

Werk

Titel: Emissions- und Absorptionsspektren der Röntgenstrahlen

Autor: Siegbahn, Manne

Ort: Berlin

Jahr: 1917

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X_0005|log411

Kontakt/Contact

[Digizeitschriften e.V.](#)
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

✉ info@digizeitschriften.de

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

Herausgegeben von

Dr. Arnold Berliner und Prof. Dr. August Pütter

Fünfter Jahrgang.

10. August 1917.

Heft 32.

Emissions- und Absorptionsspektren der Röntgenstrahlen.

Von Dr. Manne Siegbahn, Lund,
Physikalisches Institut der Universität.

1. Einleitung.

Nachdem jetzt die Untersuchungen über die Röntgenspektren der chemischen Elemente so weit fortgeschritten sind, daß eine Orientierung über das ganze Gebiet möglich ist, scheint es angemessen, einen Rückblick über den Entwicklungsgang und die wichtigsten Ergebnisse dieser neuen Errungenschaft zu werfen. Es ist dies um so mehr erwünscht, als die Früchte dieser wissenschaftlichen Zweige in weit größeren Kreisen von Nutzen sein dürften, als nur in denen, welche sich bisher an der Erforschung dieser Fragen beteiligt haben. Besonders denken wir dabei an die Bedeutung der röntgenspektroskopischen Methoden für den Chemiker. Wenn auch die älteren Untersuchungen, z. B. von *Barkla* und seinen Mitarbeitern, gezeigt hatten, daß jedes chemische Element durch die von ihm bei geeigneter Erregung ausgesandten Röntgenstrahlen charakterisiert werden konnte, war diese Tatsache für chemische Zwecke nicht gut verwertbar. Die Lauesche Entdeckung der Interferenz der Röntgenstrahlen in Kristallen zusammen mit den experimentellen Arbeiten von *Bragg* u. a. hat eine wirkliche Spektroskopie der Elemente innerhalb der kurzen Wellen, wie sie die Röntgenstrahlen darstellen, ins Leben gerufen.

2. Unsere älteren Kenntnisse über die „charakteristischen“ Röntgenstrahlen der chemischen Elemente.

Die Röntgenstrahlen entstehen bekanntlich dadurch, daß die in einem Vacuumrohr von der Kathode ausgeschleuderten negativen Partikeln (Elektronen, Kathodenstrahlen) mit großer Geschwindigkeit auf ein Hindernis (die Antikathode, bei den ersten Röhren sogar die Rohrwandung) aufprallen. Wie die spätere Forschung gezeigt hat, ist die beim Stoß der Kathodenstrahlen entstehende neue Strahlung von ganz derselben Art wie die Lichtwellen, nur sind die Wellenlängen weit kleiner. Während nämlich die früheren (sichtbaren) von der Größenordnung 0,000 04—0,000 08 cm sind, bewegen sich die Wellenlängen bei den Röntgenstrahlen zwischen den Grenzen 0,000 000 12 bis 0,000 000 008 cm und bei den wesensgleichen γ -Strahlen sogar bis herunter zu 0,000 000 007 cm.

Ehe man noch imstande war, die Wellenlängen der Röntgenstrahlen zu bestimmen, wurde zu ihrer

Charakterisierung die Durchdringungsfähigkeit benutzt, und zwar wurde durchweg bei solchen Bestimmungen die Absorbierbarkeit in Aluminium verwandt. Dabei nimmt man an, daß die Intensität der Strahlung J nach Durchdringen einer Platte von der Dicke d , wenn die einfallende Strahlung J_0 war, bestimmt wird durch eine Gleichung von der Form:

$$J = J_0 e^{-\mu d} \dots \dots \dots (1)$$

μ wird der Absorptionskoeffizient genannt. Im allgemeinen bezieht man die Absorption statt auf Längeneinheit auf Masseneinheit. Der so erhaltene Massen-Absorptionskoeffizient $\frac{\mu}{\rho}$ spielt für die älteren Messungen dieselbe Rolle wie jetzt die Wellenlängenangaben. Es sei hervorgehoben, daß eine Gleichung wie (1) nur dann gilt, wenn die Strahlung einigermaßen homogen ist.

Um die Ergebnisse der älteren Röntgenforschung überblicken zu können, ziehen wir die schematische Darstellung in Fig. 1 heran. Das vom Röntgenrohr kommende Strahlenbündel trifft die Platte AB und wird von dieser zum Teil durchgelassen. Außerdem aber entstehen beim Auftreffen noch drei verschiedene Strahlengattungen, Sekundärstrahlen:

1. zerstreute X-Strahlung,
2. charakteristische Röntgenstrahlung,
3. korpuskulare (β -) Strahlung.

Von diesen drei Strahlungen interessiert uns jetzt nur die „charakteristische“ Strahlung, so genannt, weil die Eigenschaften (Absorbierbarkeit, Wellenlänge) derselben nur von dem Sekundärstrahler AB abhängen und für dieses Element bezeichnend sind. Die früheren Untersuchungen haben gezeigt, daß diese Strahlung homogen ist, d. h. sie folgt streng der Gleichung (1). Die Bestimmung des Absorptionskoeffizienten μ dieser charakteristischen Strahlung für eine Reihe von Elementen bildet den Gegenstand einer größeren Zahl von Arbeiten. Als allgemeine Ergebnisse stehen fest: 1. Jedes Element besitzt wenigstens zwei homogene Strahlungen (nach *Barkla* K - und L -Reihen). 2. Beim Fortschreiten zu Elementen mit größeren Atomgewichten werden die charakteristischen Strahlen härter, d. h. die Absorptionskoeffizienten kleiner, und zwar gilt dies sowohl für die K - wie für die L -Reihe.

Eine Zusammenstellung der Absorptionskoeffizienten findet sich in Tabelle 1. Es sind außerdem eingetragen die Werte der Halbwertschicht, d. h. die Dicke einer Al-Platte, die die Hälfte der einfallenden Strahlung durchläßt.

Tabelle I.
Absorptionskoeffizient der charakteristischen
Strahlung der Elemente im Aluminium.

Element	$\rho \mu$ cm/gm		Halbwert-Schicht in 10^{-2} cm		Element	$\rho \mu$ cm/gm		Halbwert-Schicht in 10^{-2} cm	
	K-Reihe	L-Reihe	K-Reihe	L-Reihe		K-Reihe	L-Reihe	K-Reihe	L-Reihe
13 Al	580		0,04		42 Mo	4,8		5,3	
20 Ca	435		0,05		47 Ag	2,5	700	10,3	0,04
24 Cr	136		0,19		50 Sn	1,57		16,4	
25 Mn	100		0,26		51 Sb	1,21	435	21,2	0,06
26 Fe	88,5		0,29		53 J	0,92	300	28	0,09
27 Co	71,6		0,36		56 Ba	0,8	224	32	0,12
28 Ni	59,1		0,43		58 Ce	0,6		43	
29 Cu	47,7		0,54		74 W		30		0,86
30 Zn	39,4		0,65		78 Pt		22,2		1,16
33 As	22,5		1,14		79 Au		21,6		1,19
34 Se	18,5		1,39		82 Pb		17,4		1,48
35 Br	16,3		1,57		83 Bi		16,1		1,6
37 Rb	10,9		2,35		90 Th		8,0		3,2
38 Sr	9,4		2,7		92 U		7,5		3,4

Die frühere Forschung hatte noch einige wichtige Eigenschaften der charakteristischen Strahlung

Zeitschrift berichtet worden. Für unsere Zwecke genügt es darum, zu erinnern, daß ein Röntgenstrahl von der Wellenlänge λ , der eine Kristallfläche unter dem Glanzwinkel φ trifft, nur dann gespiegelt werden kann, wenn die Voraussetzung

$$n \lambda = 2 d \sin \varphi \dots (2)$$

erfüllt ist. d ist der Abstand zwischen der Atomebene parallel der spiegelnden Fläche und der spiegelnden Fläche (welche selbst eine Atomebene sein muß); n ist eine kleine ganze Zahl, die die „Ordnung“ der Reflexion angibt. Die Spiegelung geht immer so vor sich, daß der Einfallswinkel und der Ausfallswinkel gleich sind.

Die Bestimmung des zu einem gegebenen Röntgenstrahl gehörigen Reflexionswinkels φ gestattet daher nach Gleichung (2) die Berechnung der Wellenlänge λ , vorausgesetzt, daß d bekannt ist. Der Wert von d wurde zuerst für Steinsalz von Bragg bestimmt. Nimmt man an, daß die Na- und Cl-Atome abwechselnd in den Ecken von Kuben liegen, so muß einerseits ρd^3 das Gewicht pro Elementarkubus darstellen ($\rho = \text{Dichte} = 2,17$), andererseits wissen wir, daß 1 Grammol, d. h. 23,05 + 35,45 g der Substanz N (Avogadros Zahl) Moleküle enthält. Das Gewicht pro Molekül daher $\frac{58,50}{N}$ und pro Atom im Mittel $\frac{58,50}{2N}$.

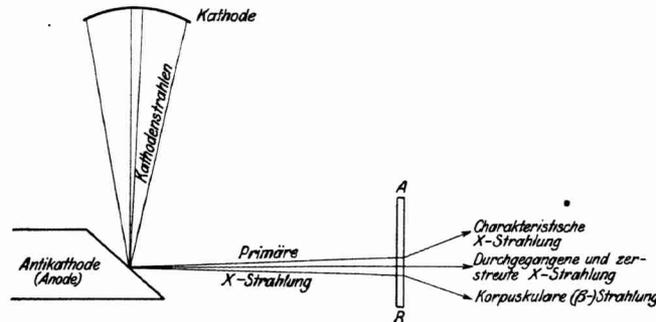


Fig. 1.

lung erkannt, die wir aber lieber im Lichte der neueren Ergebnisse darlegen wollen. Nur sei auf einen Befund von Kaye hingewiesen, der für die Weiterentwicklung von größter Bedeutung ist und der besagt, daß die charakteristische Strahlung ebensogut durch Kathodenstrahlen direkt ausgelöst werden könne wie durch primäre Röntgenstrahlen. Da in dieser Weise, d. h. durch Anbringung des betreffenden Stoffes als Antikathode in einem Röntgenrohr weit kräftigere Strahlen erhalten werden können, ist dieses Verfahren später am meisten benutzt worden.

3. Die Grundlage der röntgenspektroskopischen Methoden.

Über die Interferenz der Röntgenstrahlen in Kristallen ist früher von berufener Seite in dieser

Wir erhalten dann zur Bestimmung von d

$$\rho d^3 = \frac{58,50}{2N}$$

Leider ist zurzeit der Wert von N nicht hinreichend gut bekannt. Man erhält etwa

$$d = 2,81 \cdot 10^{-8} \text{ cm.}$$

Von einer Reihe von Autoren wurde der Wert zu

$$d = 2,814 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$$

gesetzt, wie er zuerst von Moseley berechnet ist und von E. Wagner als Ausgangswert vorgeschlagen wurde.

Durch vergleichende Messungen können dann die Gitterkonstanten anderer Kristalle auf diesen Wert bezogen werden. Von den bis jetzt am

meisten für spektroskopische Zwecke benutzten Kristallen sei angegeben (Spaltflächen):

	$d \cdot 10^{-8}$ cm
Kalkspat	3,028
Gips	7,621
Ferrocyankalium	8,454
Glimmer	etwa 9,9
Rohrzucker	etwa 10,5

4. Methoden der Wellenlängenbestimmung bei Röntgenstrahlen.

Die Benutzung der Gleichung (2) für Wellenlängenbestimmungen erfordert eine Methode, mit deren Hilfe das Eintreten von Reflexion an der Kristallebene bestimmt werden kann. Bei den ersten Untersuchungen wurde dies mit Hilfe einer Ionisationskammer gemacht, und zwar in der Weise, daß an einem gewöhnlichen Spektrometer das Kollimatorrohr durch zwei hintereinander gestellte Spalte ersetzt wurde; der reflektierende Kristall wurde am Spektromertische montiert und statt des Fernrohrs die Ionisationskammer eingesetzt. Durch gleichzeitiges Drehen des Kristalls und der Ionisationskammer — die letztere immer um den doppelten Winkel — konnten dann die Winkelwerte φ aufgefunden werden, bei denen Reflexion eintrat. Allerdings ist diese Methode ziemlich mühsam und zeitraubend, noch dazu die Apparate nicht leicht zu handhaben. Durch geeignete Maßnahmen kann zwar die Arbeit erleichtert werden; wir erwähnen die selbstregistrierende Anordnung von Compton, doch steht bisher dieses Verfahren für spektroskopische Zwecke nicht auf der Höhe der zweiten, jetzt darzulegenden Methode.

Diese Methode benützt die Eigenschaft der Röntgenstrahlen, eine photographische Platte zu schwärzen. Stellt man hinter dem Kristalle senkrecht zur Verlängerung des einfallenden Strahls eine photographische Platte auf, so wird diese außer von der durch den Kristall direkt hindurchgegangenen Strahlung noch von einer Reihe am Kristalle reflektierter Strahlen geschwärzt. Die Voraussetzung, daß auch zu jeder im primären Strahlenbündel vorhandenen Wellenlänge ein Winkel φ nach der Bedingung $n\lambda = 2d \sin \varphi$ wirklich vorkommt, kann durch stetiges Drehen des Kristalles erfüllt werden¹⁾.

5. Spektrum eines technischen Röntgenrohres.

Wir gewinnen einen guten Einblick in die Natur der Röntgenspektren, wenn wir eine Spektralaufnahme bei einem gewöhnlichen technischen

¹⁾ Die Laue-Diagramme, die mit stillstehenden Kristallplatten und durchgehendem Licht erhalten werden, sind hiervon zu unterscheiden. Diese Aufnahmemethode beruht eben darauf, daß ein gewöhnliches Rohr ein kontinuierliches Spektrum aufweist, wodurch zu jedem vorgeschriebenen Winkel (innerhalb gewisser Grenzen) immer im Primärstrahl eine passende Wellenlänge sich findet. Bei dem oben beschriebenen Verfahren gilt es dagegen, zu einer vorausgegebenen Wellenlänge den entsprechenden Winkelwert aufzusuchen.

Röntgenrohre heranziehen. Fig. 2 zeigt eine selbstregistrierte Aufnahme (A. H. Compton), wenn an das Rohr mit Wolframantikathode eine Spannung von maximal etwa 40 000 Volt angelegt wurde. Als Gitter diente dabei ein Kalkspatkristall. Aus dem Spektrogramme ist zu sehen, daß das Röntgenlicht aus einem kontinuierlichen Spektrum mit einigen darüber gelagerten Spektrallinien zusammengesetzt ist. Ferner entnehmen wir aus der Aufnahme, daß das kontinuierliche Spektrum gegen kürzere Wellen (bei etwa $\lambda = 0,3 \cdot 10^{-8}$ cm) eine scharfe Grenze zeigt, während die Intensität nach längeren Wellen allmählich abnimmt, und zwar wird dies wesentlich durch

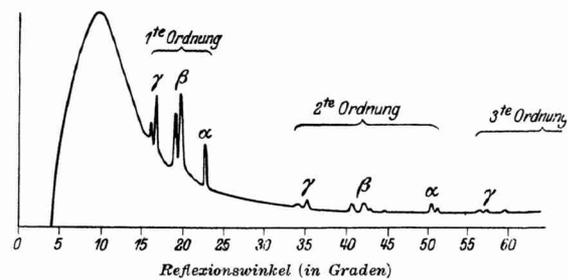


Fig. 2. Spektrum eines technischen Röntgenrohres (Coolidgerohr mit Wolframantikathode). Nach Compton.

die in der Glaswand des Rohres herbeigeführte Absorption der langen Wellen bedingt. Bezüglich der Grenze gegen kürzere Wellen kann man durch Aufnahmen bei verschiedenen Röhrenspannungen zeigen, daß mit steigender Spannung die Grenze nach kürzeren Wellen rückt. Wir kommen später auf diese Fragen zurück.

In erster Linie interessieren uns jetzt die überlagerten Spektrallinien. Wie nach der grundlegenden Gleichung (2) zu erwarten ist, treten sämtliche Linien in mehreren Ordnungen auf. Wie auch theoretisch gezeigt werden kann, nimmt die Intensität mit steigender Ordnungszahl ab. Es verhalten sich zum Beispiel bei Steinsalz die Intensitäten in 1., 2. und 3. Ordnung etwa wie 100 : 20 : 7.

Die in Fig. 2 ersichtliche Gruppe von sechs Linien bildet zusammen mit noch einigen schwächeren Linien die *L-Reihe des Wolframs*. Mit dem Werte von $d = 3,028 \cdot 10^{-8}$ cm an Kalkspat erhält man nach Gleichung (2) die zugehörigen Wellenlängen

$\lambda \cdot 10^{-8}$ cm	$\lambda \cdot 10^{-8}$ cm
1,058	1,278
1,064	(1,296)
1,095	1,471
1,241	(1,481)
(1,258)	(1,672)

Beim Erregen des Rohres mit höheren Spannungen, > 75 000 Volt, erhält man noch eine Gruppe von wenigstens drei Linien, die aber wesentlich kürzere Wellenlängen besitzen. Nach

neueren Messungen von *Hull* und *Rice* sind die Wellenlängen:

$$\lambda \cdot 10^{-8} \text{ cm}$$

0,192
0,214
0,218

Diese Gruppe ist mit der früher besprochenen *K*-Reihe identisch.

6. Die Röntgenspektren der Elemente.

Die eben dargelegte Methode zur Untersuchung der Linienspektren ist bisher nur in einzelnen Fällen benutzt worden. Bei den ersten Arbeiten von *Bragg* wurden in dieser Weise die Hauptlinien des Pt, Os, Ir bei sämtlichen der *L*-Reihe, ferner die *K*-Reihe bei Pd, Rh, Cu, Ni bestimmt.

Einen wesentlichen Fortschritt brachte die Einführung der photographischen Methode von *Moseley* sowie von *de Broglie* und *Herweg*. Das Prinzip dieser Methode ist in 4. gegeben, die praktische Ausführung werden wir weiter unten besprechen.

Eine Durchmusterung des ganzen Spektralgebietes nach dieser Methode ist im unterzeichneten Institute von *Malmer*, *Friman*, *Stenström* und vom Verfasser ausgeführt. Wir wollen an Hand dieser Ergebnisse einen Überblick über den allgemeinen Charakter der Röntgenspektren der Elemente geben.

Eine übersichtliche Zusammenstellung findet sich in Fig. 3, wo die stärksten Linien jedes dritten

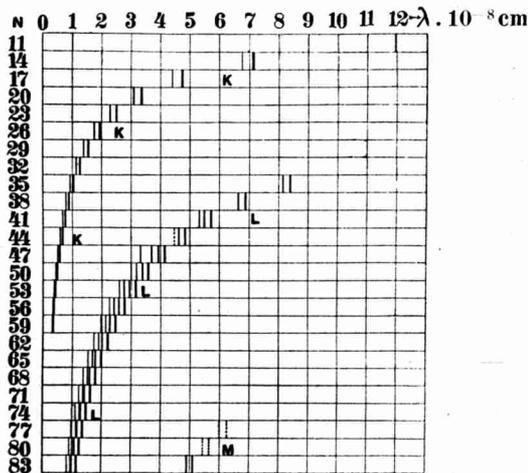


Fig. 3.

Elementes eingetragen sind. Außer den früher besprochenen zwei Gruppen der *K*- und *L*-Reihe findet sich hier noch bei den schwersten Elementen eine vom Verfasser gefundene dritte Gruppe: die *M*-Reihe. Man sieht aus der Figur, wie sämtliche Reihen mit steigendem Atomgewichte nach kürzeren Wellen rücken.

Überhaupt ist es auffallend, wie wenig die verschiedenen Gruppen sich von Element zu Element verändern. Die *K*-Reihe ändert sich von Al bis Sb kaum merklich, wenn wir von der Verschiebung in Wellenlängen absehen. Schon bei der *L*-Reihe kommen zwar kleine, aber doch bemerkenswerte Änderungen vor.

Bei der *M*-Reihe haben die jetzt vorliegenden Untersuchungen gezeigt, daß die Konfiguration der verschiedenen Linien ziemlich schnelle Änderungen erfährt.

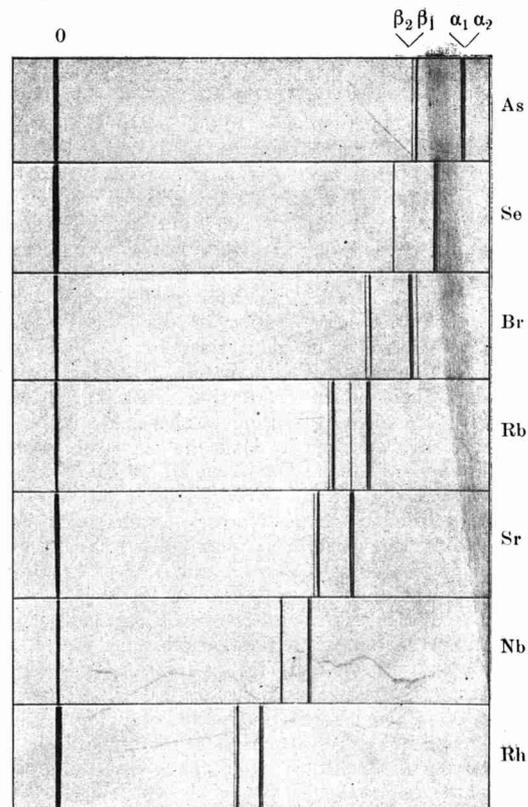


Fig. 4. *K*-Reihe.

Was ferner die einzelnen Liniengruppen betrifft, so können wir sie folgendermaßen charakterisieren. Die *K*-Reihe wird von einer starken Dublette α_1, α_2 , einer Linie mittlerer Intensität β_1 und einer schwachen Linie β_2 zusammengesetzt. Die Reihenfolge dieser Linien (α, β_1, β_2) ist von größeren zu kleineren Wellenlängen. Die Intensitäten verhalten sich etwa wie 6, 10, 4, 1 (Fig. 4).

Die *L*-Reihe (Fig. 5) können wir bei den schwersten Elementen in drei Unterabteilungen zerlegen, die α -, β - und γ -Gruppen mit mehreren Linien in jeder. Beim Fortschreiten nach leichteren Elementen fließen diese Gruppen zusammen.

1) Von einigen Autoren mit γ bezeichnet.

Bei den von uns benutzten Bezeichnungen sind innerhalb jeder Gruppe die Linien nach abfallenden Intensitäten numeriert ($\alpha_1, \alpha_2; \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5; \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$). Aus theoretischem Gesichtspunkt ist eine Bezeichnung, wie sie besonders von *Sommerfeld* eingeführt ist und bei der zusammengehörige Linien entsprechend bezeichnet sind, mehr befriedigend. Wir kommen später darauf zurück.

7. Die Emission der Röntgenspektren.

Wir hatten in 5. bei Besprechung des kontinuierlichen Spektrums eines technischen Rohres auf die bemerkenswerte Tatsache aufmerksam gemacht, daß das Spektrum erst bei einer gewissen Wellenlänge (von kürzeren Wellenlängen gerechnet) einsetzt. Untersuchungen von *Duane* und *Hunt, Hull* und *Webster* haben gezeigt, daß

zu erhöhen, um die zur Erregung der bez. Spektrallinie nötige Spannung zu finden.

Wir gewinnen einen guten Einblick in den Emissionsvorgang bei den *Linienpektren*, wenn wir die Fig. 6 (nach Aufnahmen von *Webster*) heranziehen. Es wurde ein gasfreies (Coolidge-) Rohr mit Antikathode aus Rhodium mit konstanter Spannung aus einer Akkumulator-Hochspannungsbatterie betrieben und die Intensitätsverteilung nach der Ionisationsmethode bestimmt. Die Figur zeigt die Verteilungen bei 23 200 und 31 800 Volt. Bei der letzteren Spannung sehen wir ein kontinuierliches Spektrum mit dem darüber gelagerten *K-Reihenspektrum* des Rhodiums. Bei der kleineren Spannung aber ist von dem *Linienpektrum* keine Spur zu sehen, trotzdem die der *K-Reihe* entsprechenden Wellenlängen im konti-

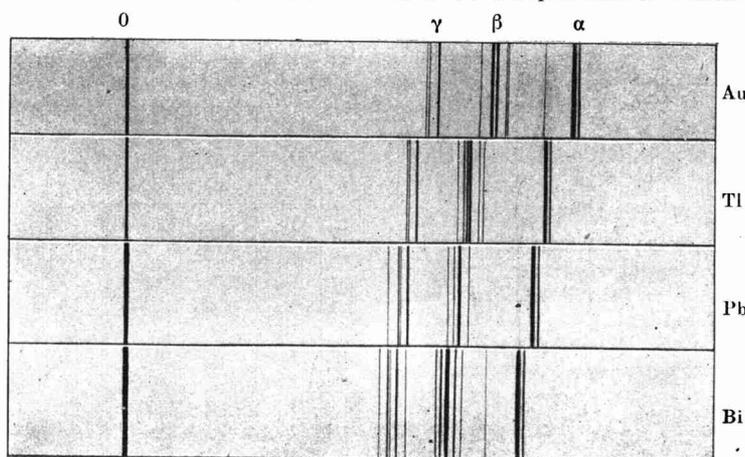


Fig. 5. L-Reihe.

diese Minimalwellenlänge λ_{min} oder die dazu gehörige Maximalfrequenz ν_{max} eine der Quantentheorie entnommene Beziehung

$$eV = h \nu_{max} \dots \dots \dots (3)$$

erfüllt, wenn V die Röhrenspannung bezeichnet, e die Elementarladung, h die Plancksche Konstante. Wir betonen nochmals, daß ν_{max} die größte dem kontinuierlichen Spektrum zugehörige Frequenz darstellt. Was V betrifft, so ist diese Größe gleich der von Röntgenstrahl-erzeugenden Elektronen durchlaufenen Spannung. eV stellt daher die Energie der Elektronen beim Aufprall an der Antikathode dar. Die entsprechende Geschwindigkeit (u) bestimmt sich aus der Gleichung

$$\frac{1}{2} m u^2 = eV,$$

wobei m die Masse des Elektrons darstellt.

Anders verhalten sich aber die *Linienpektren*. Die Gleichung (3) ist hier nicht mehr streng erfüllt, doch zeigt die Erfahrung, daß die Gleichung auch hier von Nutzen sein kann. Berechnet man nämlich nach dieser Formel die zu einer gewissen Linienfrequenz (*K- α -Linie*) gehörige Spannung, so hat man den gefundenen Wert um etwa 15 %

niuerlichen Spektrum erregt werden. Daraus sehen wir, daß das *Linienpektrum* erst dann zur Erscheinung kommt, wenn die nach der Formel (3) berechnete Spannung mit einem gewissen Betrag überschritten ist. Ist dies aber der Fall, dann *erscheinen gleichzeitig sämtliche Linien der K-Reihe*.

Entsprechende Untersuchungen bei der *L-Reihe* liegen noch nicht vor, doch deuten die Absorptionsverhältnisse (siehe 8) darauf hin, daß dort zwei (oder vielleicht drei, *de Broglie*) Schwellenwerte der Spannung existieren.

8. Die Absorption der Röntgenstrahlen.
Absorptionsspektren.

In nahem Zusammenhang mit den Erregungsbedingungen der *Linienpektren* steht der Absorptionsvorgang. Es ist seit langem bekannt, daß die Absorption der Röntgenstrahlen bei den Elementen eine rein atomistische Eigenschaft derselben ist, d. h. die Absorption ist nur von Zahl und Art der durchstrahlten Atome bestimmt, aber von dem Aggregatzustand oder der chemischen Bindung derselben unabhängig.

Auch in bezug auf die Absorption hat die neue Ära der Röntgenstrahlen eine wesentliche Erweiterung unserer Kenntnisse gebracht. Dies liegt vor allem darin, daß man jetzt imstande ist, wirklich monochromatische Strahlungen zu isolieren, während man früher höchstens mit einer Spektral-

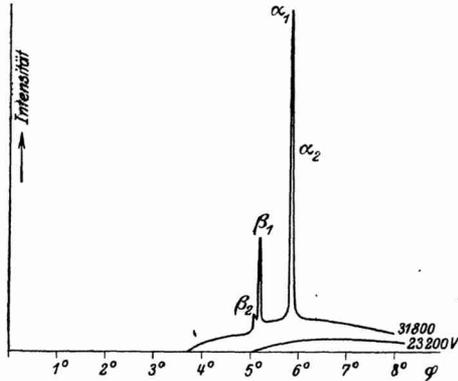


Fig. 6. Strahlung von einer Rh-Antikathode bei den Rohrentenspannungen 23,2 KV und 31,8 KV. (Nach Webster.)

liniengruppe (*K*- oder *L*-Reihe) operieren konnte. So hat die neue Forschung gezeigt, daß man sogar von einem Absorptionsspektrum sprechen kann, wenn auch nicht in ganz demselben Sinne wie beim gewöhnlichen Licht.

Untersucht man z. B. in einem nach *J.* gebauten Röntgenspektrometer die Absorption bei

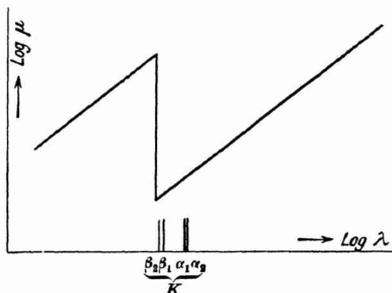


Fig. 7. Absorption in einem bestimmten Elemente als Funktion der Wellenlänge. Die eingezeichneten Linien zeigen die Lage der charakteristischen Wellenlängen. (*K*-Reihe.)

verschiedenen Wellenlängen, so erhält man ein Resultat, wie es die Fig. 7 veranschaulicht. In dieser Darstellung ist statt des durch Gl. (1) definierten Absorptionskoeffizienten μ sein Logarithmus eingetragen; ebenso ist statt der Wellenlänge $\log \lambda$ eingezeichnet.

Wie ersichtlich, ändert sich die Absorption in diesem Diagramme linear mit der Wellenlänge außer bei einer bestimmten Frequenz — der Absorptionsgrenzfrequenz —, wo die Absorption plötzlich von einem Wert zu einem anderen überspringt. Dies tritt bei einer Wellenlänge ein, die sehr nahe an der *K*-Reihe liegt, und zwar an der Seite der kürzeren Wellen.

Untersucht man in entsprechender Weise die Absorption im Gebiete der *L*-Reihe, so findet man statt eines jetzt zwei (event. drei) Sprünge in der Kurve.

Diese Absorptionsgrenzfrequenzen bilden ein ebenso gutes Charakteristikum der chemischen Elemente wie die Spektrallinien, besitzen auch ganz dieselbe Schärfe. In der untenstehenden Tabelle findet sich eine Zusammenstellung dieser Grenzfrequenzen nach *E. Wagner* und *de Broglie*.

Diese Wellenlängen sind sämtlich nach einer photographischen Methode gefunden. Photographiert man in der oben angegebenen Weise das von einem technischen Rohre ausgehende kontinuierliche Spektrum, so erhält man bei Einschalten einer absorbierenden Schicht im Strahlengang einen scharfen Übergang in der Schwärzung bei der Absorptionsgrenze der absorbierenden Substanz.

Tabelle IIa.
Absorptionsgrenzwellenlängen der *K*-Reihe.

N	Element	Wagner	de Broglie	N	Element	Wagner	de Broglie
26	Fe	1,759		52	Te	0,383	0,383
28	Ni	1,502		53	J	0,369	0,366
29	Cu	1,336	1,384	55	Cs		0,338
35	Br	0,926	0,914	56	Ba	0,331	0,325
37	Rb		0,809	57	La		0,310
38	Sr		0,764	58	Ce	0,298	0,298
40	Zr		0,681	60	Nd	0,282	
41	Nb		0,645	78	Pt		0,150
42	Mo		0,611	79	Au		0,146
46	Pd	0,513	0,503	80	Hg		0,143
47	Ag	0,490	0,479	81	Tl		0,139
48	Cd	0,468	0,458	82	Pb		0,135
50	Sn	0,425	0,419	83	Bi		0,131
51	Sb	0,405	0,398	90	Th		0,098

Tabelle IIb.
Absorptionsgrenzwellenlängen der *L*-Reihe.

N	Element	nach Wagner	nach de Broglie
78	Pt	1,072	1,067
	"	0,934	
79	Au	1,042	1,037
	"	0,914	0,898
82	Pb		0,945
	"		0,811
90	Th		0,756
	"		—
92	U		0,718
	"		0,588

Schon ohne jede absorbierende Substanz zeigt die photographische Platte bei Aufnahme des kontinuierlichen Spektrums zwei scharfe Schwärzungsgrenzen, die von der Absorption des Ag und des Br in der empfindlichen Schicht herrühren. Selbstverständlich sind die Schwärzungsverhältnisse