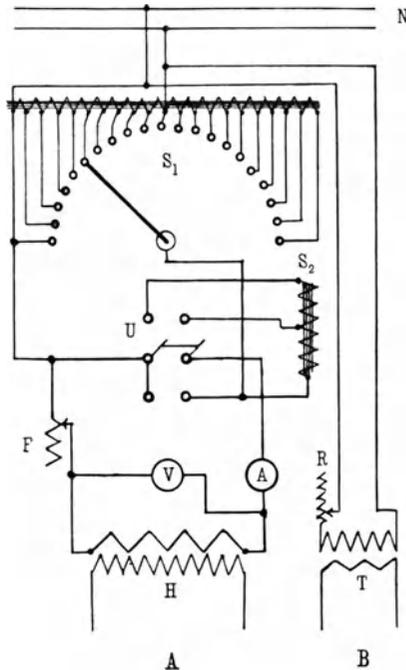
Eine Schaltungsskizze für die Umformung der Netzspannung in die variable Betriebsspannung des Hochspannungstransformators ist in Fig. 4 angegeben. Die Umformung des hochgespannten Wechselstroms in Gleichstrom wird in einem besonderen Abschnitt behandelt werden. Daß man aus ökonomischen Gründen sogenannte „Spartransformatoren“ zur Erreichung der Primärspannung der Hoch-

spannungstransformatoren (etwa 30 bis 50 Volt, Übersetzungsverhältnis in der Regel 1:1000) an Stelle von Regulier- und Vorschaltwiderständen verwenden wird, ergibt sich von selbst. Erweist sich ein einziger Spartransformator für die Grobregulierung als ungeeignet, sei es, daß er nur mäßig belastet werden darf oder die Netzspannung nicht genug herabtransformiert, so beseitigt diese Übelstände ein weiterer Spartransformator (Übersetzungsverhältnis 1:2), der, wie aus der Figur ersichtlich ist, beliebig hinzugeschaltet werden kann.

Eine einfache Überschlagsrechnung zeigt, wie man ohne beträchtliche Energieverluste, wie sie etwa Regulierwiderstände durch ihre Wärmeabgabe verursachen, sich die Faktoren so wählen kann, daß die Stromentnahme rationell vor sich geht. In der angegebenen Schaltungsart kann man die Regulierung des Primärstroms so durchführen, daß es möglich ist, Spannungen zwischen 5 und 300 Volt bei jeder beliebigen Stromstärke (bei einem Netzanschluß von 220 Volt) herzustellen.

Zu dieser Hauptanlage *A* tritt für Glühkathodenröhren noch eine besondere Transformatoranlage *B* für den Heizstrom der Glühkathode. Die Netzspannung von 220 Volt wird in 12 Volt Heizspannung für die Glühkathode herabtransformiert. Bei

Fig. 4.



Umformung der Netzspannung in Hochspannung (A) und Glühkathodenheizung (B).

A

N Netzanschluß (220 Volt),

*S*₁ Spartransformator zur Grobregulierung (10 bis 300 Volt),

*S*₂ Spartransformator zur Erzielung hoher Stromstärken (Unterteilung 1:2),

U Umschalter, der den Spartransformator 2 beliebig ein- oder ausschaltet,

F Feinregulierwiderstand,

A Amperemeter,

V Voltmeter,

H Hochspannungstransformator.

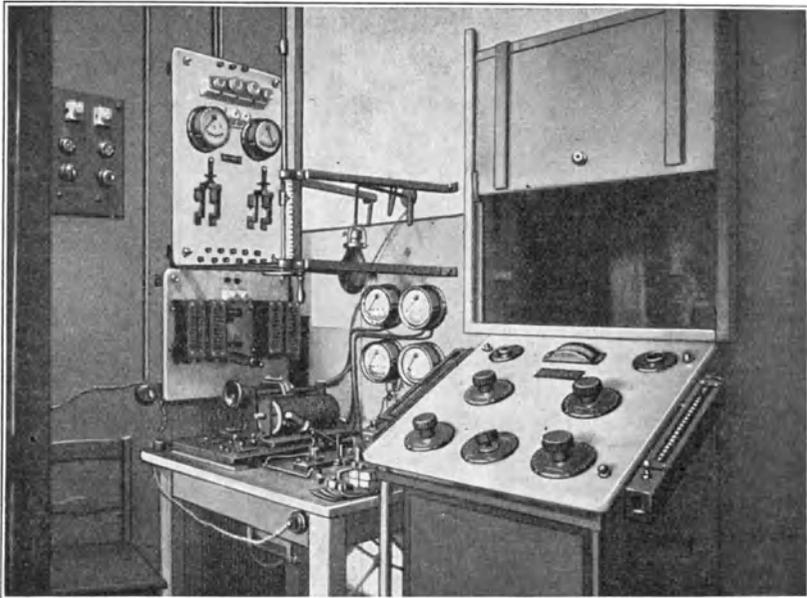
B

R Regulierwiderstand,

T Heiztransformator mit Hochspannungsisolation.

den Heiztransformatoren ist besonders darauf zu achten, daß die Isolation zwischen Primär- und Sekundärwicklung des Heiztransformators auch bei Überspannung der Hochspannung gewachsen ist. Ein Durchschlagen der Isolation kann neben der Unbrauchbarmachung des Transformators auch die übrige Apparatur stark in Mitleidenschaft ziehen, wenn nicht sogar das Bedienungspersonal gefährden. Die Verwendung des von Siemens & Halske in den Handel gebrachten „Pertinax“isulationsmaterials hat sich gegenüber Fiber und Hartgummi, die sich wenig beständig zeigten, sehr gut bewährt.

Fig. 5 a.



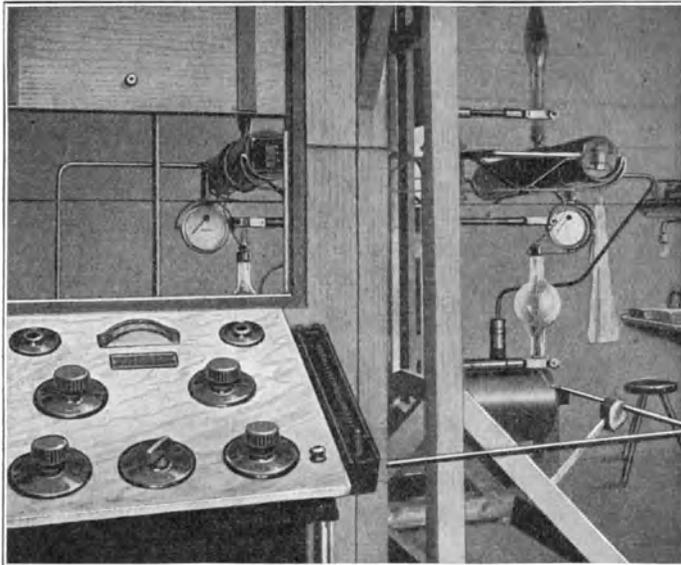
Bedienungsplatz der Schaltanlage.

Man sieht unter der Hauptschaltertafel die vier Regulierwiderstände für die Ventilröhren. Neben dem Schalttisch, der den Stufentransformator, Signallampen, Heizregulierungen für zwei Coolidgeöhren und den Schalter für die Hochspannung enthält, auf dem Nebentisch den Feinregulierwiderstand und Umschalter, darüber den Handgriff für die Parallelfunkenstrecke. An der Wand befinden sich die Meßinstrumente, die bei Verdunklung des Raumes durch eine Glühlampe beleuchtet werden, über dem Schalttisch die verschließbare Beobachtungsluke.

Natürlich könnte auch die Heizung der Glühkathode durch eine isoliert aufgestellte Akkumulatorenbatterie erfolgen, doch wird man hiervon wegen der starken Behinderung in der Reguliermöglichkeit, die besondere Isolationen erfordert, nur wenig Gebrauch machen und die leichte Regulierbarkeit des Primärkreises des Heiztransformators vorziehen.

Die Anforderungen, die an den Hochspannungstransformator zu stellen wären, sind lediglich durch die Höhe der Betriebsspannung und Milliamperezahl der zu verwendenden Röhre gegeben. Ein Öltransformator, dessen Grenzen der Spannungs- und Stromstärke im allgemeinen durch die Betriebsbeanspruchung noch nicht erreicht werden sollen, zeigt Transformatoren mit Luftisolation gegenüber bedeutend höherer Betriebssicherheit. Hierbei hat sich als praktisch herausgestellt, eine Erdung des Kernes des Transformators nicht vorzunehmen, wie dies noch oft durch die hierfür bestimmte Erdungsklemme vorgesehen ist. Eine Durchschlagung von der Primärwicklung

Fig. 5b.



Im Anschluß an Fig. 5a sieht man teils durch die Beobachtungsluke, teils durch die Tür in das Innere des Hochspannungsraumes. Am Holzgestell sind die zylindrischen Heiztransformatoren für die Ventilröhren eingehängt, an den Halteklammern befinden sich die Ventilröhre und die zugehörigen Amperemeter. Im Hintergrunde ist der eine der beiden Hochspannungstransformatoren sichtbar sowie die Utensilien einer photographischen Dunkelkammer.

in den geerdeten Kern kann leicht durch die Funkenbildung den Transformator völlig unbrauchbar machen. Es ist daher auch zu empfehlen, geerdete Eisenträger zu vermeiden.

Da es sich im allgemeinen um stationäre Anlagen handeln wird, wird man bestrebt sein, eine gewisse Handlichkeit und Übersicht zu gewinnen, die bei den mehr behelfsmäßigen Anordnungen der Vorlesungs- oder Institutsversuche nicht unbedingt erforderlich ist. Man

wird die Transformatoren, die wohl stets infolge des Umfangs und Gewichts eine besondere Sorgfalt in der Platzwahl erfordern, mit sämtlichen Nebenapparaten, die lebensgefährliche Spannungen führen, in einem besonderen Hochspannungsraum zusammenfassen, der vom Bedienungsplatz vollständig zu übersehen ist.

Vor allem wird man die eigentliche Schaltanlage so übersichtlich und handlich wie möglich gestalten, so daß man mit einem Blick auf die geeignet zusammengefaßten Meßinstrumente den Gang der Anlage sehen und auch in Fällen der Gefahr die nötigen Handgriffe sofort vornehmen kann. Im übrigen ergeben sich die erforderlichen Schutzmaßnahmen (Hochspannungsraum, Signallampen, Selbstausschalter usw.) aus den bestehenden Vorschriften für den Betrieb von Hochspannungsanlagen.

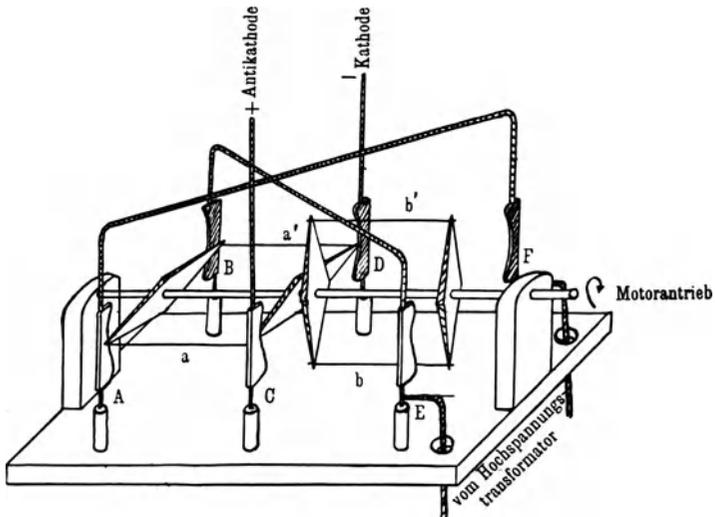
Ein besonderes Augenmerk ist auf die Hochspannungs-Gleichrichter-Anlage zu richten. Da man hier im wesentlichen zwei verschiedene Arten der Gleichrichtung kennt, die Gleichrichtung durch den Nadelschalter und durch Ventilröhren, erhebt sich leicht die Frage, ob eine Art vor der anderen überwiegende Vorteile oder Nachteile bietet, die bei einer Neuanschaffung zu berücksichtigen wären.

Zunächst soll der Nadelschalter besprochen werden. Man versteht unter ihm eine mechanische Anordnung von Kontakten, die auf der Achse eines in Phase synchron laufenden Motors montiert sind, und die Verbindung zwischen den isoliert aufgestellten Segmenten A bis F herstellen, die ihrerseits die Zuleitungen vom Hochspannungstransformator bzw. zu der Röntgenröhre bilden. Die auf der rotierenden Achse befindlichen Kontakte bestehen aus Metallstäben, die durch Hartholzstäbe isoliert befestigt sind, und zwar so, daß das in derselben Ebene befindliche erste Kontaktpaar a, a' mit dem daneben befindlichen Kontaktpaar b, b' , in der Achsenrichtung gesehen, einen rechten Winkel bildet. Angenommen, im Segment A sei die positive, im Segment B die negative Phase vom Transformator T zugeführt und das erste Kontaktpaar a, a' befinde sich in wagerechter Stellung und stelle somit die Verbindung zu den Segmenten C und D her, so wird von C der positive, von D der negative Anteil weitergeleitet. Das zweite Kontaktpaar b, b' steht in der Mitte von CD einerseits und EF andererseits und ist somit stromlos. Durch die zwangsläufige Kupplung des Motors werden, wenn vom Transformator A die negative, B die positive Phase erhält, durch die entsprechende Verbindung der Segmente A und F bzw. B und E untereinander, dann

die Kontaktpaare b, b' nach C den positiven, nach D den negativen Teil überleiten, während die Kontaktpaare a, a' stromlos sind. Somit ist erreicht, daß von C und D ein gleichgerichteter, wenn auch intermittierender Strom fließt, an C wird die Antikathode, an D die Kathode der Röntgenröhre angeschlossen.

Der in der Fig. 6 dargestellte Nadelschalter gestattet die volle Ausnutzung beider Phasenhälften. Einige andere technische Ausführungen begnügen sich nur mit der Hälfte der auszunutzenden

Fig. 6.



Rotierender Nadelgleichrichter.

A, B, C, D, E, F isoliert aufgestellte Kontaktstücke, a, a' und b, b' Kontaktnadeln.

Energie. Die Dimensionierung des Nadelschalters wird dadurch kleiner. Eine Scheibe mit vier im rechten Winkel zueinander befindlichen Kontakten, die entsprechend verbunden sind und ebenfalls synchron rotieren, ersetzt die sonst erforderlichen sechs Kontaktsegmente. Am Prinzip der Gleichrichtung ändert sich nichts.

Die hierbei auftretenden Funkenübergänge verursachen neben einem stark prasselnden Geräusch eine außerordentlich starke Stickoxyd- und Ozonentwicklung. Bei einem Dauerbetrieb machen sich diese Umstände sehr geltend. Diese Unannehmlichkeiten lassen sich am besten dadurch beheben, daß der Gleichrichter in einem gut ventilierbaren Nebenraum aufgestellt wird, und zwar so, daß das Geräusch des Funkenüberganges leise noch hörbar bleibt.

Berücksichtigt man dies, so bietet sich ein großer Vorteil in der Beurteilung des Geräusches beim Funkenübergang, der sogar die Vorteile des weiter unten besprochenen Ventilgleichrichters sehr in Frage stellen kann. Es erfordert keine allzu große Übung, die Unterschiede, die sich durch die Änderung der Spannung, Stromstärke und des Vakuums der Röhre ergeben, bald in allen Feinheiten aus der Tonhöhe des Prasselns erkennen zu können. Auch sonst etwa auftretende Defekte machen sich sofort bemerkbar. Ist z. B. der Zuführungsisolator zur Kathode der Röntgenröhre durchschlagen oder zersprungen — was man meist von außen nicht ohne weiteres feststellen kann, da die napfartige Fortsetzung unmittelbar über dem Kathodenspiegel am meisten gefährdet ist —, so äußert sich dies in einem stark flackernden Geräusch. Ist eine Änderung in der Phase, also ein Polwechsel, eingetreten, so ergibt sich wiederum ein andersgeartetes Geräusch. Kurz, man kann sofort aus der Art und Tonhöhe auf den Defekt schließen und erspart sich ein mühsames Absuchen der Apparatur nach der Fehlerquelle.

Die andere Methode der Gleichrichtung besteht in der Verwendung von sogenannten Ventiltröhren. Man benutzt hierbei den von einer Glühkathode ausgelösten Elektronenstrom zum Transport der in gleicher Richtung fließenden Energie des negativen Stroms, während die umgekehrte Richtung, das ist der positive Anteil des Wechselstroms, zurückgehalten wird. In der Grätzschen Schaltung (Fig. 7) hat man eine Möglichkeit, ebenfalls die gesamte Wechselstromenergie fast restlos, ohne nennenswerte Verluste, in Gleichstrom umzuwandeln.

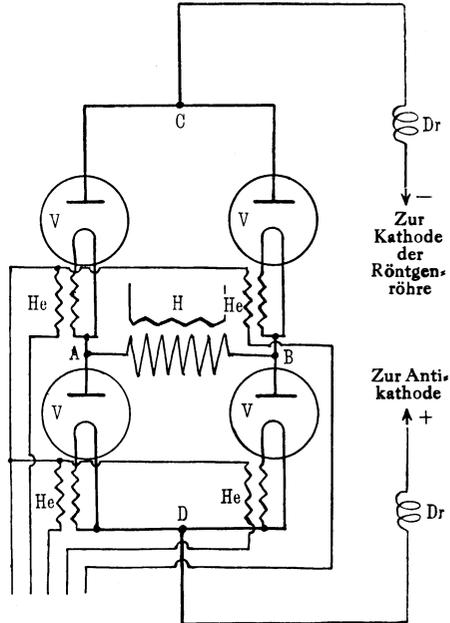
In analoger Weise wie beim Nadelgleichrichter wird der bei *A* und *B* vom Hochspannungstransformator zugeführte Wechselstrom je nach der Richtung durch die Anordnung der Ventile gesteuert. Für die Heizung der Glühfäden der Ventiltröhre verwendet man in ähnlicher Weise wie für die Heizung der Glühkathode einer Röntgenröhre eine Zwischentransformatorenanlage, wie sie in Fig. 7 angedeutet ist. Die Netzspannung wird ebenfalls auf etwa 12 Volt herabtransformiert. Die Heizstromstärke (etwa 5 bis 6 Amp. für jedes Ventilrohr) wird durch einen kleinen Regulierwiderstand eingestellt. Der Glühfaden der Ventiltröhre soll in der Regel noch nicht die volle Weißglut erreichen. Zu schwaches Heizen der Glühkathode macht sich durch Fluoreszenz der Röhren bemerkbar, während zu große Hochspannungsbelastung die Anoden leicht in Rotglut versetzen kann. Die Gefahr des Zerspringens des Glasfußes ist dann sehr

groß, außerdem können, da dann das Ventilrohr wie eine Röntgenröhre wirkt, störende Röntgenstrahlen auftreten.

Die vier Ventilrohre sind so angeordnet, daß sowohl an *A* als auch *B* zwei Ventile, das eine mit der Anode, das andere mit der Kathode, angeschlossen sind. Bei *C* und *D* erfolgt dann die Weiterleitung zur Röntgenröhre, und zwar in der hier angegebenen Anordnung ist *C* die Kathoden-, *D* die Antikathodenzuleitung. Die Anordnung mit vier Ventilröhren bietet gegen eine solche mit nur zwei Röhren den Vorteil, daß die Ventile nur gegen die halbe Wechselspannung liegen und dadurch beträchtlich geschont werden. Eine Verwendung von nur einer Röhre bringt nicht die volle Ausnutzung, wie man dies leicht daraus erkennen kann, daß nur die eine Hälfte der Phase gleichgerichtet, die andere aber unterdrückt wird. In bezug auf Energieausbeute stellen daher der sechsteilige Nadelschalter und die Anordnung mit vier Ventilröhren das Optimum dar.

Daß die Ventilröhren gegenüber dem Nadelschalter vollkommen geräuschlos und ohne Ozonentwicklung arbeiten, bietet eine gewisse äußere Annehmlichkeit. Eine Vervollkommnung ist in letzter Zeit noch dadurch hinzugekommen, daß in der Grätzschen Schaltung durch geeignete Zwischenschaltung von Drosselspulen und Kondensatoren die Spannungsschwankungen fast ausgelöscht werden können und irgendwelche Unterbrechungen des Stromes vollkommen fortfallen.

Fig. 7.



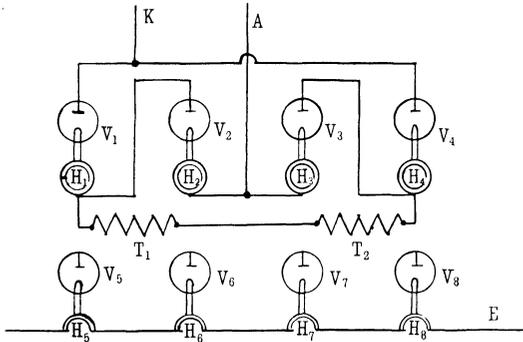
Ventilgleichrichteranordnung
(Graetzsche Schaltung).

- H* Hochspannungstransformator,
- V* Ventilrohre,
- AB* Hochspannungseintritt (vor der Gleichrichtung),
- D* Antikathodenzuleitung,
- C* Kathodenzuleitung,
- He* Heiztransformatoren für die Ventilrohre,
- Dr* Drosselspulen.

Besitzt man eine Anlage, bei der zur Erlangung hoher Spannungen zwei Hochspannungstransformatoren hintereinandergeschaltet sind, so lassen sich diese für den Betrieb mit Metallröhren, für die ein Transformator allein die ausreichende Spannung liefert, unterteilen und zwei getrennte Anlagen schaffen.

Da bei Metallröhren in der Regel die Antikathode geerdet ist, ist für die Heizung der Kathoden derjenigen Ventilröhren, die mit der Kathode gegen Erde liegen, keine besondere gegen Hochspannung isolierte Heiztransformatorenanlage nötig. Besitzt man vier gegen Hochspannung isolierte Heiztransformatoren, die für hohe Spannungen ohne Erdung der Antikathode in der üblichen Grätzschen

Fig. 8.



Erzeugung höchster Spannungen (bis 250 kV)
durch Hintereinanderschaltung der Hochspannungstransformatoren.
Beide Hochspannungspole sind nicht geerdet.

- | | | | |
|-----------------|------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------|
| T_1, T_2 | Hochspannungstransformatoren, | $V_5 \dots V_8$ | Ventilrohre für mittl. Spannungen
(bis 100 kV), |
| $V_1 \dots V_4$ | Ventilrohre für hohe Spannungen
(bis 250 kV), | $H_5 \dots H_8$ | Heiztransformatoren ohne Hochspannungs-
isolation, |
| $H_1 \dots H_4$ | Heiztransformatoren mit Hochspannungs-
isolation, | A | Antikathodenzuleitung, |
| E | Erdung. | K_1, K_2 | Kathodenzuleitung. |

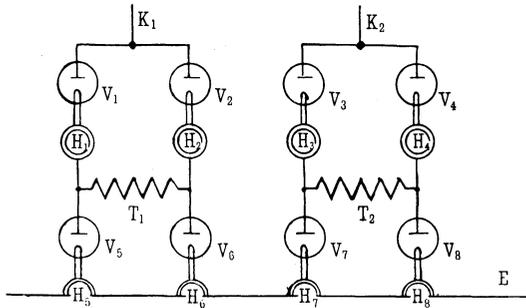
Schaltung Verwendung gefunden haben, so kann man die Unterteilung so vornehmen, daß die auf der Kathodenseite geheizten Ventile diese gegen Hochspannung isolierten Heiztransformatoren erhalten und die übrigen vier Ventile durch eine gewöhnliche nicht gegen Hochspannung isolierte Stromquelle gespeist werden.

Die Fig. 8 und 9 zeigen schematisch die beiden Verwendungsarten. In Fig. 8 (Betrieb einer Röhre bei hoher Spannung ohne Erdung der Antikathode) sind die Ventilrohre V_5 bis V_8 nicht eingeschaltet. Die gegen Hochspannung isolierten Heiztransformatoren sind in beiden Figuren durch doppelte Kreise gekenn-

zeichnet. Fig. 9 (Betrieb mit zwei Metallröhren bei geerdeter Antikathode) zeigt dann, wie die beiden Hochspannungsleitungen für Kathode und Antikathode, die für hohe Spannungen isoliert gegen Erde geführt sind, nun als Kathodenzuleitung für zwei Metallröhren dienen können. Die Rückleitung von der Antikathode erfolgt durch die Erde. Die technische Durchführung erfordert keine großen Anstrengungen und läßt sich unter der Voraussetzung des nötigen Raumes, da man wohl stets 50 cm Luftabstand der Hochspannung führenden Leitungsschienen annehmen muß, ermöglichen.

In Ermanglung jeglicher Gleichrichteranlage kann man sogar die Röntgenröhre, falls man Glühkathodenröhren verwendet, gleichzeitig als Ventilröhre benutzen, wenn man nicht allzu sehr darauf

Fig. 9.



Ausnutzung beider Transformatoren beim Arbeiten mit mittleren Spannungen (bis 100 kV) und geerdeter Antikathode für gleichzeitigen gegenseitig unabhängigen Betrieb von zwei Röntgenröhren.
(Bezeichnung wie in Fig. 8.)

bedacht sein muß, mit der zur Verfügung stehenden Energie haus-
hälterisch umgehen zu müssen. Die Energieausnutzung ist die
gleiche wie bei der Verwendung einer Ventilröhre. Fig. 3 zeigte eine
solche Schaltung ohne Verwendung eines besonderen Gleichrichters,
wie sie im Versuchslaboratorium der General Electric Comp. von
Wheeler Davey verwendet wird.

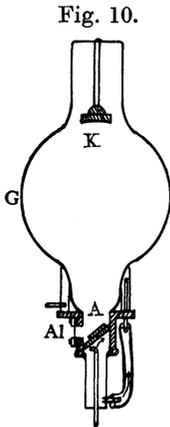
b) Typen von Metallröntgenröhren.

Die ersten Versuche, Metallröntgenröhren, d. h. den Röhren-
körper aus Metall zu bauen, sind in einem engl. Pat. von 1908 von
Lindemann niedergelegt. Später versuchte Zehnder¹⁾ ein brauch-

¹⁾ Zehnder, Ann. d. Phys. 46, 824 (1915).

bares Röhrenmodell für medizinische Zwecke zu konstruieren. Einen Eingang in die Versuchstechnik fanden Röhrentypen mit Metallkörper jedoch erst, als nach 1912 durch die Lauesche Entdeckung die Röntgenstrahlen eine größere und vielseitigere Anwendungsmöglichkeit fanden als bisher.

In Fig. 10 ist die erste brauchbare Ionenröhre von Rausch v. Traubenberg¹⁾ angegeben, mit welcher auch Debye und Scherrer ihre ersten Kristallgitteruntersuchungen mit monochromatischem Licht unternahmen. Die Kathode wird noch in der für Glas-



Röntgenröhre von Rausch v. Traubenberg.

K Kathode,
A wassergekühlte (geerdete) Antikathode,
Al Aluminiumfenster,
G Glaskörper.

röhren üblichen Art eingeführt, während die Antikathode sich in einem an die Glaskugel angekitteten metallischen Zylinder befindet. Die Röntgenstrahlen treten hier nicht durch die Glaswandung aus, sondern durch ein an die Antikathode möglichst nahe herangebrachtes Aluminiumfenster. Man findet hier schon die intensive Antikathodenkühlung, die ja einen der Hauptvorteile der Metallröhren ausmacht. Im übrigen sieht man noch eine starke Anlehnung an die gebräuchlichen Typen der Glasröhren, wie dies die ziemlich große Glaskugel zeigt. Ursprünglich hatte sie wohl den Zweck, infolge der mangelhaften Wärmeableitung der Antikathode ein Zerspringen des Glaskörpers zu vermeiden, hier jedoch hat sie lediglich die Funktion eines Isolators.

Fig. 11 stellt einen anderen Typus der Ionenröhren dar, welcher sowohl für Kristallgitteraufnahmen, als auch wegen seiner leichten Zerlegbarkeit besonders für spektralanalytische Untersuchungen zu brauchen ist. Das Modell wurde zuerst von Hadding²⁾ im Siegbahnschen Laboratorium in Lund ausprobiert und hat dann besonders in Deutschland Eingang gefunden. Im Gegensatz zu der Rausch v. Traubenberg'schen Röhre ist der Körper gänzlich aus Metall und dadurch werden, falls er geerdet wird, störende Raumladungen vermieden. Die Isolatoren, durch welche die Kathode eingeführt wird, werden zweckmäßig von der Berliner Porzellanmanufaktur bezogen, welche dieses Modell herstellt. An Stelle dieser

¹⁾ Rausch v. Traubenberg, Phys. Zeitschr. 18, 241 (1917).

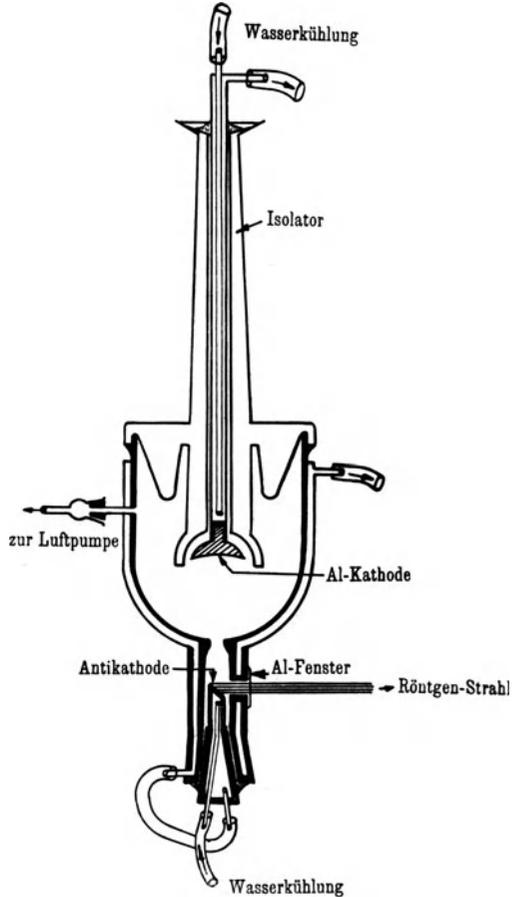
²⁾ Hadding, Zeitschr. f. Phys. 3, 369 (1920).

Porzellanisolatoren kann man natürlich auch ein Quarzgefäß oder, falls man den Bau noch weiter vereinfachen will, eine Flasche nehmen, deren Boden abgesprengt ist. Doch empfiehlt es sich, die Einfachheit der Konstruktion nicht zu weit zu treiben. Nach

Möglichkeit ist der Aluminiumspiegel der Kathode so weit in den Isolator einzusetzen, daß die Kanten des Isolators über die Kanten der Kathode noch hinausragen. Man verlängert dadurch die direkte Verbindung vom Metall der Kathode zum Metall des unter dem Potential der Anode stehenden Röhrenmantels, was die Gefahr einer Lichtbogenbildung bei plötzlichem Undichtwerden der Röhre und der störenden Raumladungen vermindert. In dem ursprünglich von Hadding angegebenen Modell war seitwärts zur Vakuumregulierung ein Palladiumröhrchen angesetzt, welches jedoch als überflüssig fortgelassen werden kann. Es ist möglich, schon lediglich durch die Hahnstellung in den Pumpenleitungen (S. 45) ein genügend gutes und konstantes Vakuum innerhalb der Röhre zu erzielen.

Die Anordnung der Antikathode und der Aluminiumfenster ist im Prinzip die gleiche wie bei der Röhre von Rausch v. Traubenberg. Zur größeren Leistungsfähigkeit beim Arbeiten mit monochromatischem Licht hat sich die Anordnung von drei Fenstern, deren

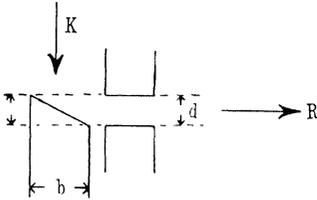
Fig. 11.



Röntgenröhre von Hadding.

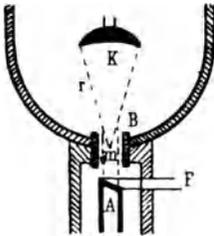
Normalen einen Winkel von 60° (Scheitelpunkt ist der Brennfleck der Antikathode) bilden, am zweckmäßigsten erwiesen. Dadurch, daß

Fig. 12.



Abschrägung der Antikathode der Haddingröhre ($\frac{2}{3}$ der nat. Gr.).
b Breite der Antikathode (12 mm),
d Fensteröffnung (6 mm),
K auffallender Kathodenstrahl,
R austretender Röntgenstrahl.

Fig. 13.



Wahl des Krümmungsradius des Kathodenspiegels der Haddingröhre.

K Kathode,
A Antikathode,
F Aluminiumfenster,
B Blende,
r Krümmungsradius (8 cm),
m Krümmungsmittelpunkt.

Fig. 14.



Abnutzung des Kathodenspiegels (nach etwa 500 Brennstunden).

Die punktierte Linie gibt die ursprüngliche Form an, der gestrichelte Teil zeigt die kraterförmige Vertiefung in der Mitte infolge der Zerstäubung.

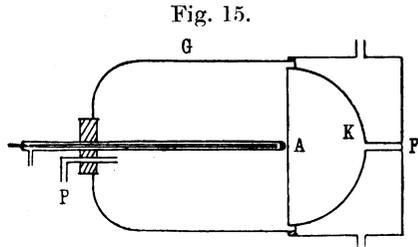
die Normale der Antikathode mit der Achse, die durch Verbindung von Kathodenmittelpunkt und Brennfleck der Antikathode gegeben ist, etwa einen Winkel von 60 bis 70° einschließt, erreicht man auch bei einer geringfügigen Wanderung des Brennflecks an allen drei Fenstern die gleiche Ausbeute. Ein Modell mit sechs Fenstern und wagerechter Antikathode hat sich bei uns nicht gut bewährt, da stets eine ungleiche Intensitätsverteilung an den Fenstern vorlag, so daß wir unter Benutzung einer etwas abgeschrägten Antikathode wieder zur Verwendung von nur drei Fenstern übergingen. Als Maß für die Abschrägung der Antikathode dient der Durchmesser der Fensterkanäle, die bei unseren Röhren 6 mm betragen, so daß stets die ganze Antikathodenfläche auch bei dezentrierter Lage des Brennflecks einen vollkommen ungehinderten Primärstrahl aussenden kann (siehe Fig. 12).

Der Krümmungsmittelpunkt des Kathodenspiegels ist nach unseren Erfahrungen zur Erzielung der bestmöglichen Energieausbeute und eines scharfen Brennflecks so zu wählen, daß er etwa 2 cm oberhalb der Antikathode in der einschneidenden Zylinderblende (siehe Fig. 13) zu liegen kommt. Bei einem Abstände Kathode — Antikathode von 10 cm, wählten wir also einen

Krümmungsradius von 8 cm. Der Kathodenspiegel ist nach einiger Zeit auszuwechseln, da sich an ihm hauptsächlich in der Mitte die

kathodische Zerstäubung sehr stark bemerkbar macht und somit auch die Schärfe des Brennflecks bedeutend nachläßt. In der Fig. 14 zeigt die punktierte Linie die ursprüngliche Form des Spiegels im Querschnitt, der schraffierte Teil die Gestalt nach etwa 500stündiger Benutzung.

Ein noch einfacherer Typus einer Ionenröhre ist in Fig. 15 angegeben, welcher von Gerlach¹⁾ konstruiert wurde. Ihr wesentlicher Vorteil beruht darin, daß die Kathode einen Teil des halbkugelförmigen Röhrenkörpers bildet, und daß die Kathode in Richtung der Antikathode ein Fenster für den Strahlenaustritt trägt. Das hat den Vorteil, die Emission senkrecht zur Antikathodenoberfläche zu entnehmen und auf diese Weise eine rein monochromatische Strahlung zu erzielen. Denn in dieser Richtung ist die Intensität der Impulsstrahlung gleich Null (vgl. S. 47).



Röntgenröhre von Gerlach¹⁾.

- A Wassergekühlte Antikathode,
- K Kathode mit aufgelötetem Kühlmantel,
- G Glasflasche mit abgesprengtem Boden,
- P Pumpenansatz,
- F Aluminiumfenster.

Dieser Röhrentypus verdient insofern eine Beachtung, als sich tatsächlich mit den primitivsten Mitteln eine brauchbare Metallröntgenröhre herstellen läßt. Gerlach verwendet als halbkugelförmige Kathode die eine Hälfte einer Abschlußkugel eines Flaggenmastes, um die er als Kühlgefäß eine Blechbüchse lötete. Als Isolator diente eine gewöhnliche Glasflasche, von der er den Boden abgesprengt hatte. Durch den Hals der Flasche führte er dann den Pumpenansatz und die wassergekühlte Antikathode ein, die aus zwei konzentrischen Röhren mit dem am einen Ende aufgelöteten Antikathodenmaterial ebenso einfach herzustellen ging.

Mehr Konstruktionsvorschläge als von Ionenröhren liegen von Glühkathodenröhren vor. Man kann hier auch eine gewisse Einteilung treffen. Glühkathodenröhren mit punktförmigem (bzw. flächenhaftem) Brennfleck und Glühkathodenröhren mit strichförmigem Brennfleck.

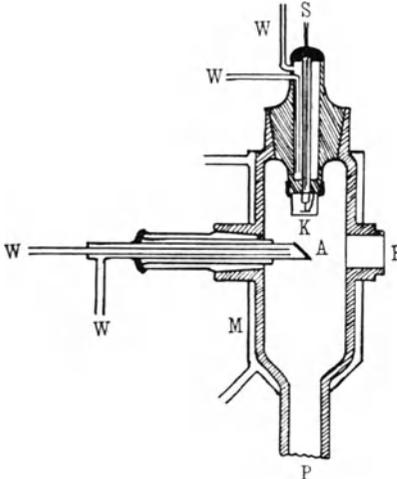
Gegenüber den Ionenröhren haben die Glühkathodenröhren den Vorteil, infolge des um drei Größenordnungen höheren Vakuums mit höheren Spannungen betrieben werden zu können und dabei die

¹⁾ Gerlach, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. (3) 2, 55 (1921).

Möglichkeit, eine konstantere Spannung einhalten zu können. Doch kommt man dabei bei der besten Siegbahnschen Konstruktion nicht über 120000 Volt.

In Fig. 16 ist das erste Siegbahnsche Glühkathodenrohr¹⁾ wiedergegeben. Hier haben wir, wie auch bei den meisten anderen

Fig. 16.



Erste Metallröntgenröhre von Siegbahn¹⁾.

- | | |
|----------------------------------|-----------------------|
| K Kathode, | P Pumpenansatz, |
| A Antikathode, | W Wasserkühlung, |
| M doppelwandiger Metallzylinder, | F Fenster, |
| | S Heizstromzuführung. |

Glühkathodenröhren die Kathode direkt in den Metallkörper eingeführt, so daß sich vor der Ionenröhrenkonstruktion der Unterschied ergibt, daß im ersten Falle der Röhrenmantel unter dem Potential der Anode, im letzten Falle unter dem Potential der Kathode steht. Die Entfernung der isoliert eingeführten Anode braucht bei den Glühkathodenröhren vom Röhrenmantel nicht so groß zu sein wie bei den Ionenröhren, da ja infolge des höheren Vakuums die Möglichkeit einer Lichtbogenbildung viel kleiner ist. Bei dem folgenden Siegbahnschen Modell²⁾ (Fig. 17) mit linienförmigem Brennfleck, ist

diese Entfernung auf 1 cm herabgesetzt. Doch zeigt sie eine typische Schwierigkeit, über die Siegbahn³⁾ selbst schreibt: „*Ein Übelstand dieses Rohres besteht darin, daß zerstreute Kathodenstrahlen in die Antikathodenfassung hineinlaufen und dort absorbierte Dämpfe besonders leicht in der Kittung losschlagen. Neben der dann entstehenden Schwierigkeit, ein genügend hohes Vakuum aufrecht zu erhalten, werden so große Stromstärken erzeugt, daß der Glasschliff infolge der lokalen Erhitzungen leicht zerspringt.*“

Eine andere Konstruktion, welche speziell für spektralanalytische Versuche mit ebenfalls strichförmigem Brennfleck vorgeschlagen ist,

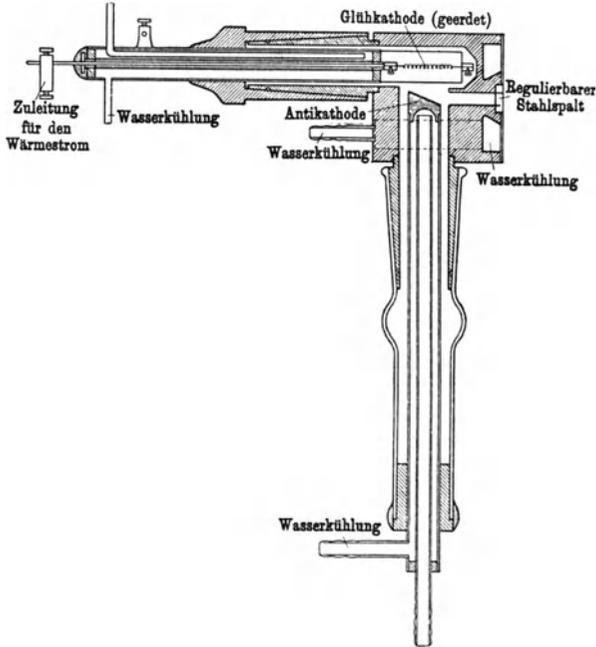
¹⁾ Siegbahn, Ann. d. Phys. 59, 56 (1919).

²⁾ Siegbahn, Zeitschr. f. Phys. 9, 68 (1921).

³⁾ Siegbahn, Spektroskopie der Röntgenstrahlen, S. 44. Berlin, J. Springer, 1924.

rührt von Stintzing¹⁾ her (Fig. 18). Die Eigenart dieses Modells beruht wie das Gerlachsche darauf, daß die Strahlung in Richtung

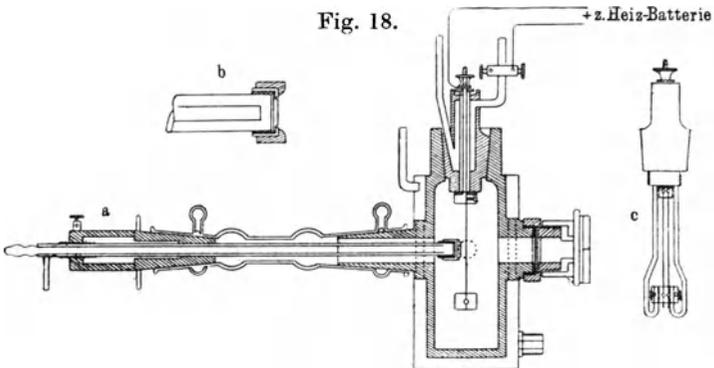
Fig. 17.



Zweite Metallröntgenröhre von Siegbahn.

(Aus Zeitschr. f. Phys., Bd. IX, 1922. Verlag Friedr. Vieweg & Sohn A.G., Braunschweig und Julius Springer, Berlin.)

Fig. 18.



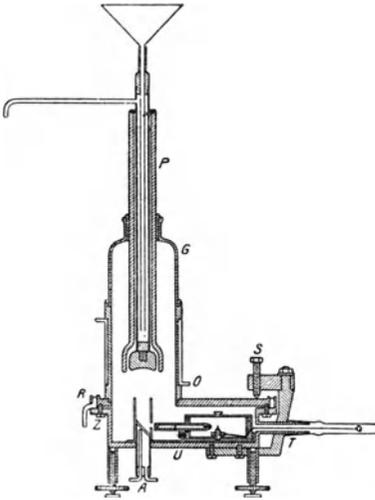
Röntgenröhre von Stintzing¹⁾.

a Gesamtbild, b auswechselbare Antikathode, c Glühkathode.

¹⁾ Stintzing, Zeitschr. f. phys. Chem. 107, 168 (1923).

senkrecht zur Antikathodenoberfläche entnommen wird. Die Konstruktion ist aus der Figur ersichtlich, die Nebenfiguren *b* und *c* geben ein genaueres Bild der Antikathode bzw. Kathode, die beide durch Schliffe in den eigentlichen Röhrenkörper in der für Metallröhren eigentümlichen Form eingeführt werden und eine schnelle und leichte

Fig. 19.



Röntgenröhre von Schleede und Gantzkow mit eingebauter Debye-Scherrer-Drehkamera.

(Aus Zeitschr. f. Phys., Bd. XV, 1923. Verlag Friedr. Vieweg & Sohn A.-G., Braunschweig und Julius Springer, Berlin.)

- A Antikathode,
- F Feinstellschrauben,
- G Glasisolator,
- O oberer Teil mit der Wasserkühlung,
- P Porzellanisolator,
- R Quecksilberdichtung,
- S Spannklammer,
- T Pumpenansatz mit Federantrieb für die Kamera,
- U unterer Teil mit der Debye-Scherrer-Kamera und Röhrenblende,
- Z Zentrierungsschrauben.

ansatz durch einen Glasschliff eingeführt. In den Nebenfiguren treten die Einzelheiten deutlich hervor und zeigen die Verwendung einer stabförmigen bzw. kegelförmigen Drahtspirale als Glühkörper.

Auswechselbarkeit ermöglichen.

Eine Metallröntgenröhre, welche zugleich eine Kamera in ihrem Körper eingebaut enthält, ist von Schleede und Gantzkow¹⁾ (Fig. 19) konstruiert. Diese Anordnung hat den Vorteil, daß die Kamera unter dem Vakuum der Röntgenröhren steht und daß bei dieser Anordnung der Abstand von der Antikathode zum Präparat auf die kleinste mögliche Entfernung herabgesetzt werden kann. Die Drehung des Kristalls erfolgt durch eine Schnur, die mit der Federzugvorrichtung im Innern der Pumpenleitung untergebracht ist. Da hier ein Nachrichten im Röntgenlicht unmöglich ist, erfordert diese Apparatur hohe Anforderungen an die technische und präzisionsmechanische Ausführung.

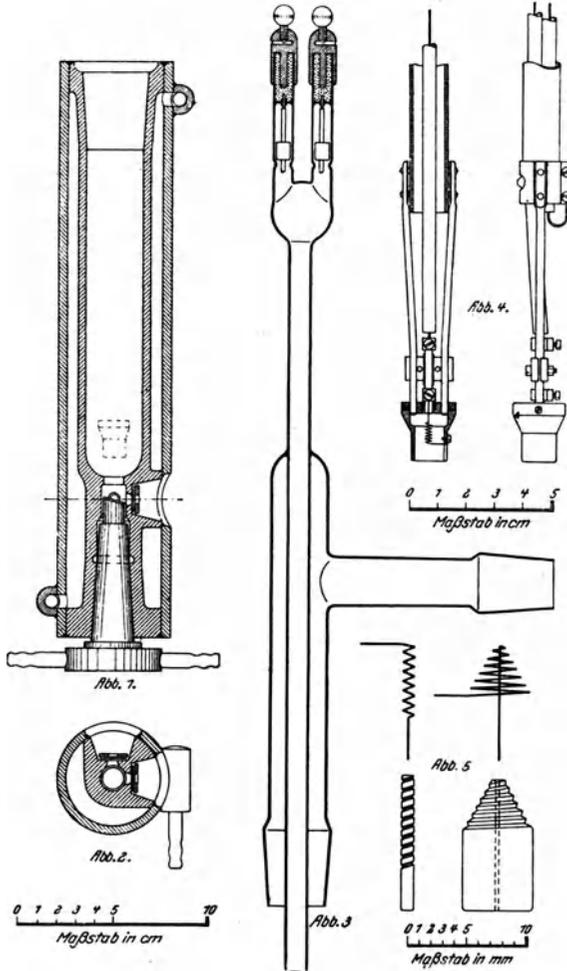
Das von Wever²⁾ konstruierte Modell der in Fig. 20 abgebildeten Glühkathodenröhren zeigt im Prinzip keine wesentlichen Neuerungen. In einen schlanken Metallzylinder ist die Glühkathode mit dem Pumpen-

¹⁾ Schleede und Gantzkow, Zeitschr. f. Phys. 15, 189 (1923).

²⁾ Wever, ebenda 14, 410 (1923).

Die Brauchbarkeit dieser eben beschriebenen acht Röhrenmodelle richtet sich natürlich nach dem Zweck, für welchen sie Ver-

Fig. 20.



Röntgenröhre von Wever. (Aus Zeitschr. f. Phys., Bd. XIV, 1923. Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig und Julius Springer, Berlin.)

- Abb. 1. Längsschnitt durch den Metallkörper, Abb. 3. Glasisolator für die Glühkathode,
 Abb. 2. Querschnitt durch den Metallkörper, Abb. 4. Glühkathode,
 Abb. 5. Glühspiralen mit Herstellungslehren.

wendung finden sollen. Allgemein kann man wohl die Richtlinien aufstellen, daß für spektralanalytische Versuche Ionenröhren vor-

zuziehen sind, da die zu analysierenden Präparate oft erst unter dem Einfluß der Kathodenstrahlen die letzten Reste von Wasser und Gasen abgeben, durch welche bei Verwendung von Glühkathodenröhren der Glühdraht leicht angegriffen und zerstört wird. Für Kristallgitteraufnahmen mit definierter monochromatischer Strahlung, bei welchen man die theoretische Anregungsspannung stets weit überschreitet, ist es gleich, ob man mit Ionen- oder mit Glühkathodenröhren arbeitet. Bei Verwendung von mehr als zwei Fenstern werden jedoch auch hier Ionenröhren vorzuziehen sein, da es z. B. bei sechs Fenstern immerhin schwierig ist, das für einen geregelten Glühkathodenbetrieb nötige Hochvakuum zu schaffen bzw. während des ganzen Betriebs aufrecht zu erhalten.

Anders liegen natürlich die Verhältnisse, wenn man mit konstanter Spannung, oder bei Spannungen von 50000 bis 100000 Volt arbeiten will. Praktisch kommen diese Anforderungen bei Präzisionswellenlängenmessungen aus der Anregungsgrenze und bei Laueaufnahmen vor. Dann ist ein Betrieb mit Glühkathodenröhren unumgänglich notwendig, da hier die Spannung unabhängig von der Stromstärke reguliert werden kann. Denn hier ist die Stromstärke lediglich eine Funktion der Elektronenemission des Glühdrahtes, mithin eine Funktion der Kathodentemperatur, die beliebig variiert werden kann.

Je nach der Dicke der Glühspirale beträgt die Heizstromstärke 3 bis 5 Amp. bei 8 bis 20 Volt. Die optimale Belastung bei Glühkathodenröhren dürfte bei 60000 bis 70000 Volt und 10 bis 15 Milliamp., bei Ionenröhren bei 30000 bis 40000 Volt und 20 bis 30 Milliamp. liegen. Während bei den Glühkathodenröhren das Vakuum das höchst erreichbare ist und Spannung und Stromstärke der Röhre für sich gesondert und vollkommen unabhängig voneinander reguliert werden können, stehen diese drei Faktoren bei den Ionenröhren in einer gewissen Beziehung zueinander. Bei einem gegebenen Druck, der für Luft bei 10^{-4} mm liegt, gehört zu einer bestimmten Spannung eine bestimmte Stromstärke. Will man daher bei der optimalen Belastung arbeiten, so reguliert man am zweckmäßigsten das Röhrenvakuum so lange, bis dieses mit der gewünschten Belastung der Röhre im Gleichgewicht steht.

Wenn wir auf die zahlreichen Verwendungsformen zurückblicken, so finden wir, daß mehr oder weniger Spezialaufgaben die konstruktiven Abweichungen bedingen. Für ein Röntgenlaboratorium mit vielseitigem Anwendungsgebiet der Röntgentechnik hat sich die Haddingsche Röhre infolge ihrer großen Anpassungs-

fähigkeit als außerordentlich brauchbar erwiesen. Infolgedessen erstrecken sich die folgenden Ausführungen hauptsächlich auf die Erfahrungen mit diesem Röhrentypus.

c) Hochspannungsmessungen.

Von großem Interesse ist es zu wissen, welche Spannung tatsächlich an einer Röntgenröhre liegt. Trotz der einfachen Fragestellung ist es bis jetzt noch nicht gelungen, einwandfreie Messungen von Spannungen oberhalb 60 kV zu machen.

Zwar kann man aus dem Übersetzungsverhältnis der Transformatoren auf die Spannung an den Klemmen des Transformators schließen, welche Spannung jedoch tatsächlich an der Röhre liegt, nach Passierung von Ventilröhren, Drosselpulen, Kondensatoren und nach Leitungsverlusten durch Sprühen und Isolationsfehler, läßt sich innerhalb einer Fehlergrenze von ± 1 Proz. rechnerisch nicht ermitteln.

Unterhalb von 60 kV liegen die Verhältnisse wesentlich günstiger, um bei etwa 6 kV in das Gebiet der absoluten Meßgenauigkeit überzugehen, denn bis hierhin reicht die Ausbaumöglichkeit für die im Starkstromgebiet üblichen Zeigerinstrumente.

Bis 10 kV besitzt man in dem einfachen Braunschen elektrostatischen Elektrometer einen sehr guten Spannungsmesser. Da er unmittelbar an die Röhre angeschlossen werden konnte, ergibt sich eine hinreichende Meßgenauigkeit.

Weiterhin sind in letzter Zeit auch auf anderen Prinzipien (Anwendung von Kapazitäten) beruhende Instrumente konstruiert und in den Handel gebracht worden, die jedoch für unser Spezialgebiet auch ausscheiden müssen, als uns die Messung der Spannung zwischen 10 und 60 kV, dem eigentlichen Arbeitsbereich in der Spektralanalyse und Gitterbestimmung, hauptsächlich interessiert.

In diesem Gebiet sind im praktischen Laboratoriumsbetrieb direkte Spannungsmessungen nicht mehr möglich, infolgedessen müssen indirekte Methoden an die Stelle treten, vor allem die Messung der Spannung mittels Spektrometers und durch eine Parallelfunkstrecke.

Die genauesten Werte zwischen 10 und 60 kV gibt die Spannungsmessung mittels eines Spektrometers. Es besagt einerseits die Einsteinsche Gleichung, daß eine feste Beziehung zwischen der Maximalspannung und der Minimumwellenlänge, die aus dem Rohre zur Emission gelangt, besteht durch die Gleichung $h\nu = eV$, oder

$\lambda \cdot V = 12,3$, wenn λ in 10^{-8} cm und V in Kilovolt gemessen wird, andererseits haben wir in der Bragg'schen Beziehung $n\lambda = 2d \sin \vartheta/2$ die notwendige Ergänzung der Einsteinschen Gleichung für die Ausführung einer indirekten Spannungsmessung durch Rückführung dieses Problems auf eine Wellenlängenmessung. Der Vorgang ist also der, daß man mit einem Seemannschen Schneidenspektrographen das Bremsspektrum der betreffenden Röhre aufnimmt. Durch den bekannten Netzebenenabstand der Fläche des Kristalls, an dem reflektiert wird, und dem gemessenen Reflexionswinkel ergibt sich nach der Bragg'schen Gleichung die Wellenlänge λ und durch Einsetzen von λ in die Einsteinsche Gleichung die gesuchte Spannung. Die notwendige Voraussetzung für eine exakte Bestimmung des Reflexionswinkels ist die Schärfe des kurzwelligen Endes des Bremsspektrums. Eine unscharfe Kante, die durch zu große Netzschwankungen oder unzureichende Spektrometerkristalle und Schneiden leicht eintreten kann, verringert die Meßgenauigkeit erheblich. Da mit zunehmender Spannung die Reflexionswinkel kleiner werden und die Kante näher an den Durchstoßungspunkt des unabgelenkten Primärbündels heranrückt, ist durch die überlagernde Schwärzung des Durchstoßungspunktes bei etwa 60 kV ($\lambda \sim 0,2 \text{ \AA}$, $\vartheta/2 \sim 2^\circ$ bei NaCl als Beugungskristall) die Grenze der Meßgenauigkeit erreicht.

Mit Hilfe des Seemannschen Schneidenspektrographen führt innerhalb derselben Grenzen auch folgende Methode zum Ziel. Wählt man als Antikathodenmaterial eine Anzahl Salze oder Metalle mit fortlaufender Ordnungszahl, deren Anregungsspannung möglichst in der Umgebung der zu messenden Spannung liegt, und nimmt bei vollkommen konstant gehaltener Primärspannung des Transformators, die man dauernd mit einem guten Meßinstrument kontrolliert, das Röntgenspektrum auf, so kann man aus dem Auftreten der Linien der angeregten und dem Fehlen der Linien der nicht angeregten Elemente ebenfalls nach der Bragg'schen und Einsteinschen Gleichung die Spannung in ein enges Intervall einschachteln. Die Brauchbarkeit der Messungen ist weitgehend von dem Umstand abhängig, wie weit es möglich ist, die Netzschwankungen auszugleichen, da Netzschwankungen schon von 1 bis 2 Proz. ein vollkommen falsches Resultat ergeben.

Weniger genau, besonders unterhalb 60 kV Spannung, ist die Messung mittels Parallelfunkstrecke. Nachfolgende Tabelle¹⁾ um-

¹⁾ Landolt-Börnstein, 5. Aufl., 1923, S. 876.

Tabelle 1.

Schlagweite in cm	Kugeldurchmesser in Zentimetern										Ebene Platten		
	2,54		2,50		5,0		6,25		12,5			25,0	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b		a	b
0,05	—	2,67	—	—	—	—	—	—	2,65	—	2,65	—	—
0,1	—	4,61	—	—	—	—	—	—	4,60	—	4,60	—	4,65
0,2	8,32	8,20	—	—	—	—	—	—	8,04	—	8,04	—	7,76
0,3	11,6	11,5	—	—	—	—	—	—	11,3	—	11,3	—	10,7
0,4	14,8	14,6	—	—	—	—	—	—	14,4	—	14,4	—	13,8
0,5	17,9	17,6	—	—	—	17,5	17,4	—	17,4	17,4	17,4	17,4	16,8
0,6	21,0	—	—	—	—	—	—	—	20,4	—	20,4	—	19,8
0,7	24,0	—	—	—	—	—	—	—	23,3	—	23,3	—	22,8
0,8	27,0	—	—	—	—	—	—	—	26,2	—	26,2	—	25,6
0,9	29,8	—	—	—	—	—	—	—	29,1	—	29,0	—	28,6
1,0	32,5	—	32,4	31,8	32,4	31,9	—	—	32,0	31,9	31,8	31,7	31,6
2,0	—	—	59,3	56,7	59,7	58,9	—	—	60,0	59,5	60,5	59,7	59,6
3,0	—	—	80,7	74,6	82,4	78,4	—	—	85,7	85,0	87,3	86,0	87,0
4,0	—	—	97,7	87,4	102	92,4	—	—	110	108	113,5	111	114
5,0	—	—	111	96,6	117	105	—	—	131	129	138	136	140
6,0	—	—	122	104	129,5	114	—	—	151	146	162	160	166
7,0	—	—	131	109	140	121	—	—	169	162	185	182	192
8,0	—	—	139	114	150	126	—	—	185	175	205	203	217
9,0	—	—	145	—	158	131	—	—	200	186	227	223	242
10,0	—	—	150	—	165	135	—	—	213	197	247	241	266
11,0	—	—	—	—	—	—	—	—	225	—	266	—	290
12,0	—	—	—	—	—	—	—	—	236	214	283	274	—
13,0	—	—	—	—	—	—	—	—	246	—	300	—	—
14,0	—	—	—	—	—	—	—	—	255	—	316	—	—
15,0	—	—	—	—	—	—	—	—	265	231	331	314	—
17,5	—	—	—	—	—	—	—	—	284	244	367	342	—
20,0	—	—	—	—	—	—	—	—	299	253	398	365	—
22,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	424	385	—
25,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	451	402	—
30,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	492	430	—
40,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	555	468	—

(Barometerdruck = 760 mm, Zimmertemperatur = 20° C. Zuleitungen klein gegen Kugeldurchmesser. a = beide Elektroden gegen Erde isoliert, b = eine Elektrode geerdet. Für ebene Platten besteht zwischen a und b kein Unterschied.)

faßt die Verwendung von Kugeln und Platten, entweder beiderseits isoliert oder einseitig geerdet, als Elektroden. Die Meßgenauigkeit wird auf 1 bis 2 Proz. angegeben (die effektiven Wechselspannungen ergeben sich durch Division der in der Tabelle angegebenen Zahlen durch $\sqrt{2}$). Tatsächlich liegt die Fehlergrenze bei diesen Messungen höher, die Korrekturen für Luftdruck, Feuchtigkeit usw. schaffen neue Fehlerquellen. Bei mit Gleichstrom betriebenen Induktorien spielt sogar die Zahl der Unterbrechungen des Wagnerschen Hammers bzw. Wehneltunterbrechers eine Rolle, wie auch bei Wechselstromtransformatoren die Kurvenform, d. h. eventuell auftretende Oberschwingungen vorzeitige Funkenübergänge verursachen können und so höhere Spannungen vortäuschen. Eine weitere Notwendigkeit ist die vollständige Sauberkeit der polierten Elektroden. Durch die Staubsaugewirkung können ebenfalls frühzeitige Entladungen einsetzen. Auch die stets vorhandene Ionisation der Luft in einem Röntgenlaboratorium begünstigt ein frühes Einsetzen der Entladung.

Eine Messung der Spannung mittels Parallelfunkenstrecke bei einer Ionenröhre vorzunehmen, ist nicht anzuraten, da durch die kurzschlußartige Entladung der Stromdurchgang durch die Ionenröhre unterbrochen wird. Während der nur wenige Sekunden dauernden Unterbrechung kann sich jedoch das Betriebsvakuum derartig geändert haben, daß die Röhre zu hart geworden ist, somit eine weit höhere Spannung nach Abreißen der Entladung der Parallelfunkenstrecke an der Röhre liegt und außerdem durch Nachströmenlassen von atmosphärischer Luft in die Röhre zur Erlangung des günstigsten Gasdrucks eine Betriebsverzögerung durch das erforderliche Nachregulieren eintritt.

Zu erwähnen wären noch zwei prinzipiell mögliche Spannungsmessungsmethoden, die jedoch für den praktischen Laboratoriumsbetrieb dadurch ausscheiden, daß die Instrumente infolge der benötigten Isolationsabstände sehr große Dimensionen annehmen.

Die eine Methode beruht auf dem Prinzip der elektrostatischen Wage. In einem Ölgefäß befindet sich am Boden eine plattenförmige Elektrode, über der eine an einem Wagebalken befindliche Scheibe in entsprechendem Abstände aufgehängt ist. Ein am Wagebalken befindlicher Zeiger gibt die Größe der Anziehung, die proportional der angelegten Spannung ist, auf einer Skala an¹⁾.

¹⁾ Jaeger, Elektrische Meßtechnik. Leipzig, Barth, 1922.

Die andere Methode beruht auf der Messung der Korona- und Sprühverluste an einem dünnen Draht¹⁾.

Die bei Wechselstromhochspannungsanlagen sonst gebräuchlichen Meßwandler scheiden hier aus, da wir es in unserem Falle mit hochgespanntem Gleichstrom zu tun haben.

d) Vakuumanlage.

Je nach der Verwendungsart der Metallröhren, als Gasentladung- oder Glühkathodenröhre, richten sich die Anforderungen an die Evakuierungsanlage.

Im ersten Falle ist ein Betriebsvakuum von etwa 10^{-3} bis 10^{-4} mm erforderlich, im zweiten das bestmögliche, mindestens aber $5 \cdot 10^{-6}$ mm. Dementsprechend genügen für den eigentlichen Betrieb der Gasentladungsröhren zwei Ölpumpen, von denen die erste gegen Luft als Vorpumpe, die zweite als Feinpumpe geschaltet ist.

Um ein einwandfreies Betriebsvakuum dauernd zu behalten, ist es nötig, die Metallröhren an die Vakuumanlage angeschlossen zu lassen, um je nach Bedarf die Pumpen in Betrieb setzen zu können. Stark gasabgebende Antikathodenmaterialien, die zur spektralanalytischen Untersuchung gelangen, erfordern ein dauerndes Inganghalten der Pumpen, während die allmähliche kaum merkliche Diffusion durch die etwa 0,01 bis 0,02 mm starken Aluminiumfenster bei nicht gasabgebenden Antikathoden nur ein zeitweiliges Nachpumpen erfordern würde. Vorteilhafter ist es jedoch, die Pumpen nicht abzustellen.

Bei Glühkathodenröhren reichen Ölpumpen allein nicht aus, so daß Diffusionspumpen, je nach Bedarf eine oder auch mehrere, hinzugenommen werden müssen.

Folgende Tabelle 2 bringt eine von Goetz²⁾ zusammengestellte Übersicht über eine große Anzahl in der Praxis verwendeter Pumpenmodelle. Die Tabelle gibt genauen Aufschluß über die Leistungsfähigkeit in jeder Hinsicht. Spalte 2 gibt den Anfangsdruck an, d. h. ob die Pumpe gegen Luft arbeiten kann, oder einer Vorpumpe, die gegen Luft arbeitet, bedarf, die aus Spalte 3 ersichtlich ist. In den Spalten 4 und 5 sind die Hauptleistungsfaktoren angegeben,

¹⁾ Whitehead und Isshiki, Journ. Amer. Inst. Electr. Eng. 1920, S. 441; ETZ. 1920, S. 613.

²⁾ Goetz, Physik und Technik des Hochvakuums. Sammlung Vieweg, Heft 64, 1922.

Tabelle

Pumpe	Anfangsdruck	Erforderliche Vorpumpe	Grenzvakuu	Saugleistung	Tourenzahl pro Minute		
1. Wasserstrahlpumpen	760 mm	keine	10—20 mm	verhältnismäßig klein, abhängig vom Wasserdruck	—		
2. Ölluftpumpen			$5 \cdot 10^{-2}$ (10^{-1})	größer als 1.	} 5—10		
a) Gerykpumpe			$5 \cdot 10^{-5}$ (10^{-4})	kleiner als 2a)			
b) Gaede-Kolbenpumpe			$5 \cdot 10^{-2}$ (10^{-1})	größer als 2a)	150		
c) Kapselpumpe			(27,5 ccm/sec)				
3. Quecksilberpumpen			10—20 mm	1. oder 2.	etwa 10^{-4}	} abhängig von der Handhabung, klein	—
a) Geisslerpumpe					etwa 10^{-5}		—
b) Töplerpumpe					etwa 10^{-5}	sehr klein	—
c) Sprengelpumpe					etwa 10^{-4}	} größer als 3a) bis 3c)	etwa 30
d) Schaukelpumpe			etwa 10^{-4}	—			
e) Kaufmannpumpe	etwa 10^{-5}	21					
f) Gaedepumpe							
4. Molekularluftpumpe	$5 \cdot 10^{-2}$ mm	2c) oder 3f) mit 1.	$2 \cdot 10^{-7}$ (10^{-6})	Max. 1400 ccm/sec	12000		
5. Quecksilberdampf-P.	10—20 mm	1.	etwa 10^{-3}	etwas größer als 3f)	—		
a) Volmer-D.-V.-P.	$5 \cdot 10^{-2}$ bis $1 \cdot 10^{-3}$	3f) oder 5a)	∞	etwa 80 ccm/sec	—		
b) Diffusionspumpe				800 bis 1000 ccm/sec	—		
c) Crawfordpumpe				1200 bis 2000 ccm/sec	—		
d) Langmuirpumpe				} 1800 bis 3000 ccm/sec Max. 7000 ccm/sec	—		
e) Lichtbogenpumpe					—		
f) Gaede-Kondensationspumpe					—		
g) Scholz-Kondensationspumpe					—		
h) Volmer-Kondensationspumpe							
6. Aggregate	10—20mm	1. oder 2.		} nach Erreichung von 10^{-3} wie oben	—		
a) Volmeraggregate					—		
b) Stufenstrahl-pumpen					—		

2.

Konstruktionsmerkmal	Wirkungsweise	Verwendung	Abhängigkeit der Sauggeschwindigkeit	Betriebsart	
—	pumpt bis zum Dampfdruck des Wassers	1. Vorvakuum	Wasserdruck	selbsttätig	
schädlicher Raum mit Öl gefüllt	gegen Wasserdampf sehr empfindlich				
Unterteilg. des Vakuums durch mehrere Kolben	Trennung von Wasser und Öl	hauptsächlich für Demonstrationszwecke	mit steigendem Vakuum sinkende Geschwindigkeit	Hand- oder Maschinenantrieb	
Abdichtung mit federnden Riegeln	entfernen keine leicht kondensierbaren Dämpfe	1. Vorvakuum u. U. auch für 2. V.			
Hahnsteuerung		1. und 2. Vorvakuum		Handbetrieb	
selbsttätige Steuerung					Evakuierung sehr kleiner Volumina
automatisch arbeitend		2. Vorvakuum		Hand- oder Maschinenantrieb	
Schaukelbewegung					
Förderschraube					
Kammersystem		entfernt Dämpfe atomlyt.: schwere Gase schneller		begrenzt Hochvakuum	Optimum bei $5 \cdot 10^{-3}$
Ausnutzung der Molekularreibung					
Konische Düse	entfernen alle Gase u. Dämpfe, atomlytische Wirkung: leichte Gase schneller	2. Vorvakuum	wie 2. und 3.	Heizung	
Stahlsplatt					
Parallelstrahl durch Düsenform, Luftkühlung		unbegrenzt Hochvakuum	unabhängig vom Vakuum, abhängig vom Vordruck und Hg-Temperatur		
Zylinderdüse m. Wasserkühlung, Kondenswirkg.					
do. aber Lichtbogenheizung					
Kondensation des Hg, z. T. im Hochvakuum					
do. durch konstruktive Vereinfachung					
do. durch Kondensation im Vorvakuum					
Kombination von 5a) und 5h)	wie bei 5., arbeiten selbsttätig	unterhalb 10^{-3} konstant			
dem Verdünnungsgrad angepaßte Strahlwirkung					

Tabelle

1.		2.						3.				4.	
Rotierende Hg-Pumpe nach Gaede		Stufenstrahlhochvakuumpumpe aus Quarz nach Volmer						Aggregat von Hanff und Buest nach Volmer				Kondensationspumpe nach Langmuir-Gehrts von Siemens u. Halske	
Ö l p u m p e													
10 ⁻¹ mm Hg		a) 15 mm Hg		b) 10 mm Hg		c) 5 mm Hg		a) 1 mm Hg		b) 5 mm Hg		10 ⁻³ mm Hg	
<i>p</i>	<i>S</i>	<i>p</i>	<i>S</i>	<i>p</i>	<i>S</i>	<i>p</i>	<i>S</i>	<i>p</i>	<i>S</i>	<i>p</i>	<i>S</i>	<i>p</i>	<i>S</i>
1,1 · 10 ⁻¹	2,2	7,3 · 10 ⁻³	6,6	3,5 · 10 ⁻²	5,5	2,4 · 10 ⁻²	6,1	6,7 · 10 ⁻³	10,0	8,1 · 10 ⁻²	9,8	1,8 · 10 ⁻²	8,7
4,8 · 10 ⁻²	2,2	1,7 · 10 ⁻³	6,5	1,2 · 10 ⁻²	5,6	8,3 · 10 ⁻³	6,4	8,8 · 10 ⁻⁴	11,3	1,3 · 10 ⁻²	8,0	3,1 · 10 ⁻³	7,2
3,2 · 10 ⁻²	2,1	6,2 · 10 ⁻⁴	5,9	3,3 · 10 ⁻³	5,7	1,9 · 10 ⁻³	6,4	1,0 · 10 ⁻⁴	9,5	2,7 · 10 ⁻³	8,0	0,7 · 10 ⁻³	6,9
5,1 · 10 ⁻³	1,9	2,5 · 10 ⁻⁴	4,4	9,2 · 10 ⁻⁴	5,8	5,4 · 10 ⁻⁴	6,0	1,8 · 10 ⁻⁵	6,5	5,8 · 10 ⁻⁴	7,8	1,7 · 10 ⁻⁴	6,4
1,8 · 10 ⁻³	1,8	1,1 · 10 ⁻⁴	3,9	4,7 · 10 ⁻⁴	5,9	1,7 · 10 ⁻⁴	5,8	5,8 · 10 ⁻⁶	4,2	1,3 · 10 ⁻⁴	6,7	4,6 · 10 ⁻⁵	5,8
3,2 · 10 ⁻⁴	1,8	5,3 · 10 ⁻⁵	3,2	9,2 · 10 ⁻⁵	6,0	5,5 · 10 ⁻⁵	5,6	2,8 · 10 ⁻⁶	2,2	3,6 · 10 ⁻⁵	6,0	1,5 · 10 ⁻⁵	5,3
8,5 · 10 ⁻⁵	0,6	3,0 · 10 ⁻⁵	2,6	2,8 · 10 ⁻⁵	5,8	1,9 · 10 ⁻⁵	5,5	1,7 · 10 ⁻⁶	2,8	1,3 · 10 ⁻⁵	4,3	3,9 · 10 ⁻⁶	5,0
5,8 · 10 ⁻⁵	0,2	1,9 · 10 ⁻⁵	1,9	9,2 · 10 ⁻⁶	5,6	6,3 · 10 ⁻⁶	5,5			6,2 · 10 ⁻⁶	3,0	1,3 · 10 ⁻⁶	5,0
5,2 · 10 ⁻⁵	0,1	1,3 · 10 ⁻⁵	1,7	3,1 · 10 ⁻⁶	5,4	2,2 · 10 ⁻⁶	5,5			4,0 · 10 ⁻⁶	1,3		
		8,8 · 10 ⁻⁶	1,6										
		6,1 · 10 ⁻⁶	1,5										
		4,5 · 10 ⁻⁶	1,4										

das Grenzvakuu und die Saugleistung, die für die Wahl der Pumpe ausschlaggebend sein werden. Die folgenden Spalten sollen zur Ergänzung des Vorangegangenen dienen und die einzelnen Vor- und Nachteile stärker hervortreten lassen. Bezüglich der näheren Einzelheiten sei auf die Originalarbeit verwiesen.

Tabelle 3 bringt eine weitere Übersicht aus dem Gebiete der Diffusions- und Kondensationspumpen von H. Ebert¹⁾. Die erste Querspalte gibt die Herkunft der Pumpe, die zweite die verwendete Vorpumpe, die dritte das benötigte Vorkuum und schließlich die vierte Spalte die Sauggeschwindigkeit *S* bei einem Druck *p* an. Ein Vergleich des erreichten Drucks mit der Sauggeschwindigkeit läßt die überlegene Saugleistung der Gaedeschen Metaldiffusionspumpe stark hervortreten. Die Verwendung von Metaldiffusionspumpen bietet gegenüber gläsernen einen außerordentlichen Vorteil. Die hin und wieder nötige Reinigung der Metalldüse und somit nur

¹⁾ H. Ebert, Zeitschr. f. Phys. 19, 208 (1923).

5. Diffusionspumpe nach Gaede		6. Kondensations- pumpe der Firma „Date“ Hamburg		7. Kondensations- pumpe (neuestes System der Firma Hanff u. Buest), teils Glas, teils Quarz		8. Kondensations- pumpe der Präzisions- physik-Gesell- schaft Berlin		9. Diffusions- pumpe aus Stahl nach Gaede			
a) altes System	b) neues System	Pumpe Nr. 1									
10 ⁻³ mm Hg		10 ⁻³ mm Hg		10 ⁻³ mm Hg		10 ⁻² bis 10 ⁻³ mm Hg		10 ⁻³ mm Hg		Ölpumpe 5 mm Hg	
<i>p</i>	<i>S</i>	<i>p</i>	<i>S</i>	<i>p</i>	<i>S</i>	<i>p</i>	<i>S</i>	<i>p</i>	<i>S</i>	<i>p</i>	<i>S</i>
,1. 10 ⁻²	8,1	3,4. 10 ⁻²	14,4	2,5. 10 ⁻²	24,0	3,2. 10 ⁻²	22,8	2,5. 10 ⁻²	22,2	3,03. 10 ⁻⁰	49,0
,3. 10 ⁻³	6,9	2,2. 10 ⁻³	12,6	2,7. 10 ⁻⁴	12,1	4,2. 10 ⁻⁴	14,7	3,7. 10 ⁻⁴	14,4	2,9. 10 ⁻²	36,2
,3. 10 ⁻³	6,1	2,0. 10 ⁻⁴	9,6	2,7. 10 ⁻⁵	9,3	2,6. 10 ⁻⁵	11,5	2,5. 10 ⁻⁵	10,2	8,8. 10 ⁻⁴	36,0
,5. 10 ⁻⁴	5,5	3,9. 10 ⁻⁵	8,3	5,0. 10 ⁻⁶	7,0	3,1. 10 ⁻⁶	7,4			3,0. 10 ⁻⁵	26,8
,2. 10 ⁻⁴	5,5	7,0. 10 ⁻⁶	7,9								
,8. 10 ⁻⁵	5,5										
,3. 10 ⁻⁵	5,3										
,2. 10 ⁻⁶	4,7										
,2. 10 ⁻⁶	3,6										
,2. 10 ⁻⁶	1,7										

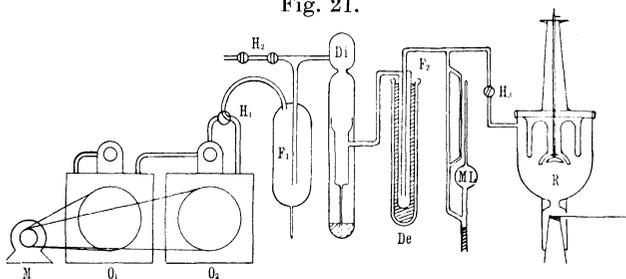
zeitweise Außerbetriebsetzung der Pumpe ist gegen den immerhin reichlichen Verbrauch an Glaspumpen, der sich bei größter Vorsicht nicht vermeiden lassen wird, das kleinere Übel.

Eine Hinzuschaltung von Quecksilberfängern ist angebracht und bei Verwendung von Glühkathodenröhren sogar notwendig. Man verwendet diese als einfache Kugel auf der Vorkammerseite gleichzeitig als Ölfänger, um zu vermeiden, daß einerseits durch Mitreißen Quecksilber in die Ölpumpe, andererseits Öl in die Diffusionspumpe gelangen könnte. Auf der Feinvakuumseite jedoch hat der Quecksilberfänger die Gestalt einer Kühlschlange, die in ein Dewargefäß mit einer Kältemischung (flüssige Luft, Kohlensäure und andere) hineintaucht, um den Quecksilberdampf dort kondensieren zu lassen.

Ähnlich wie bei der elektrischen Anlage gilt auch hier das Prinzip, je einfacher die Anordnung, desto größer die Betriebssicherheit, d. h. möglichst kurze und nicht zu enge Glasleitungen und wenig Hähne auf der Hochvakuumseite, keine komplizierte Vakuum-

regulierung. Im allgemeinen wird man gut tun, in der Anlage für alle Fälle einige Diffusionspumpen vorzusehen. Ein geeignetes McLeod vervollkommnet die Vakuumanlage; aus der Fig. 21 ergibt sich das Bild einer Vakuumanlage, die allen Anforderungen für den Betrieb von Metallröntgenröhren jeder Art genügt.

Fig. 21.



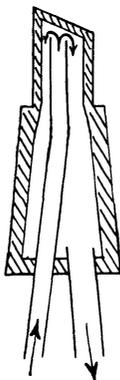
Vakuumanlage.

- | | | |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <i>M</i> Motor, | <i>H₁</i> Dreiwegehahn, | <i>De</i> Dewargefaß, |
| <i>O₁</i> Ölpumpe, gegen Luft von Atmosphärendruck, | <i>F₁</i> Öl- und Quecksilberfänger, | <i>F₂</i> Quecksilberfänger, |
| <i>O₂</i> Ölpumpe, als zweite Vorpumpe, | <i>H₂</i> Doppelhahn, | <i>ML</i> MacLeod-Manometer, |
| | <i>Di</i> Diffusionspumpe, | <i>H₃</i> Absperrhahn, |
| | | <i>R</i> Röntgenröhre. |

e) Kühlanlage.

Von jeher bot bei allen Arten der Röntgenröhren die Kühlung der Kathode und hauptsächlich auch der Antikathode die größten Schwierigkeiten. Die neuen, in der Medizin gebräuch-

Fig. 22.



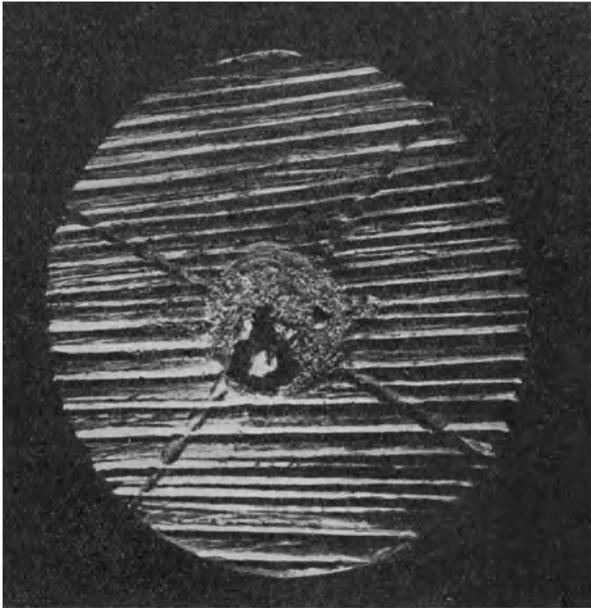
Kühlung der Antikathode einer Hardingröhre. (2/3 nat. Größe.)

lichen Therapie-Coolidgehörnen, sorgen nur durch einen langen schmalen Stiel dafür, daß die Wärmeleitung von der fast weißglühenden Wolfram-Antikathode zur Durchführung durch die Glaswandung möglichst stark abfällt, ohne irgendwelche Wasserkühlung mit hinzuzunehmen. Andere Röhren sehen neben einer Luftkühlung ein Wasserreservoir vor, in dem das Wasser siedet und einen Betrieb der Röhre gestattet, solange sich noch Wasser im Reservoir befindet. Diese Röhren können wegen ihrer hohen Betriebsspannung nur selten an der Antikathode geerdet werden. Dieser Nachteil fällt bei den Metallröhren fort.

Somit gestaltet sich die Kühlung der Antikathode verhältnismäßig einfach. Eine direkte Verbindung von der Wasserleitung zur Antikathode und weiter zum Abfluß läßt durchschnittlich vier Liter in der

Minute durch die Antikathode (s. Fig. 22) strömen. Trotzdem gelangt die Oberfläche der Antikathode zur Rotglut und ein haarscharfer Brennfleck kann, wie Fig. 23 zeigt, das Antikathodenmaterial, wie hier z. B. Platin auf Eisenunterlage, zum Schmelzen bringen. Eine Unterbrechung der Antikathodenkühlung läßt in kurzer Zeit durch die Wärmeleitung die Piceinverkittungen erweichen und die Luft in die Röhre einströmen, nicht ohne die Antikathode mehr oder minder vorher unbrauchbar zu machen.

Fig. 23.



Oberfläche einer Eisenantikathode.

(Die eingefeilten Rillen dienen zum Festhalten der aufgestrichenen Pulver, welche spektroskopisch untersucht werden sollen.)

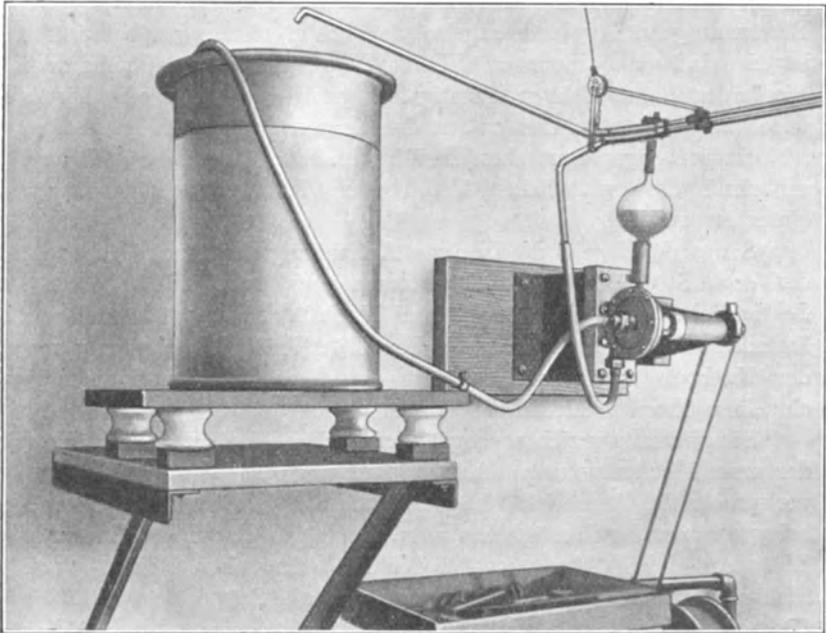
Schon seit einiger Zeit ist diese ungeheure Wärmeerzeugung durch Aufprall von Kathodenstrahlen zur Konstruktion von Schmelztiegeln für schwer schmelzbare Substanzen konstruiert worden. Fig. 24 zeigt z. B. eine von Phragmen¹⁾ beschriebene Ausführungsform eines Kathodenstrahlenofens, welcher gewisse Ähnlichkeit mit der Haddingröhre aufweist.

Etwas schwieriger gestaltet sich die Kühlung der Kathode der Gasentladungsröhren. Sie braucht nicht so ausgiebig wie eine Anti-

¹⁾ Phragmen, Jernkontorets Ann. 1923, S. 124.

Man kann diesen Übelstand dadurch leicht beseitigen, daß man einen durch einen Hahn verschließbaren Ballon, wie in der Fig. 25 ersichtlich, anbringt. Dadurch, daß man diesen Behälter vor Inbetriebnahme mit Wasser füllt, können keine störenden Luftblasen mehr im Pumpraum verbleiben. Der Betrieb erfolgt dann bei geschlossenem Hahn, falls sich nachträglich Luftbläschen bilden, werden sie im Glasballon aufgefangen. Ein Glasballon von etwa 500 ccm Inhalt entspricht allen Anforderungen.

Fig. 25.



Kühlanlage für die Kathode.

Um das Funktionieren der Kathodenkühlung dauernd beobachten und ein Aussetzen rechtzeitig bemerken zu können, sind einige Kunstgriffe nötig, da, wie schon bemerkt wurde, der am meisten gefährdete Hals oberhalb der Kathode der direkten Beobachtung nicht zugänglich ist.

Man kann unmittelbar unterhalb des Einflusses in das große Sammelgefäß einen zweiarmigen Hebel derart anbringen, daß der eine Hebelarm eine wagerechte Platte trägt, die durch den Druck des einströmenden Wassers eine am anderen Hebelarm befindliche

möglichst deutlich sichtbare Scheibe emporhebt und bei Unterbrechung des Wasserstroms heruntersinken läßt.

Wenn man ferner die Wasserzuleitungen leicht beweglich nach Art eines Pendels an Schnüren befestigt, hat man in den Stößen und Zuckungen an der Befestigung, die durch aufsteigende Dampfbläschen verursacht werden, ein weiteres Anzeichen für die Unterbrechung der Kühlung. Oft läßt sich dann noch der Durchführungsisolator der Kathode vor dem Durchschlagenwerden oder Zerspringen retten.

Eine andere, jedoch weniger zuverlässige Möglichkeit, eine Erwärmung des Durchführungsisolators noch rechtzeitig zu bemerken, ist die, daß man am unteren Halsende ein Stückchen Wachs oder Piceïn durch eine Schnur befestigt. Beginnt das Wachs oder Piceïn weich zu werden, so daß es aus der Schnur nach unten gleitet, so ist beim sofortigen Bemerken die Temperatur des Isolators noch weit unterhalb der gefährlichen Temperatur, bei der ein Zerspringen eintreten würde.

Simon¹⁾ umgeht die isolierte Aufstellung der Pumpe dadurch, daß er an Stelle von Wasser Transformatoröl zur Kühlung benutzt. Schließlich benutzen Böhm und Niclassen²⁾ als Antrieb zur Zirkulation Preßluft, die durch eine Düse in die Rückleitung von der Kathode zum Wasserbehälter einströmt und das Wasser in einzelnen Tropfen hinauftransportiert.

Siegbahn verzichtet sogar auf jegliche isolierte Aufstellung der unter Hochspannung stehenden Kühlung und nimmt den Stromverbrauch, der immerhin einige Milliampere beträgt, in Kauf und bringt ihn nur durch möglichst lange Glasleitungen auf ein Minimum. Diese Art der Kühlung ist bei der Haddingschen Röhre jedoch nicht anzuraten, da der Mehrverbrauch an Energie etwa 30 bis 50 Proz. betragen würde.

f) Kunstgriffe.

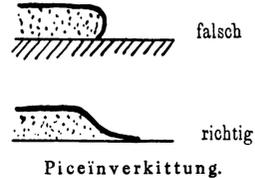
Im allgemeinen wird man bestrebt sein, auf der Hochvakuumsseite fest zusammengeblasene Glasleitungen zu verwenden. Beim Übergang vom Glas zum Metallteil hat sich Piceïn als vollwertiges Kittmaterial erwiesen. Mit einer nicht zu heißen Gebläseflamme erwärmt man das Metall leicht, bis sich das Piceïn aufstreichen läßt. Läßt man das Piceïn auf das nicht vorgewärmte Metall tropfen, so

¹⁾ Simon und Simson, Zeitschr. f. Phys. **21**, 168 (1924).

²⁾ Böhm und Niclassen, Zeitschr. f. anorg. Chem. **132**, 1 (1923).

erfolgt keine Bindung, das Picein springt ab. Die Oberfläche des Piceins muß vollkommen glatt sein, Risse oder Löcher entfernt man durch Überfächeln mit einer mäßig heißen Gasstichflamme. An der Begrenzungsstelle achte man darauf, daß der Meniskus des Piceins von der konvexen Krümmung in eine konkave übergeht, wie dies aus der Fig. 26, die einen schematischen Querschnitt darstellen möge, ersichtlich ist. Verwendet man eine zu heiße Stichflamme, so bildet sich leicht Schlacke, die man daran erkennt, daß sie beim Nähern einer Stichflamme aufglüht, während das siedende Picein dunkel ohne Leuchterscheinung bleibt. Wassertropfen, mögen sie vorher nicht entfernt sein oder erst nachträglich sich

Fig. 26.



auf der Piceinoberfläche ansammeln, sind in jeder Beziehung ein Zerstörer. Oberflächlich feuchtes Picein kann sogar dem damit Hantierenden leichte Brandwunden durch die unter starkem Knistern durch den Wasserdampf umherspritzenden Piceintropfen beifügen. Muß man Picein in der Nähe von Lötstellen verwenden, die wasserführende Teile verschließen, so ist größte Vorsicht geboten. Man kann zu leicht die Lötstelle beschädigen. Wenn auch nach außen hin alles abgedichtet zu sein und zunächst einwandfrei zu funktionieren scheint, so kann doch aus einer winzigen Öffnung der Lötstelle ein Wassertropfen sich allmählich unter dem Picein in das Vakuum einschleichen. Am besten umgeht man diesen Übelstand dadurch, daß man Lötstellen (z. B. in der Nähe der Aluminiumfenster am Wasserkühlmantel der Haddingröhren) möglichst vermeidet, auf keinen Fall verwende man leicht schmelzbare Lote, entweder müssen die Metallteile aneinander geschweißt oder „hart“ gelötet werden.

Weißer Siegellack und sogenannter „Marineleim“ sind ebenfalls für die Hochvakuumtechnik verwendbare Kittmaterialien. Jedoch infolge der noch leichteren Möglichkeit der Verbrennung, Schlackenbildung und geringeren Haftfähigkeit an Metall stehen sie dem Picein nach. Eine kleine Beimengung von Picein in diesen Kitten ist vorteilhaft.

Bei zahlreichen Arten von Metallröhren findet man als Befestigung der Aluminiumfenster aufgeschraubte Klötzchen, die in der Mitte zur Durchlassung des Röntgenstrahles durchbohrt sind. Wir haben gefunden, daß diese Klötzchen sehr oft Anlaß zu Undichtigkeiten gegeben hatten, so daß wir einen anderen Weg einschlugen. Bei den Klötzchen hätte man zwar die Durchbohrung

zur Fixierung der Röhrenblenden verwenden können und somit die Einzentrierungszeit etwas verkürzen können, wie verzichteten aber hierauf und ließen die Klötzchen überhaupt ganz fort. Der Verschluß erfolgte dann derart, daß etwas Picein auf dem leicht vorgewärmten Metall oberflächlich zum Schmelzen gebracht und dann die Aluminiumfolie aufgedrückt wurde. Leichtes Erwärmen der Aluminiumfolie und vollkommenes Überstreichen der Außenseite mit Picein ließ die Abdichtungen exakter und in kürzerer Zeit geschehen, als dies durch Verschrauben der Klötzchen möglich war. Der eigentliche Vorteil bestand einerseits darin, daß man schon äußerlich feststellen konnte, ob noch irgendwo eine Undichtigkeit wäre, andererseits, daß vollkommen vermieden werden konnte, daß Picein die Innenseite des Kanals verstopfen konnte. Das außen übergestrichene Picein ließ sich im Röntgenlicht unter Vorhalten eines Fluoreszenzschirms leicht mit einem erwärmten Glasstab beseitigen, so daß auch tatsächlich die Gewißheit vorhanden war, daß kein unerwünschtes absorbierendes Medium noch im Strahlengang verblieben war.

Als Fenstermaterial verwendet man dünne etwa 0,01 bis 0,02 mm dicke Aluminiumfolien. Da die Absorption mit der Dicke nach einer e -Funktion ansteigt, ist zur Erzielung der größten Intensitätsausbeute die erreichbar kleinste Schichtdicke zu wählen. Für Kristallstrukturbestimmungen, wo eine einwellige homogene Strahlung von Vorteil ist, kann man Fenster aus einem Material verwenden, dessen Ordnungszahl um einige Einheiten unter der Ordnungszahl des Elements liegt, welches als Antikathode dient, so daß dessen Absorptionsbandkante zwischen der $K\alpha$ - und $K\beta$ -Linie der emittierten Strahlung liegt. Da der Teil des Spektrums, welcher langwelliger als die Absorptionsbandkante ist, weniger absorbiert wird als der kurzwellige, wird auf diese Weise die an sich weniger intensive β -Strahlung vollständig ausgelöscht. Für folgende Strahlungen sind die angegebenen Filter (als Fensterfolie) zu verwenden.

Tabelle 4.

Anti-kathode	$K\alpha_1$	$K\beta_1$	Filter	Absorptionsgrenze des Filters
Fe	1,937	1,753	Mn	1,889
Cu	1,541	1,389	Ni	1,489
Mo	0,712	0,631	{ Nb Zr	0,650
Pd	0,589	0,520	Rh	0,533
W	0,214	0,184	Ta	0,198

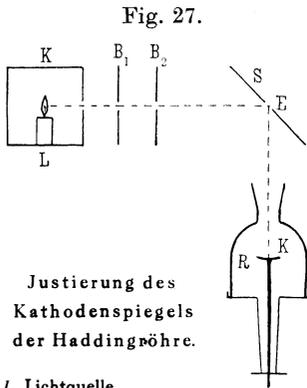
Die Antikathode wird bei dauernder Verwendung von derselben Strahlung aus einem Block angefertigt. In der Regel verwendet man für langwellige Strahlung Cu oder für etwas kurzwelligere Mo. Will man jedoch eine auf eine photographische Emulsion sehr empfindlich ansprechende Strahlung benutzen, dann muß man Wellenlängen wählen, welche etwas kürzer als die Eigenwellenlänge des Ag sind und diese in der Silberhaloidschicht anzuregen vermögen. Glocker¹⁾ schlägt hierfür eine Legierung von 33 Proz. Ni und 67 Proz. Sb vor, dessen Schmelzpunkt bei 1158⁰ nahezu den doppelten Wert des reinen Sb besitzt und infolgedessen gut als Antikathodenmaterial geeignet ist. Die ebenfalls emittierte langwelligere Ni-Strahlung kann durch Filter leicht quantitativ entfernt werden.

Muß sie dagegen nach jeder Aufnahme ausgewechselt werden, wie dies bei den spektralanalytischen Untersuchungen der Fall ist, dann empfiehlt es sich, den oberen Block, in der Regel aus Eisen, in den unteren Kupferkonus einzuschrauben und zu verlöten. Ein Auswechseln nach jeder Aufnahme ist notwendig, da infolge von Diffusion so viel von dem aufgestrichenen Präparat bei der Aufnahme in die Antikathodenoberfläche hineindiffundiert ist, daß bei neuerlicher Verwendung auch nach guter Reinigung stets die alten Linien wieder auftreten. Je nach der Art des zur Untersuchung gelangenden Materials, fein pulverisiert oder grobkörnig, wird die Antikathodenoberfläche aufgeraut oder eine pfannenartige Vertiefung eingebohrt. Bei der Bearbeitung der Antikathodenoberfläche ist daher darauf zu achten, daß die zur Verwendung gelangenden Feilen und Bohrer vollkommen unbenutzt sind und später zu keiner anderen Materialverarbeitung benutzt werden, sondern immer nur für diesen einen Zweck aufgehoben werden. Metallische Verunreinigungen, die von der Feile stammen, können auch in noch so geringen Mengen die exakte Analyse beeinflussen.

Die Einzentrierung des Kathodenspiegels bei Ionenröhren, speziell bei der Haddingschen Röhre ist mit einer besonderen Sorgfalt vorzunehmen. Liegt die optische Achse des Spiegels nicht genau in der Mitte der Antikathodenfläche, so ist an keine Brauchbarkeit der Röhre zu denken. Zur Einzentrierung muß die Oberfläche des Spiegels leidlich gut reflektieren können. Die von der Porzellanmanufaktur hergestellten Durchführungsisolatoren zeigen leider des öfteren Durchbiegungen in der Achse, die natürlich eine Verbiegung des Kathodenhalters ebenfalls nach sich ziehen.

¹⁾ Glocker und Kaupp, Zeitschr. f. Phys. **24**, 123 (1924).

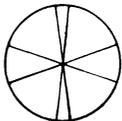
Eine bei uns praktisch durchgeführte Methode benutzt die auf der spiegelnden Oberfläche des Kathodenspiegels entstehenden Spiegelungsfiguren. Die Anordnung ist aus Fig. 27 ersichtlich. Aus einem geschlossenen Kasten tritt durch eine kleine Öffnung ein paralleles Lichtbündel einer im Kasten befindlichen Lichtquelle aus und wird an einem Spiegel reflektiert, der unter 45° dazu steht



Justierung des Kathodenspiegels der Haddingröhre.

- L Lichtquelle,
- K lichtdicht schließender Kasten mit Austrittsöffnung für den Lichtstrahl,
- B₁, B₂ Blenden,
- S Spiegel,
- R Röntgenröhre,
- K Kathodenspiegel.

Fig. 28.



Speichenförmige Spiegelungsfigur auf dem Kathodenspiegel vor der Justierung.

und mit der Röhrenachse ebenfalls einen Winkel von 45° bildet (vgl. schematische Fig. 27). Durch ein kleines Loch *E* im Spiegel kann der Beobachter durch die Antikathoden-zuführung den Spiegel der Kathode beobachten. Erst wenn auf dem Spiegel keine speichenartigen Spiegelungsfiguren mehr auftreten, sondern nur eine gleichmäßige Helligkeit sich ausbreitet, ist die Gewißheit für die Koinzidenz der optischen Achse des Spiegels mit der Symmetrieachse der Röhre tatsächlich vorhanden (Fig. 28).

Da die Lebensdauer eines Durchführungsisolators etwa die gleiche ist, wie die Brauchbarkeit des Spiegels (s. oben), so ergibt sich meist zugleich mit dem Auswechseln des Isolators das Einsetzen eines neuen Spiegels. Ist jedoch ein vorzeitiges Umwechseln des Isolators nötig, dann zeigt der Spiegel oft nicht mehr den für die Einzentrierung nötigen Glanz der Oberfläche, so daß ein Nachpolieren der Oberfläche nötig ist. Nach erfolgter

Einjustierung wird der Metallkörper und der Isolator mit Picein aneinandergekittet und es ist selbstverständlich, daß nach vollständiger Erhärtung des Piceins vor dem Einsetzen der Antikathode eine nochmalige Kontrolle der Lage des Kathodenspiegels erfolgt.

Schließlich kann auch eine Auswechslung des Metallkörpers nötig werden, falls eine gründliche Reinigung erfolglos geblieben sein sollte. Sind z. B. eine große Anzahl spektralanalytischer Untersuchungen gemacht worden, in denen eine Reihe von Elementen

stets wiederkehrte, so kann beim Übergange zu einer vollständig anders gearteten Analyse noch so viel Material der vorigen Untersuchungen am Röhrenkörper oder dem Blendenkanal usw. haften bleiben, daß sich diese Elemente durch ein schwaches Auftreten ihrer Linien im Röntgenspektrum bemerkbar machen können. Doch dies wird eine Seltenheit sein, im allgemeinen wird eine gründliche Reinigung ausreichen, oder man wird das Vorhandensein der schwachen Linie mit in Kauf nehmen, falls es sich nicht gerade um eine Analyse handelt, in der es auf die Existenz oder Abwesenheit gerade dieses Elements ankommt.

Im allgemeinen ist nicht nur auf die wissenschaftliche Brauchbarkeit, sondern auch auf die äußere Beschaffenheit der Apparatur Wert zu legen. Da die Hochspannung führenden Teile als Staubsauger wirken, tritt schon nach kurzer Zeit eine starke Ablagerung von Staub usw. an diesen Teilen ein, die leicht zu Gleitfunkenbildung auf den Isolatoren und sogar zu vollkommenem Kurzschluß führen können. Die gleiche Gefahr bildet mit Wasserdampf übersättigte Zimmerluft. Beim Kurzschluß wirken die Ventilrohre als Röntgenröhren und sind daher der starken Überlastung nicht gewachsen. Binnen kurzem ist die Anode weißglühend und führt zur Zerstörung des Ventilrohres. Sauberkeit der Anlage ist nicht nur eine ästhetische Forderung, sondern in gleichem Maße eine Notwendigkeit für die Durchführbarkeit des Laboratoriumsbetriebes.

Nun noch einiges über den eigentlichen Betrieb. Hat das MacLeod ein Vakuum von etwa 10^{-4} mm angezeigt, so beginne man mit der Stromabgabe in die Röhre. Bevor nicht diese Grenze des Vakuums erreicht ist, lohnt es nicht zu beginnen. Durch ein geeignet angebrachtes Glasfensterchen kann man die fortschreitende Entgasung sogar mit dem Auge feststellen, desgleichen die Temperatur der Antikathode und die Lage des Brennfleckes auf derselben beobachten. Somit kann man bei schlechtsitzendem Brennfleck sich unnötige Fehlaufnahmen ersparen.

Bei einem Vakuum von über 10^{-4} mm darf bei Ionenröhren kein Stromübergang mehr stattfinden. Beim weiteren Betrieb verfährt man praktisch so, daß man durch einen auf der Vorvakuumseite angebrachten Doppelhahn, der etwa 3 bis 5 cm Luft im Innern absperren kann, durch Öffnen des inneren Hahns diese kleine Menge atmosphärischer Luft einströmen läßt. Der Druck erhöht sich dann nur gerade so, daß nur noch vereinzelt Gasentladungen eintreten. Auf keinen Fall lasse man die atmosphärische Luft direkt eintreten. Die Gefahr ist groß, daß die Diffusionspumpen springen könnten,

ebenso daß Quecksilber in die Ölpumpen geschleudert werden könnte. Nach einiger Zeit ist die störende Gasabgabe und Zerstörung der Wasserhaut an den Wänden und der Antikathode so weit beendet, daß die Anzahl der zur sekundären Erzeugung der Kathodenstrahlen erforderlichen Gasmoleküle noch gerade ausreicht. Von dann ab ist durch Hahnregulierung das Auspumpen so weit einzuschränken, daß ein Ausgleich zwischen den durch Diffusion durch die dünnen Aluminiumfenster eintretenden Gasmoleküle und den abgepumpten eintritt. Sollte trotzdem das Vakuum zu gut werden, so genügt oft ein starker Stromstoß in die Röhre, um einige Gasreste an den Wänden noch aufzulockern. Unter normalen Umständen läuft dann die Röhre mehrere Stunden hindurch vollkommen ruhig, aber es empfiehlt sich, die Apparatur nicht vollkommen aus dem Auge zu lassen, sondern hin und wieder nachzuregulieren. Besonders bei einem Glühventilgleichrichterbetrieb kontrolliere man in kürzeren Abständen. Beim Betrieb mit Nadel-
schalter würde man jede Veränderung durch die Änderung der Tonhöhe des Funkenüberganges (s. S. 14) bemerken.

Verfügt man über zwei Metallröhren, so kann man in der Zwischenzeit, in der die Aufnahme an der einen stattfindet, die nötigen Vorbereitungen für die Inbetriebnahme der zweiten treffen (Zubereitung des Antikathodenmaterials, Herrichten der Debye-Scherreraufnahmekameras u. a.) und erspart viel Zeit. Nach Beendigung der ersten Aufnahme braucht nur die Leitung zur zweiten Röhre, die bereits schon evakuiert ist, gelegt zu werden und nach der Einzentrierung im Röntgenlicht und dem Einsetzen der photographischen Platten erfolgt ohne weiteres die neue Aufnahme. Nach beendetem Betrieb wird man im allgemeinen die Röhren unter Vakuum über Nacht belassen, nur falls die Aluminiumfenster gar zu dicht abgeschlossen haben und die Härte der Röhre nicht nachlassen will, läßt man sie unter Luft einige Zeit stehen. Die übrigen Pumpenleitungen wird man stets unter Luft nehmen, um den Quecksilberdampf in der beim Ausschalten noch heißen Diffusionspumpe schneller zur Kondensierung zu bringen und nicht das ganze Röhrensystem mit Quecksilber zu verseuchen.

III. Optimale Ausnutzung der Röntgenstrahlenintensität und Belichtungszeit.

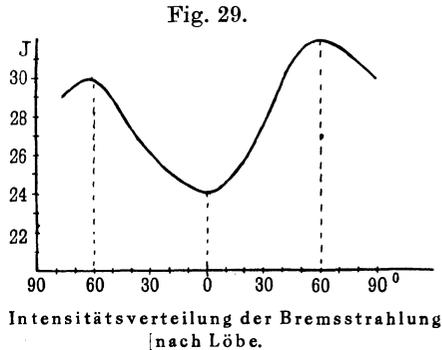
Eine der wichtigsten Fragen ist die nach der Größe der Energie der Röntgenstrahlung bei tangentialer, schiefer und senkrechter Emissionsrichtung. Nehmen wir der Einfachheit halber die Richtung des primären Kathodenstrahls senkrecht zur Antikathodenoberfläche an.

Bei Bremsstrahlung geht aus den Versuchen Löbes¹⁾ und aus den theoretischen Erörterungen Sommerfelds hervor, daß die Intensität der Röntgenstrahlung eine Funktion des Winkels ist, den der Kathodenstrahl aus dem Röntgenstrahl bildet. In Fig. 29

ist für harte Strahlen der Intensitätsverlauf der emittierten Strahlung in Abhängigkeit von dem Winkel zu der Kathodenstrahlenrichtung angegeben. Man ersieht daraus, daß das Intensitätsmaximum der Strahlung bei einem Winkel von 60° liegt. Bei 0° ist ein Minimum der Intensität vorhanden, welches nach der Theorie

Null sein sollte. Die trotzdem gemessene Strahlung dürfte auf die Eigenstrahlung der Antikathode zurückzuführen sein. Gegen 90° nimmt die Intensität der Bremsstrahlung wieder ab. Die Lage dieses Intensitätsmaximums ist eine Funktion der Härte der Strahlung. Nimmt diese zu, dann wandert das Maximum gegen kleinere Winkel.

In Fig. 30 ist die von der Theorie²⁾ geforderte Intensitätsverteilung eingezeichnet. Die Werte $\beta = 1/10, 1/5, 1/3$ ³⁾ dieser drei

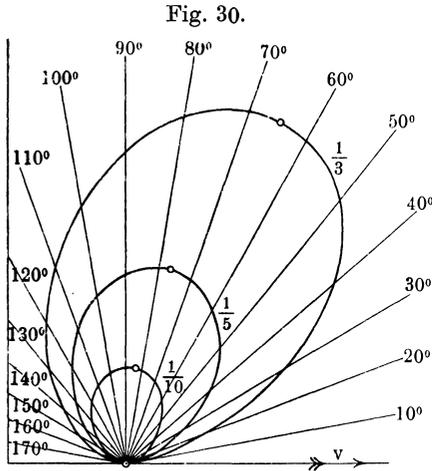


¹⁾ Löbe, Ann. d. Phys. 44, 1033 (1914).

²⁾ Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien. 3. Aufl. Friedr. Vieweg & Sohn Akt.-Ges., Braunschweig 1922.

³⁾ $\beta = \frac{v}{c}$, v = Eigengeschwindigkeit des Kathodenstrahls, c = Lichtgeschwindigkeit.

Kurven beziehen sich auf die anfängliche Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen, d. h. je höher die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen, desto größer ist die Härte der Röntgenstrahlung. Um den räumlichen Verlauf der Röntgenstrahlenemission zu erhalten, muß man sich die Kurven um die v -Achse gedreht denken.



Intensitätsverteilung der Bremsstrahlung nach Sommerfeld.

Um die räumliche Verteilung zu veranschaulichen, muß man die Kurven um die v -Achse rotiert denken.

Dagegen ist die Emission der Eigenstrahlung nach allen Richtungen hin gleich.

Man hat somit bei Berücksichtigung dieser Umstände die Möglichkeit, welche auch bei der Konstruktion der Röhrentypen (Fig. 15 und 18) ausgewählt worden war, eine reine monochromatische Strahlung ohne störende kontinuierliche Strahlung zu erzeugen. Andererseits kann man hohe Bremsstrahlenintensität ohne monochromatisches Licht durch Verwendung einer Antikathode

aus einem hochatomigen Metall, z. B. Wolfram, erzeugen, wenn man die Betriebsspannung knapp unterhalb der Anregungsspannung der K -Linie, in diesem Falle unter 69000 Volt, hält. Die bedeutend langwelligere L -Strahlung kann leicht abfiltriert werden.

Nun kommt ja von der ausgestrahlten Energie praktisch nur ein äußerst geringer Teil zur Verwendung. Denn für unsere Kristallgitteranalysen bzw. spektralanalytischen Untersuchungen brauchen wir nur ein kleines kreisförmiges bzw. spaltförmiges, ausgeblendetes, möglichst paralleles Röntgenstrahlenbündel. Man bedient sich daher für Kristallgitteranalysen am zweckmäßigsten etwa 8 cm langer Röhrenblenden mit einem Querschnitt von 1 bis 2 mm. Eine ideale Parallelrichtung des Primärbündels ist natürlich auch auf diese Weise nicht zu erzielen, doch ist für die gebräuchlichen Abstände des Präparats von der photographischen Platte oder dem Film (2 bis 6 cm) die Divergenz des Primärbündels genügend verringert.

Eine bessere Ausbeute an Intensität erhält man bei Verwendung von Spaltblenden. Eine mit Spaltblenden ausgeführte Aufnahme

kann als eine Anzahl übereinanderliegender, mit Punktblenden hergestellter Aufnahmen betrachtet werden. Daher tritt bei Verwendung von Spaltblenden bei Debye-Scherreraufnahmen nach der Pulvermethode eine Verstärkung der Interferenzlinien ein, während bei Laueaufnahmen ein größeres Stück des Kristalls durchleuchtet, wodurch man fortlaufend die übereinanderliegenden Reflexprojektionen eines ganzen Kristallstreifens erhält.

Weiter spricht für die Ausbeute der Reflexionsintensität die Präparatdicke eine Rolle. Man muß bei der Beurteilung dieser Frage einen Unterschied zwischen monochromatischem und Bremsstrahlenverfahren machen und bei dem ersteren wieder einen Unterschied, ob größere Kristallpartien durchstrahlt werden sollen, wie bei dem Debye-Scherrer- und Drehkristallverfahren, oder ob nur die Oberflächenschicht zur Reflexion beiträgt, wie beim Bragg- und bei dem Spektrometerverfahren.

Soll der ganze Kristall oder ein zu einem Stäbchen gepreßtes Kristallgitter mit monochromatischem Licht aufgenommen werden, so ist zu berücksichtigen, daß die reflektierte Intensität in diesem Falle stark vom Absorptionskoeffizienten des Präparats abhängt. Denn bei Präparaten mit einem sehr hohen Absorptionskoeffizienten, wie Wolfram, Uran, gelangen nur die Netzebenenpartien der äußersten Randzone des Kristalls bzw. Kristallstäbchens zur Reflexion, da die weiter im Innern liegenden Kristallpartien infolge zu starker Absorption der Strahlung gar nicht mehr durchleuchtet werden. Anders ist es bei leicht absorbierenden Körpern, z. B. Graphit. Hier kann man wohl annehmen, daß bei einem Stäbchen von 1 mm Durchmesser praktisch sämtliche Kristallpartien durchstrahlt werden und mithin reflektieren können. Dadurch wird die Belichtungszeit annähernd eine Funktion des Absorptionskoeffizienten, indem Stoffe mit hohem Absorptionskoeffizienten eine längere Belichtungszeit brauchen als Stoffe mit niedrigem Absorptionskoeffizienten.

Anders liegen die Verhältnisse bei der Durchleuchtung eines Kristalls nach der Lauemethode. Hier ist die Reflexionsintensität bei sehr leicht absorbierenden Substanzen, z. B. organischen Verbindungen, geringer als bei Stoffen mit hohem Absorptionskoeffizienten. Man kann hier die Belichtungszeit mit der Schichtdicke des Präparats regulieren und es ist das Verdienst von R. Gross¹⁾, rechnerisch die Abhängigkeit der Intensität der Laueflecke von der Präparatdicke, Blendenweite, Absorptionskoeffizient und Belichtungs-

¹⁾ R. Gross, Leipziger Ber. 70, 3 (1918).

zeit ermittelt zu haben. Es ist die optimale Schichtdicke eines Kristalls für ein Lauephotogramm:

$$t_{opt} = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{k \cos 2\alpha}{\mu_n (\sec 2\alpha - 1)},$$

wenn μ der Absorptionskoeffizient, α der Gleitwinkel, n die Ordnung der Interferenz und k die Spiegelungsfähigkeit der betreffenden Netzebenenschar ist. Der Durchmesser der kreisförmigen Blende muß dabei mindestens gleich $t \tan 2\alpha$ sein. Bei Berücksichtigung dieser Tatsache konnten sowohl von 0,8 cm dicken Eis- und Kampferkristallen als auch von 30 μ dicken Wolframkristallen gute Lauephotogramme in einer Stunde erzeugt werden.

Anders ist es bei dem Spektrometerverfahren, welches der Kristallstrukturbestimmungsmethode nach Bragg nachgebildet ist. Hier ist bei der Ausbeute der Reflexionsintensität eine weitgehende Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit des reflektierenden Kristalls zu beachten. Vergleicht man die Reflexion polierter und nichtpolierter Kristallflächen, so ist bei den letzteren manchmal eine mehrfache Reflexionsintensität wie bei den ersteren wahr-

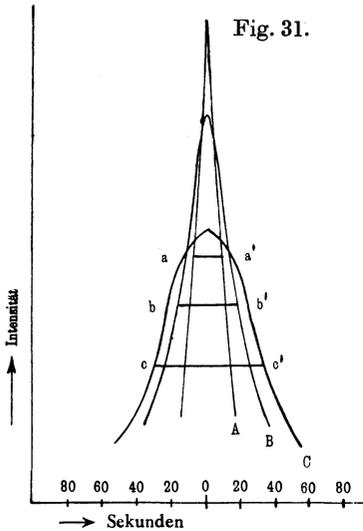


Fig. 31.

Tabelle 5.

Kristall	Gleitwinkel	Prozente der Reflexion
Kalkspat.		
c—c'	3° 0'	25,8
	5° 30'	20,8
	8° 0'	17,3
b—b'	3° 30'	35,4
	5° 30'	29,2
a—a'	7° 30'	25,3
	4° 0'	44,4
	5° 30'	43,1
	6° 30'	42,8
Steinsalz.		
Gespalten . . .	3°	24,8
	5°	15,3
	7°	13,0
Geschliffen und poliert . . .	3°	22,1
	5°	15,1
	7°	11,5

Reflexionsintensität nach doppelter Reflexion von den Spaltflächen des Kalkspats mit verschieden bearbeiteten Oberflächen.
c—c' ältere Spaltflächen, poliert, b—b' frische Spaltflächen, poliert, a—a' frische Spaltflächen, unpoliert.

zunehmen. Auch ist die Reflexionsintensität bei manchen Kristallen von der reflektierten Wellenlänge abhängig. Doch sind diese Schwankungen der Reflexionsintensität mit der Politur der Kristallfläche und der Größe der Wellenlänge von der Art des verwendeten Kristalls abhängig. In Tabelle 5 sind die an verschiedenen vorbehandelten Kristalloberflächen erhaltenen Anteile der reflektierten Intensität nach doppelter Spiegelung an zwei Kristallflächen angegeben. Der Kristall *c* hatte eine frisch gespaltene und dann polierte Oberfläche mit kleinen Sprüngen im Innern, Kristall *c'* war ein altes poliertes Spaltstück. Das Kristallpaar *b—b'* hatte frische polierte Spaltflächen. *a—a'* waren frisch gespalten, aber nicht poliert.

Während aber bei den Spaltflächen des Kalkspats eine starke Abhängigkeit der Reflexionsintensität¹⁾ von der Oberfläche in dem Sinn zu beobachten ist, daß frische Spaltflächen am stärksten, polierte am schwächsten reflektieren, erscheint hier das Reflexionsvermögen für alle Wellenlängen gleich. Dagegen tritt bei Steinsalz gerade die umgekehrte Erscheinung ein, indem zwar ein starker Gang der Intensität mit der Wellenlänge, jedoch nur eine sehr geringe Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Oberfläche zu bemerken ist. Das prozentuale Reflexionsvermögen ist bei Kalkspat größer als bei Steinsalz, so daß für spektrometrische Messungen die Verwendung des Kalkspats als Gitter dem Steinsalz vorzuziehen ist. Selbstverständlich müssen die als Gitterkristalle verwendeten Kristalle fehlerfrei sein und dürfen insbesondere keine Verwachsungen, Verbiegungen, Risse und Hohlräume aufweisen, da dies die Ursache von unscharfen und verzerrten Interferenzlinien sein kann. Für Spektrometerkristalle ist eine gute Spaltbarkeit Vorbedingung. Allgemein kommt man für die direkte Wellenlängenmessung mit einigen wenigen Verbindungen aus. In folgender Tabelle sind die gebräuchlichsten Gitterkristalle, ihre Spaltfläche und deren Gitterabstand angegeben.

Von den ersten sieben gelingt es ohne Mühe, gut ausgebildete Kristalle zu bekommen. Dagegen muß man bei Stearinsäure zu einem kleinen Kunstgriff greifen, den Müller²⁾ bei der Spektrometeruntersuchung der Fettsäuren angewendet hat. Man läßt die geschmolzene Fettsäure in dünner Schicht auf einem Deckgläschen erstarren, wodurch eine Parallelorientierung der Mikrokriställchen

¹⁾ Davis und Terril, *Philos. Mag.* **45**, 463 (1923).

²⁾ Müller, *Journ. Chem. Soc. London* **123**, 2043 (1923).

Tabelle 6.

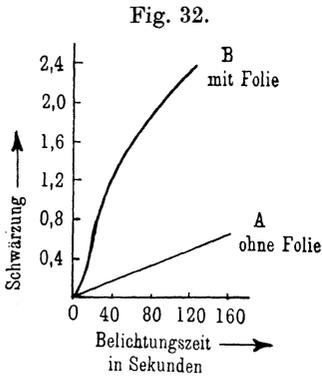
Kristall	Spaltfläche	$d \cdot 10^{-8}$ cm	Kristallsymmetrie
Steinsalz, NaCl	(100)	2,814	regulär
Kalkspat, CaCO ₃	(100)	3,028	rhomboedrisch
Quarz, SiO ₂	(100)	4,247	hexagonal
Gips, CaSO ₄ · 2H ₂ O	(010)	7,578	monoklin
Kaliumferrocyanid, K ₄ Fe(CN) ₆ · 3H ₂ O	(100)	8,04	„
Glimmer	(001)	10,1	„
Rohrzucker, C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	(100)	10,57	„
Stearinsäure, C ₁₈ H ₃₆ O ₂	(001)	38,7	hexagonal

eintritt. Die Spaltflächen der Stearinsäurekristalle mit den größten Gitterperioden liegen dann parallel zur Oberfläche des Deckgläschens, welches dann als Spektrometerkristall verwendet wird. Auf diese Weise kann man auch mit Hilfe der homologen Reihen der Fettsäuren Gitter von beliebiger Größe zwischen 22,3 Å (Caprinsäure) bis 47,8 Å (Behensäure) herstellen, da die Gitterkonstante der Spaltfläche mit steigender C-Atomzahl linear ansteigt.

Eine wichtige Rolle spielt das Material, mittels welchem die Interferenzerscheinungen der Röntgenstrahlen registriert werden. Es sind dies die photographische Platte oder Film, die Ionisations-

kammer und bei sehr starken Intensitäten, wenigstens für qualitative Beobachtungen, der Fluoreszenzschirm.

Als empfindlichstes photographisches Material sind doppelseitig begossene Filme allem anderen vorzuziehen. Die Einwirkung von Röntgenstrahlen auf eine photographische Schicht unterscheidet sich von der Wirkung des sichtbaren Lichtes nur dadurch, daß bei kleinen Intensitäten im ersten Falle vom Nullpunkt an strenge Proportionalität zwischen Schwärzung der photographischen Schicht und



Schwärzungskurve der photographischen Platte durch Röntgenstrahlen mit und ohne Verstärkerfolie.

der Belichtungszeit besteht, während beim sichtbaren Licht dies erst nach dem Überschreiten eines gewissen Schwellenwertes der Fall ist. Arbeitet man mit Verstärkerschirmen, dann tritt eine

Superposition beider Effekte ein, da hier zur Wirkung des Röntgenlichtes noch die Wirkung des sichtbaren Fluoreszenzlichtes der Verstärkerfolie kommt. Die sichtbare Fluoreszenz steigt mit der Röntgenintensität etwa linear an (Fig. 32).

Die Verstärkerwirkung ist desto größer, je größer und je kurzwelliger die Intensität der Röntgenstrahlung ist. Bei der kurzwelligsten erreichbaren Strahlung von etwa $\lambda = 0,1 \text{ \AA}$ ist der Verstärkerfaktor $V = \frac{t_0}{t_m} = 15$ ($t_0 =$ Expositionszeit ohne, $t_m =$ Ex-

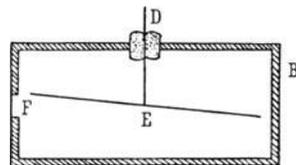
positionszeit mit Verstärkerschirm), während bei $\lambda = 0,7 \text{ \AA}$ der Verstärkerfaktor derselben Folie etwa $V = 2$ ist¹⁾. Bei kleinen Intensitäten und langwelliger Strahlung hat also eine Anwendung von Verstärkerfolien keinen Zweck. Aber man muß sich auch hüten, bei Interferenzbildern, aus denen man durch Berechnung des Intensitätsverhältnisses der einzelnen Reflexionsmaxima weitgehende Schlüsse über die Struktur des Kristallgitters ziehen will, Verstärkerschirme anzuwenden. Denn diese erhöhen höchstens den Kontrast des Bildes, indem sie starke Linien stark, schwache aber gar nicht verstärken. Folgende Zahlen mögen ein Bild über die Verstärkerwirkung einer Heydenfolie bei K-Silberstrahlung geben²⁾:

Schwärzung der Platte als

Maß für die Intensität	2,4	2,0	1,6	1,2	0,8	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1
Verstärkerfaktor beidieser										
Intensität	8,3	8,3	8,3	8,0	7,6	7,3	6,3	5,5	4,5	2,7

Für Spektrometernaufnahmen ist der photographischen Registrierung die ionometrische Messung der Interferenzmaxima gleichwertig. Sind nur Intensitätsunterschiede der gestreuten oder reflektierten Strahlung zu messen, dann wendet man am zweckmäßigsten die von Behnken³⁾ angegebene Ionisationskammer an, welche in Fig. 33 wiedergegeben ist. Doch sind die Ionisationsströme zugleich auch ein sehr empfindliches Reagens für Spannungsschwankungen, so daß bei genauen Ionisationsmessungen eine möglichst konstante Spannung Voraussetzung ist.

Fig. 33.



Ionisierungskammer.
F Aluminiumfenster,
B Bleimantel,
E Elektrode,
D Bernsteindurchführung.

¹⁾ Schlechter, Phys. Zeitschr. **24**, 29 (1923).

²⁾ Zitiert bei Ewald, Kristalle und Röntgenstrahlen. Springer, 1924.

³⁾ Vgl. dazu Behnken, Zeitschr. f. techn. Phys. **5**, 3 (1924).

Selenzellen als Indikatoren für Röntgenstrahlen sind erstens zu unempfindlich, zweitens zeigen sie im Gebiet von 0,1 bis 0,4 Å für homogene Strahlung große Empfindlichkeitssprünge. So ist eine Selenzelle bei 0,22 Å doppelt so empfindlich als bei 0,1 oder 0,4 Å, wenn man sie mit einer Ionisationskammer vergleicht¹⁾.

Als qualitatives Reagens auf Röntgenstrahlen wird meist der Fluoreszenzschirm (Bariumplatincyranur, Sidotblende, Zinksilikat, Calciumwolframat) dienen. Hier ist die Wirkungsweise der Röntgenstrahlung dieselbe wie bei den Verstärkerfolien. Kurzwelliges Röntgenlicht ruft eine stärkere Fluoreszenz hervor als langwelliges Licht bei gleicher Milliamperestärke. Beim Arbeiten mit monochromatischer Strahlung darf daher nicht aus der Fluoreszenzhelligkeit auf die Intensität der monochromatischen Strahlung geschlossen werden. Denn neben dem homogenen Anteil der Strahlung hat man stets noch ein kontinuierliches Spektrum, das meist bei viel kürzeren Wellen liegt und welches daher in erster Linie für die Fluoreszenzhelligkeit des Schirmes maßgebend ist. Wenn wir z. B. eine Röhre mit Kupferstrahlung bei 50 kV betreiben, dann haben wir neben der monochromatischen *K*-Kupferstrahlung bei 1,54 und 1,39 Å im viel kurzwelligeren Gebiet noch die Bremsstrahlung, deren Minimumwellenlänge bei 0,25 Å und deren Intensitätsmaximum bei etwa 0,5 Å liegt. Selbstverständlich wirken diese Wellenlängen um ein Vielfaches stärker auf den Fluoreszenzschirm ein als die langwellige monochromatische Kupferstrahlung.

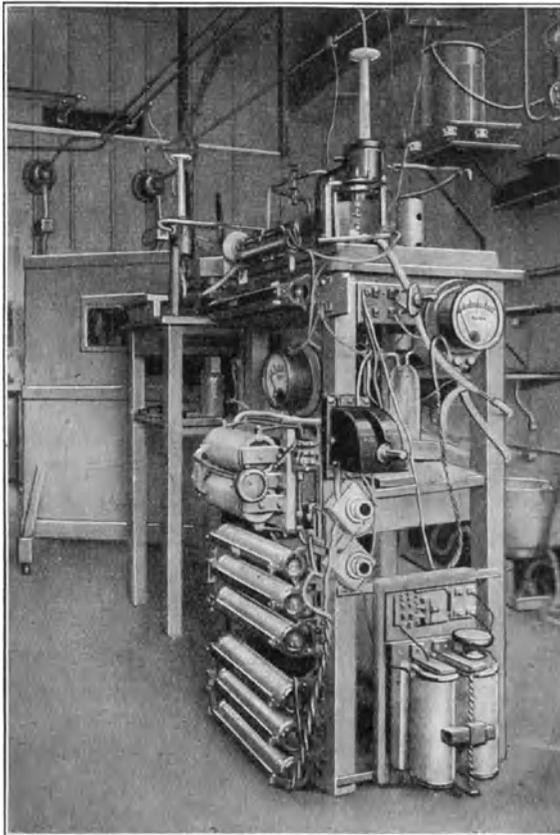
Schließlich ist noch die direkte Methode der Beobachtung der Laueflecke am Fluoreszenzschirm zu erwähnen, welche jedoch eine sehr starke primäre Intensität und eine große Empfindlichkeit des Fluoreszenzschirmes voraussetzt. Sie ist gut für Beobachtungen geeignet, welche eine zeitliche Veränderung eines Kristalls festhalten sollen. Dagegen ist sie nicht für quantitative Messungen geeignet und setzt ein außerordentlich scharfes und für sehr schwache Lichteindrücke empfindliches Auge voraus.

¹⁾ Küstner, Zeitschr. f. Phys. 27, 124 (1924).

IV. Laboratoriumseinrichtung und Strahlenschutz.

Als Arbeitstische für ein Röntgenlaboratorium dienen wohl am besten Tische, wie sie in Fig. 34 zu sehen sind. Die Höhe von 1,50 m hat den Vorteil, daß man die Hochspannungsleitungen, welche zur Kathode führen, noch etwa 50 cm oberhalb des Kopfes

Fig. 34.



Röntgenröhrentische.

Am weißen Porzellanisolator sind die beiden Haddingröhren erkennbar. Am Tisch sind Widerstände, Schalter, Meßinstrumente, Waschflaschen, Vorlagen usw. angebracht. Im Hintergrunde ist über den beiden Wanddurchführungen der Hochspannungsleitung die Parallelfunkenstrecke, rechts an der Wand die in Fig. 25 dargestellte Kühlanlage für die Kathode der Haddingröhre zu sehen.

hat, so daß im Bereich der experimentierenden Person keinerlei Spannungsquellen liegen, mit welcher sie zufällig in Berührung kommen kann. Denn das Rohr selbst und die Antikathode ist geerdet. Auch kann auf diese Weise ein bequemes Einzentrieren der Versuchsobjekte ermöglicht werden, während unter den Tischen noch Widerstände oder andere Apparate angebracht werden können. Zum Einzentrieren der Spektrographen und Aufnahmekameras ist eine vollständige Verdunklung des Raumes nötig. Nicht nur das Tageslicht, das Licht der Ventilröhren oder des Nadelgleichrichters, ist abzuschirmen, sondern auch alle Spalten, Türritzen usw. sorgsam lichtdicht abzuschließen. Die Intensität des ausgeblendeten Röntgenbündels ist so schwach, daß das geringste Zwielficht eine unnötige Überanstrengung der Augen bedeuten würde. Zur Verdunklung des Fensters ist ein schwerer Wollvorhang nötig, alle übrigen würden bei direkter Bestrahlung durch das Sonnenlicht leicht durchlässig sein. Da in unserem Falle das Hochspannungszimmer gegen den Experimentierraum ebenfalls lichtdicht abgeschlossen ist, liegt die Verwendung dieses Raumes als photographische Dunkelkammer äußerst nahe. In den Fig. 5a und 5b, S. 10 und 11, sieht man über dem Schalttisch die verschließbare Beobachtungsluke des im übrigen fensterlosen Hochspannungsraumes. Das Schließen der Klappe verwandelt ihn sofort in eine gute Dunkelkammer. Die Hochspannungsdurchführungen sind ebenfalls lichtdicht. Die mit Pertinaxmasse umgebenen Drosselspulen bilden zugleich die Wanddurchführungen. Da die Wand nur aus dünnen Brettern besteht, die noch zu den Halbisolatoren zu rechnen sind und für den Anstrich metallhaltige Farben vermieden wurden, waren sonstige Isolationen unnötig. Spannungen bis 250 kV sind vollkommen zulässig. In jeder Beziehung wurde eine Leistungsfähigkeit bis 250 kV vorgesehen. Nicht nur die Luftabstände von mindestens 50 cm zwischen stromführenden Teilen wurden eingehalten, sondern auch eine möglichst große Oberfläche der Hochspannungsschienen gewählt. Es wurden Messingrohre von 20 mm Durchmesser benutzt, die das lästige Sprühen so gut wie ganz unterdrückten.

Beim Einsetzen des Glimmens sind die Energieverluste zunächst noch gering, um beim Übergang zum Sprühen rasch anzusteigen. Nach Überschreitung eines Schwellenwertes bei etwa 30 kV, der „Anfangsspannung“, erfolgt der Anstieg annähernd proportional dem Quadrat der über 30 kV hinausgehenden Spannung.

Wegen der Sprühgefahr mußten alle scharfen Kanten vermieden werden. Die durch Schrauben oder scharfe Kanten besonders

gefährdeten Stellen umgaben wir mit einer Drahtspirale von etwa 4 cm Durchmesser und etwa 2 mm Abstand der Spiralinge voneinander, um dadurch die Feldstärke künstlich herabzudrücken. Eine Spirale von hinreichend enger Wicklung ersetzt vollkommen einen Röhrenleiter von gleichem Durchmesser.

Die Sprühverluste sind in zweierlei Hinsicht zu vermeiden. Erstens wegen der großen Energieverluste, die sich rechnerisch annähernd bestimmen lassen nach einer Formel, die Peek¹⁾ empirisch aufstellte und nachprüfte. Diese gilt für längere Hochspannungsleitungen und Spannungen oberhalb 40 kV ziemlich gut, für die verhältnismäßig kurzen Leitungen eines Laboratoriums kommt sie weniger gut zur Geltung, da hier mehr die lokalen Unregelmäßigkeiten der Oberfläche der Leitungen in Frage kommen, die sich rechnerisch sehr schwer erfassen lassen können. Die Verluste machen sich immerhin deutlich bemerkbar und betragen einige Prozent der erzeugten Energie. Der andere Grund liegt auf gesundheitlichem Gebiet. Mit jedem Sprühen ist eine starke Ozonentwicklung vorhanden, die sich zunächst in ihrer einschläfernden Wirkung auf den Experimentierenden äußert. Das weitere Stadium der Ozonvergiftung sind Magenbeschwerden und allgemeines Unwohlsein. Lassen sich die Sprühverluste nicht durch die oben angeführten Schutzspiralen beseitigen, so ist eine umfangreiche Durchlüftungsanlage unbedingt erforderlich.

Die Aufhängung der Hochspannungsleitung erfolgte durch wagenrecht an Eisenschienen befestigte Porzellanrohre von 180 cm Länge, so daß 60 cm Luftabstand gewahrt sind. Infolge der starken Staubsaugewirkung ist eine zeitweise Reinigung der Röhren und Isolatoren von Staub und Schmutz vorzunehmen, da sich sonst leicht Gleitfunken bilden könnten.

Die Stromabnahme erfolgt am besten durch breite Messingfederklammern mit gut abgerundeten Ecken. Eine einfache Verbindung nur mit gewöhnlichen Drähten auszuführen, ist nicht anzuraten, nicht nur wegen der unnötigen Sprühverluste, sondern hauptsächlich wegen der mangelhaften Betriebssicherheit.

Für drei Punkte ist in erster Linie bei der Anlage eines Röntgenlaboratoriums Sorge zu tragen. 1. Genügend freier Raum und Bewegungsmöglichkeit, 2. gute Durchlüftung des Laboratoriums wegen Ozon und Stickoxydbildung und 3. genügend guter Röntgenschutz. Arbeitet man mit längeren Wellen, wie Cu-Strahlung, dann sind

¹⁾ Zitiert bei Strecker, Hilfsbuch der Elektrotechnik 1921, S. 63.

nur die aus den Blenden austretenden Primärbündel nach dem Verlassen der Kamera noch genügend auszublenden, um die Schädigung der zufällig davon getroffenen Personen zu vermeiden. Die andere Strahlung wird hier schon vom Röhrenkörper quantitativ absorbiert. Anders ist es bei kürzeren Wellen, etwa unterhalb 0,75 Å. Für diese bietet auch der 1 cm starke Messingmantel der Röhre bei einer Betriebsspannung von 40000 Volt noch genügend Durchlässigkeit, so daß die seitwärts durchschlagende Strahlung z. B. genügt, wenig durchlässige Gegenstände scharf am Fluoreszenzschirm abzubilden. In diesem Falle muß man schon zu Bleischirmen oder anderen stark absorbierenden Schutzmaterialien greifen.

Ein Maß für den Röntgenschutz eines Materials ist die Zahl, welche die Dicke einer Bleischicht angibt, die die gleiche Röntgenabsorption zeigt. In folgender Tabelle sind eine Anzahl der gebräuchlichsten Schutzmaterialien angeführt, welche einer Bleischicht von 1 mm entsprechen¹⁾.

Tabelle 7.

	Nach Kaye und Owen mm	Nach Glocker mm
Bleigummi	2,3—4,0	3,0
Bleiglas	5,0—8,3	8,5—9,7
Aluminium	90	—
Messing	4,0	—
Stahl	6,7	—
Wasser	250	—
Gummi	20—50	—
Mörtel	77—250	—
Ziegel	100—330	80
Barytsteine	8,4—100	13,5
Hölzer	770—10 000	—

Da beim Bau von Schutzkästen aus diesem Material die Wärmeleitfähigkeit dieser Stoffe eine große Rolle spielt, soll diese ebenfalls angegeben sein.

Holz	0,0003 Zentigrad/cm
Gummi	0,0008—0,0011 „
Bleigläser	0,0002 „
Bleigummi	0,0003—0,0007 „
Blei	0,08 „

¹⁾ Glocker, Naturwissenschaften **12**, 169 (1924); Kaye und Owen, Chem. News **127**, 122 (1923). Proc. Physical Soc. London **35**, 33, D. 1923.

Die Durchschlagsgrenze für Gummi beträgt 5 bis 12 kV pro Millimeter.

Man ersieht aus den Zahlen, daß erst 10 mm Bleiglas denselben Schutz gewähren wie 1 mm Blei.

Eine besondere Gefährdung des Experimentators besteht beim Einzentrieren der Präparate usw. Stets vermeide er auch noch so kurze Zeiten im direkten Röntgenstrahl mit irgend einem Körperteil zu sein. Eine Bleiglasbrille zum Schutze der Augen ist bei Strahlen von unterhalb $1,2 \text{ \AA}$ sehr angebracht. Brillenträger sind durch ihre Augengläser gegen weiche Strahlung oberhalb $1,2 \text{ \AA}$ so gut wie geschützt. Mit unbewaffnetem Auge einen Röntgenstrahl von beliebiger Härte zu betrachten, ist unter allen Umständen gefährlich, man vergesse nie eine Bleiglasscheibe in den Strahlengang zu stellen. Da des weiteren die Finger stark gefährdet sind, wähle man deshalb die Stellschrauben der Apparate stets so, daß sie etwa 5 bis 6 cm unterhalb der Ebene des Primärbündels zu liegen kommen. Bleigummihandschuhe machen das Einstellen fast zur Unmöglichkeit, da sie zu unhandlich sind. Für Metallröhren bis zu 40 kV ist, wie schon bemerkt, nur das direkte Primärbündel gefährlich, außerhalb desselben sind keine besonderen Schutzmaßnahmen erforderlich.

Namen- und Sachregister.

- Abschrägung der Antikathode** 20.
Absorptionsbandkante 42.
Absorptionsfilter 42.
Absorptionskoeffizient 49.
Aluminium 58.
— -fenster 18 ff., 31, 41.
— -folie 42.
Anfangsdruck 32.
Anfangsspannung 56.
Antikathode 18 ff., 43.
—, **Kühlung der** 5, 36.
—, **Material der** 2.
—, **Oberfläche der** 37, 43.
Arbeitstisch 55.
- Barytstein** 58.
Becker, K. III, 3.
Behnken 53.
Belichtungszeit 7, 49.
Betriebsvakuum 31, 45.
Blei 58.
— -glas 58.
— -gummi 58.
Böhm 40.
Braggsches Gesetz 28.
Braun 27.
Bremsstrahlung 2, 28, 47.
Brennfleck 20, 37.
—, **punktförmig** 21.
—, **strichförmig** 22.
- Crawfordpumpe** 32.
- Davey** 7.
Davis 51.
Debye 18.
Dewargefäß 35.
Diffusion 31, 43, 46.
Diffusionspumpe 32, 34.
- Doppelhahn** 45.
Drosselspule 15, 27.
Dunkelkammer 11.
Durchführungsisolator 44.
Durchlässigkeit für Röntgenstrahlen 1, 58.
- Ebert, H.** 34.
Einsteinsche Gleichung 1, 28.
Elektrometer 27.
Elektronenstrom 1.
Erdung der Antikathode 18 f.
— **der Ventilrohre** 17.
— **des Transformatorenkernes** 11.
- Feinpumpe** 36.
Fensteranzahl 26.
Fensterkanal 20.
Fenstermaterial 42.
Film 52.
Filter 42.
Fluoreszenzschirm 54.
Funkenstrecke 28.
- Gaedepumpe** 32, 34.
Gantzkow 24.
Gasdruck 4.
Gasentladungsröhren 4.
Geisslerpumpe 32.
Gerlach 21.
Gerykpumpe 32.
Gips 52.
Gittermaterial 52.
Gleichrichter 12.
— -**Nadelschalter** 12.
— -**Ventilröhren** 14 ff.
Glimmer 52.
Glocker 43, 58.
Glühkathodenröhren 21 ff.

- Götz 31.
Graetzsche Schaltung 15.
Grenzvakuuum 32.
Gross 49.
- Hadding 18.
— -röhre 18.
Hartglas, Durchlässigkeit von 1.
Heizstromstärke für Coolidge-
röhren 9.
— für Ventilrohre 14.
Heiztransformator 9 ff.
Heydenfolie 53.
Hochspannungs-Anlage 7 ff.
— -Isolation 38, 43, 57.
— -Messungen 27 ff.
— -Quellen 7.
— -Raum 11, 56.
- Impulsstrahlung 1.
Intensitätsmaximum 47.
— der Impulsstrahlung 2.
Interferenz 3.
Ionenröhren 17 ff.
Ionisierungskammer 52 f.
Isolation 38, 43.
Isshiki 31.
- Jaeger 30.
- Kaliumferrocyanid 52.
Kalkspat 50 ff.
Kapselpumpe 32.
Kathode 18 ff.
Kathodenstrahlenofen 5, 37.
Kathodenspiegelzentrierung 43.
Kathodenstrahlen 4.
Kaufmannpumpe 32.
Kaupp 43.
Kaye 58.
Kondensationspumpen 34.
Kontinuierliche Strahlung 2.
Kristalle für Spektrographen 52.
Krümmungsradius für Kathoden-
spiegel 20.
Kühlanlage 36.
— für Antikathode 36.
- Kühlanlage für Kathode 39.
Kunstgriffe 40 ff.
- Laboratoriumseinrichtung 55.
Langmuirpumpe 34.
Laue, v. 3.
Lebensdauer für Durchführungs-
isolator 44.
— für Kathodenspiegel 20.
Leitungen, Glas- 35, 40.
—, Hochspannungs- 57.
Lichtbogenpumpe 32.
Lindemann 17.
Luftpumpen 32.
- Marineleim 41.
Materialprüfungen 38.
McLeod 36.
Meßgenauigkeit für Spannungen 28.
Metallröhrentypen 17 ff.
Molekularluftpumpe 32.
Monochromatische Strahlung 2.
Moseleysches Gesetz 3.
Müller, A. 51.
- Nadelschalter 12.
Niclassen 40.
- Oberflächenbeschaffenheit von Kri-
stallen 50.
Ölpumpe 32, 36.
Ozonentwicklung 15, 57.
- Parallelfunkenstrecke 28.
Peek 57.
Pertinax 10, 38.
Photoelektronen 4.
Phragmen 37.
Picein 41 ff.
Präparatdicke 49.
Prasseln des Nadelschalters 14.
Preßluftantrieb für Kathoden-
kühlung 40.
- Quecksilberfänger 35.
Quecksilberpumpe 32.
- Rausch v. Traubenberg 18.
Reflexionsintensität 50.

- Röhrenblende 42, 48.
Rohrzucker 52.
Röntgenschutz 58.
Röntgenstrahl, kontinuierlich 1.
—, monochromatisch 2, 48.
- Sauggeschwindigkeit 34.
Saugleistung 32.
Schaltskizze für Hochspannungs-
anlage 9.
— für Nadelschalter 13.
— für Ventilgleichrichter 15.
— für Wechselbetrieb 16f.
Schaukelpumpe 32.
Scherrer 18.
Schlagweite 29.
Schlechter 53.
Schleede 24.
Schneidenspektrograph 28.
Scholzkondensationspumpe 32.
Schutzmaßnahmen gegen Hoch-
spannung 55.
— gegen Röntgenstrahlen 58.
—, gesundheitliche 57f.
Seemann 28.
—-Spektrograph 28.
Selenzelle 54.
Siegbahn 4, 18, 22, 40.
Siegelack 41.
Simon 40.
Simson 40.
Sommerfeld 47.
Spaltblende 48.
Spannungsmessung 27f.
Spannung, optimale 26.
— für Glühkathodenröhren 26.
— für Metallröhren 26.
Spartransformator 9.
Spektrograph 27.
Spiegelungsfiguren 43.
Sprengepumpe 32.
Sprühen 27.
Sprühverluste 31, 56.
- Staubsaugewirkung 45.
Stearinsäure 51f.
Steinsalz 50 ff.
Stintzing 23.
Strahlenschutz 58.
Stufenstrahlpumpe 32.
Stufentransformator 9.
- Terril 51.
Thermoionen 4.
Töplerpumpe 32.
Tourenzahl für Pumpen 32.
Transformator 7 ff.
—, Heiz- 9.
—, Hochspannungs- 8.
—, Spar- 9.
—, Stufen- 9.
—, Zwischen- 9.
- Ullrey 2.
Umwandlung von hochgespanntem
Wechselstrom in Gleichstrom
12 ff.
- Vakuum, optimale 4, 45.
—-Anlage 31.
—-dichte Verkittung 40.
—-regulierung 45.
Ventilröhre 14.
Ventilröhrengleichrichter 12.
Verdunkelungsvorhang 56.
Verkitten mit Marineleim 41.
— mit Picein 41 ff.
— mit Siegelack 41.
Verstärkerfolie 52.
Volmerpumpen 32, 34.
Voltmeter für Hochspannung 30.
Vorpumpe 32.
- Wagerechte Antikathode 20.
Wasserkühlung 5, 36, 39.
Wasserstrahlpumpe 32.
Wever 24.
Whitehead 31.
Zehnder 17.

Bisher erschienene Hefte der „Sammlung Vieweg“

- Heft 16. Dr. Siegfried Valentiner-Clausthal: *Anwendung der Quantenhypothese in der kinetischen Theorie der festen Körper und der Gase. In elementarer Darstellung.* 2. erweiterte Auflage. Mit 5 Abbildungen. M. 4,50.
- Heft 17. Dr. Hans Witte-Wolfenbüttel: *Raum und Zeit im Lichte der neueren Physik.* Eine allgemeinverständliche Entwicklung des raumzeitlichen Relativitätsgedankens bis zum Relativitätsprinzip der Trägheitssysteme. 3. Aufl. Mit 18 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 18. Dr. Erich Hupka-Tsingtau: *Die Interferenz der Röntgenstrahlen.*
- Heft 19. Prof. Dr. Robert Kremann-Graz: *Die elektrolytische Darstellung von Legierungen aus wässerigen Lösungen.* Mit 20 Abbildungen. M. 2,50.
- Heft 20. Dr. Erik Liebreich-Berlin: *Rost und Rostschutz.* Mit 22 Abbild. M. 3,25.
- Heft 21. Prof. Dr. Bruno Glatzel-Berlin: *Elektrische Methoden der Momentphotographie.* Mit dem Bild des Verfassers und 51 Abbildungen. M. 4,—.
- Heft 22. Prof. Dr. med. et phil. Carl Oppenheimer: *Stoffwechselfermente.* M. 2,50.
- Heft 23. Dr. Alfred Wegener-Hamburg: *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane.* 3. gänzlich umgearbeitete Auflage, erschien als Bd. 66 unserer Sammlung „Die Wissenschaft“.
- Heft 24. Dr. W. Fahrion-Feuerbach-Stuttgart: *Die Härtung der Fette.* 2. vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 5 Abbild. M. 6,—.
- Heft 25. Prof. Dr. A. Wassmuth-Graz: *Grundlagen und Anwendungen der statistischen Mechanik.* 2. Auflage. Mit 4 Abbildungen. M. 4,—.
- Heft 26. Dr. A. Lipschütz-Bern: *Zur allgemeinen Physiologie des Hungers.* Mit 39 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 27. Prof. Dr. C. Doelter-Wien: *Die Farben der Mineralien, insbesondere der Edelsteine.* Mit 2 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 28. Dr. W. Fahrion-Feuerbach-Stuttgart: *Neuere Gerbemethoden und Gerbetheorien.* M. 4,50.
- Heft 29. Dr. Erik Hägglund-Bergvik (Schweden): *Die Sulfitablauge und ihre Verarbeitung auf Alkohol.* 2. Auflage. Mit 6 Abbild. und einer Tafel. M. 3,50.
- Heft 30. Dr. techn. M. Vidmar-Laibach: *Moderne Transformatorentragen.* Mit 10 Abbildungen.
- Heft 31. Dr. Heinr. Faßbender-Berlin: *Die technischen Grundlagen der Elektromedizin.* Mit 77 Abbildungen. M. 4,—.
- Heft 32/33. Prof. Rudolf Richter-Karlsruhe: *Elektrische Maschinen mit Wicklungen aus Aluminium, Zink und Eisen.* Mit 51 Abbildungen. M. 6,—.
- Heft 34. Obering. Carl Beckmann-Berlin-Lankwitz: *Haus- und Geschäfts-Telephonanlagen.* Mit 78 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 35. Dr. Aloys Müller-Bonn: *Theorie der Gezeitenkräfte.* Mit 17 Abb. M. 3,—.
- Heft 36. Prof. Dr. W. Kummer-Zürich: *Die Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen.* Mit 7 Abbildungen. M. 2,50.
- Heft 37. Dr. Reinhold Rieke-Charlottenburg: *Die Arbeitsmethoden der Silikatchemie.* 2. Auflage. Mit 4 Abbildungen. M. 3,50.
- Heft 38. Prof. Dr. A. Einstein: *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie. (Gemeinverständlich.)* 14. Auflage. (61.–65. Tausend.) Mit 4 Fig. M. 3,—.
- Heft 39/40. Dr. Richard Grammel-Danzig: *Die hydrodynamischen Grundlagen des Fluges.* Mit 83 Abbildungen. M. 5,—.
- Heft 41/42. Ingenieur Georg Duffing-Berlin: *Erzwungene Schwingungen bei veränderlicher Eigenfrequenz u. ihre technische Bedeutung.* Mit 23 Abb. M. 4,75.
- Heft 43. Dr. Robert Schwarz-Freiburg i. Br.: *Feuerfeste und hochfeuerfeste Stoffe.* 2. vermehrte Auflage. Mit 10 Abbild. M. 2,—.
- Heft 44. Dr. Iwan Döry: *Einphasenbahnmotoren.* Mit 75 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 45. Prof. Dr. K. Fajans, *Radioaktivität und die neueste Entwicklung der Lehre von den chemischen Elementen.* 4. Auflage. Mit 11 Abb. u. 14 Tab. M. 5,—.
- Heft 46. Dr. Bruno Alexander-Katz, *Quarzglas und Quarzgut.* Mit 43 Abb. M. 2,50.