Werk

Titel: Bericht über neuere Ergebnisse der Röntgenspektroskopie

Autor: Wentzel, Gregor

Ort: Berlin

Jahr: 1922

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X_0010|log271

Kontakt/Contact

Digizeitschriften e.V.
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

info@digizeitschriften.de

durchaus an die bekannten spektroskopischen anlehnen und ihre Mittel benutzen, ist schließlich einer völlig andersartigen Arbeitsweise Erwähnung zu tun, die gleich bei der Entstehung des Röntgenstrahls die Meßwerkzeuge anlegt, und die faktisch die K-, L-Serien ganz leichter Atome hat finden lassen. *Franck* und *Knipping* haben anläßlich ihrer Arbeit über die Resonanzspannung und Ionisierungsspannung des Heliums bemerkt, daß unter Umständen auch *die* Linien durch Elektronenstoß angeregt werden, die auf die Resonanzlinie folgen. Weiter hat *Einsporn* im Quecksilberdampf eine Anzahl von neuen Linien durch Elektronenstoß bekommen. In beiden Fällen konnte gezeigt werden, daß die betreffenden Anregungsspannungen, nach der Einsteinschen Beziehung

$$e\,V = \frac{h\,c}{\lambda} = h_\nu\,\nu$$

in Wellenlängen umgerechnet, exakt mit der Lage von bekannten (Hg-) resp. eben bekanntgewordenen (He-)Linien übereinstimmen. So war es durchaus gerechtfertigt, seinerzeit diese Methode als Ultraviolettspektroskopie zu bezeichnen. Diese Arbeitsweise, die im Grunde genommen auf *Dember* zurückgeht, ist auch auf das Röntgengebiet angewendet worden und soll als fünfte röntgenspektroskopische Methode bezeichnet und kurz erläutert werden.

Sie ist dadurch charakterisiert, daß man aus einem als Kathode dienenden Glühdraht K Elektronen (gefiederter Pfeil) austreten läßt, die unter dem Einfluß eines variierbaren Beschleunigungsfeldes (durch die Batterie B und den als Spannungsteiler dienenden Widerstand W) beschleunigt auf die Anode A fallen, wo sie Strahlung erzeugen, die durch die lichtelektrische Erregung an der Auffangevorrichtung L nachgewiesen wird. Die Anode wird dabei mit den zu untersuchenden Substanzen bedeckt. Auf diese Weise gelang es kürzlich *Kurth* (Phys. Rev. 1921), die K- und L-Strahlung von Kohlenstoff und Sauerstoff sowie die M- und N-Serie von Eisen und Kupfer nachzuweisen. In ähnlicher

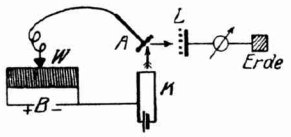

Fig. 6. Lichtelektrische Methode.

K = Glühkathode — W = Potentiometerwiderstand
A = Antikathode
B = Beschleunigungsbatterie — L = Lichtelektrischer Auffänger.

Weise haben *Mohler* und *Foote* (ebenda) die Strahlung von Kalium, Natrium und Magnesium, *Richardson* und *Bazzoni* (Phil. Mag. 1921) die K-Strahlung des Kohlenstoffs und die M-Strahlung des Molybdäns gemessen. Die gefundenen Wellenlängen sind sowohl untereinander, soweit sie vorliegen, als auch mit den theoretisch errechneten in guter Übereinstimmung.

In den genannten Arbeiten sind bis jetzt Wellenlängen bis 375 Å-E erreicht, so daß wir nun tatsächlich die Lücke zwischen den kurzen ultravioletten Wellen und den Röntgenstrahlen geschlossen sehen. So genießen wir die schöne Aussicht, nach Vervollkommnung der eben genannten Methode in Bälde die gesamten Röntgenlinien sämtlicher bekannter Elemente zu besitzen, kaum, daß das erste Jahrzehnt nach der Laueschen Entdeckung verflossen ist.

Bericht über neuere Ergebnisse der Röntgenspektroskopie.

Von Gregor Wentzel, München.

Man kennt heute drei prinzipiell verschiedene Methoden der Röntgenwellenlängenmessung: 1. die spektrale Zerlegung der Röntgenstrahlen durch Beugung in Kristallen, wobei die Wellenlängen gemäß der Gleichung:

$$2\,d \sin \vartheta = n\,\lambda$$

direkt mit der Kristallgitterkonstanten verglichen werden; 2. die Methode des Elektronenstoßes, bei welcher Anregungsspannungen gemessen und vermittelst der Gleichung:

$$e\,V = \frac{h\,c}{\lambda}$$

auf Wellenlängen von Absorptionskanten umgerechnet werden; 3. die Bestimmung von Geschwindigkeiten sekundärer (photoelektrischer) Kathodenstrahlen durch magnetische Ablenkung, von wo aus man mittels der Gleichung:

$$\frac{m\,v^2}{2} = h\,c\left(\frac{1}{\lambda_p} - \frac{1}{\lambda_s}\right)$$

auf die charakteristischen Wellenlängen λ_p und λ_s des primären bzw. sekundären Radiators schließen kann[1]). Von diesen drei Methoden liefert die erste, die unmittelbar auf der Laueschen Entdeckung fußt, weitaus die genauesten Resultate. Die beiden anderen Methoden haben bisher noch keine wesentlich neuen Zahlenergebnisse geliefert und können im folgenden ohne Schaden übergangen werden; doch versprechen sie für die Wellenlängenmessung der ganz harten Röntgenstrahlen und der γ-Strahlen[2]) wertvoll zu werden, wo die Laue-Braggsche Methode wegen der relativen Größe der Kristallgitterkonstanten versagt.

[1]) Vgl. etwa *M. de Broglie*, J. de Physique, Sept. 1921, S. 265.

[2]) Vgl. *Ellis*, Proc. Roy. Soc. *99A*, 261 (1921).

Faßt man den Begriff der Röntgenstrahlung weiter und versteht darunter die Eigenstrahlung der inneren Atomschalen überhaupt, so kann man sagen, daß die Röntgenlinien der leichtesten Elemente mit optischen Mitteln im Ultravioletten zugänglich sind, und man hat als vierte Meßmethode die der Beugung an sehr engen Strichgittern hinzuzufügen. Durch diese hat *Millikan*[3]) neuerdings die *L*-Serie von 13 Al, 12 Mg und 11 Na messen und den Übergang der *L*-Serie in die optischen Spektren von 9 F bis 3 Li abwärts verfolgen können. Da aber *Millikan* sein Zahlenmaterial noch nicht in vollem Umfang veröffentlicht hat, verzichten wir auf Angabe seiner Ergebnisse, zumal es im Rahmen dieser Laue-Festschrift überhaupt angebracht ist, sich auf die Ergebnisse der erstgenannten Methode, der Spektralanalyse durch Kristallgitter, zu beschränken.

Wir stellen zunächst in Abschnitt I die zurzeit zuverlässigsten Meßresultate zusammen und geben dann in Abschnitt II einen gedrängten Überblick über die Systematik der Röntgenspektren.

I. Zahlenangaben.

Die folgenden Tabellen enthalten die gemessenen Wellenlängen λ in *X*-Einheiten ($1\,X = 10^{-11}$ cm) und die daraus berechneten Frequenzen $\nu = 1/\lambda$ in Vielfachen der Rydbergzahl $R = 109\,737\ \mathrm{cm}^{-1}$. Sämtliche Zahlen sind nach dem Vorgang von *Siegbahn* auf Steinsalz $d = 2{,}814\,00 \cdot 10^{-8}$ cm (auf Kalkspat $d = 3{,}029\,04 \cdot 10^{-8}$ cm) bezogen. Die amerikanischen Messungen, die ursprünglich mit Bezug auf Kalkspat $d = 3{,}028 \cdot 10^{-8}$ angegeben sind, wurden dementsprechend korrigiert.

A. Absorptionskanten. Für die *K*-Grenze (Tab. 1) liegen systematische Messungen von leichtesten bis zu schwersten Elementen von seiten verschiedener Beobachter vor: *Fricke*, Phys. Rev. *16*, 202; 1920 (Elemente 12 Mg bis 24 Cr); *Duane* und *Kang-Fuh-Hu*, Phys. Rev. *14*, 516; 1919 (Elemente 25 Mn bis 58 Ce); *Siegbahn* und *Jönsson*, Physikal. Zeitschr. *20*, 251; 1919 (Elemente 59 Pr bis 67 Ho); *Duane* und *Stenström*, Proc. Nat. Acad. *6*, 477; 1920 (74 W); *Duane*, *Fricke* und *Stenström*, Proc. Nat. Acad. *6*, 607; 1920 (Elemente 78 Pt bis 92 U). Die 3 *L*-Grenzen (Tab. 2) sind nur bei einer Gruppe mittlerer Elemente (55 Cs bis 60 Nd) von *G. Hertz* (Zs. f. Phys. *3*, 19; 1920) und bei den schweren Elementen (74 W bis 92 U) von *Duane* und *Patterson* (Proc. Nat. Acad. *6*, 509; 1920) präzisionsmäßig gemessen. Die *M*-Grenzen (Tab. 3) endlich, 5 an der Zahl, sind nur bei schwersten Elementen bekannt; M_1, M_2, M_3 sind bei U und Th von *W. Stenström* (Diss. Lund 1919) gemessen; die übrigen Angaben der Tabelle 3 gehen auf *D. Coster* (Zs. f. Phys. *5*, 139; 1921, und C. R. *172*, 1176; 1921) zurück. Bezüglich der Feinstruktur der Absorptionskanten muß auf die Originalarbeiten von *Fricke*, *Hertz* und *Stenström* verwiesen werden.

[3]) *R. A. Millikan*, Proc. Nat. Acad. 7, 289 (1921).

Tabelle 1.

K-Grenze, λ und ν/R.

Element	λ	ν/R	Element	λ	ν/R
12 Mg.....	9511,2	95,81	45 Rh.....	533,2	1709,1
13 Al	7947,0	114,67	46 Pd	507,7	1794,9
15 P	5758,0	158,26	47 Ag.....	485,2	1878,1
16 S	5012,3	181,81	48 Cd	463,4	1966,5
17 Cl	4384,4	207,84	49 In.....	443,6	2054,3
18 A	3865,7	235,73	50 Sn	424,3	2147,7
19 K.....	3434,5	265,33	51 Sb	406,6	2241,2
20 Ca	3063,3	297,48	52 Te	389,7	2338,4
21 Sc	2751,7	331,17	53 J	373,8	2437,9
22 Ti.....	2493,7	365,43	55 Cs	344,5	2645,2
23 V	2265,3	402,27	56 Ba	330,8	2754,7
24 Cr	2067,5	441,14	57 La	318,9	2857,5
25 Mn	1889,8	482,20	58 Ce	306,9	2969,3
26 Fe	1740,2	523,66	59 Pr	294,6	3093
27 Co	1602,3	568,73	60 Nd.....	283,5	3214
28 Ni	1489,5	611,80	62 Sm.....	263,6	3457
29 Cu	1379,0	660,82	63 Eu.....	254,3	3584
30 Zn	1296,7	702,76	64 Gd.....	245,6	3710
31 Ga	1190,6	765,39	66 Ds.....	229,4	3972
32 Ge	1115,0	817,28	67 Ho.....	221,4	4116
33 As	1043,9	872,95	74 W	178,12	5116,0
34 Se	979,3	930,53	78 Pt	158,2	5760
35 Br	918,2	992,45	79 Au.....	153,5	5937
37 Rb.....	814,6	1118,7	80 Hg.....	149,2	6108
38 Sr	769,9	1183,6	81 Tl	144,8	6293
39 Y	725,7	1255,7	82 Pb	141,0	6463
40 Zr	687,4	1325,7	83 Bi	137,2	6642
41 Nb.....	650,5	1400,9	90 Th	113,1	8057
42 Mo.....	618,2	1474,1	92 U.....	107,5	8477
44 Ru.....	558,6	1631,3			

Tabelle 2.

L-Grenzen, λ und ν/R.

Element	λ			ν/R		
	L_1	L_2	L_3	L_1	L_2	L_3
55 Cs	2459	2299	2157	370,6	396,4	422,5
56 Ba.....	2348	2194	2063	388.1	415,3	441,7
57 La	2250	2098	1971	405,0	434,4	462,3
58 Ce	2158	2007	1887	422,3	454,0	482,9
59 Pr	2071	1922	1808	440,0	474,1	504,0
60 Nd.....	1992	1842	1736	457 5	494 7	524,9
74 W	1214,0	1073,0	1024	750,63	849,27	889,9
78 Pt	1070,9	932,4	888,8	850,94	977,34	1025,3
79 Au.....	1038.7	899,6	860,9	877,32	1013,0	1058,5
80 Hg.....	1007,0	870,3	833,8	904 93	1047,1	1092,9
81 Tl.....	977,9	841,8	805,8	931,86	1082,5	1130,9
82 Pb	950,0	813,6	780,6	959,23	1120,0	1167,4
83 Bi	921,9	787,5	753,5	988,47	1157,2	1209,4
90 Th	759,9	628,8	604,6	1199,2	1449,2	1507,2
92 U.....	721,6	592,0	568,7	1262,8	1539,3	1602,4

Tabelle 3.

M-Grenzen, λ und ν/R.

Element	λ					ν/R				
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
83 Bi	4762,1	4569,1	3896			191,26	199,44	233,9		
90 Th	3721,3	3552,3	3058,5	2571	2388	244,90	256,55	297,99	354,4	381,6
92 U	3490,7	3325 5	2873,4	2385	2229	261,03	273,99	317,18	382,1	408,9

B. Emissionslinien. Die Tabellen 4 bis 11 geben, für λ und ν/R getrennt, eine Übersicht über die zurzeit vorliegenden Präzisionsmessungen der *K*-, *L*- und *M*-Serie. In den Tabellenköpfen ist außer den Linienbezeichnungen, die zum Teil bei den verschiedenen Autoren voneinander abweichen, die Termdarstellung der einzelnen Linien angegeben, unter teilweiser Vorwegnahme der im II. Abschnitt skizzierten Liniensystematik. Linien, die nur bei *einem* Element gemessen und bei den Nachbarelementen nicht einwandfrei festgestellt werden konnten, sind *nicht* in die Tabelle aufgenommen, aber im Text erwähnt.

1. *K-Serie* (Tab. 4 und 5). Die in Tab. 4 angeführten *K*-Wellenlängen der Elemente 11 Na bis 30 Zn sind sämtlich im Siegbahnschen Laboratorium in Lund gemessen; die diesbezüglichen Originalabhandlungen sind: *Siegbahn*, Ann. d. Phys. *59*, 56; 1919, *E. Hjalmar*, Zs. f. Phys. *1*, 439; 1920 u. *7*, 341; 1921, *N. Stensson*, Zs. f. Phys. *3*, 60; 1920. Von den schwereren Elementen sind nur einzelne präzisionsmäßig gemessen[4]): 31 Ga von *Uhler* u. *Cooksey*, Phys. Rev. *10*, 645; 1917; 42 Mo von *Duane*, Bull. Nat. Research Council *1*, 383; 1920, S. 393; 45 Rh von *Duane* u. *Kang-Fuh-Hu*, Phys. Rev. *11*, 489; 1918, und *14*, 369; 1919; 74 W von *Duane* u. *Stenström*, Proc. Nat. Acad. *6*, 477; 1920. Die β′-Linie von 45 Rh und 74 W ist von *de Broglie* (C. R. *170*, 1053

Tabelle 4.

K - Serie, λ.

	α′, α_2 $K-L_2$	α, α_1 $K-L_1$	α_1', α_7	α_3	α_4	α_5	α_6	β_3, β′	β, β_1 $K-M_3$	β″	γ, β_2 $K-N_5$
11 Na	11 883,6		11835	11802,4	11781,4	—	—	—	11591	—	—
12 Mg	9 867,75		9826,5	9799,40	9786,20	9730,2	9711,8	9647	9534,50	—	—
13 Al	8 319,40		8285,60	8264,60	8253,00	8205,80	8189,20	8025	7940,50	—	—
14 Si	7 109,17		7033	7063,82	7053,72	7014	7003	6793,3	6739,33	—	—
15 P	6 141,71		—	6102,19	6095,00	—	—	5820,4	5785,13	—	—
16 S	5363,75	5360,90	5340,6	5329,37	5323,25	5262,6	—	5045,0	5021,2	—	5012,7
17 Cl	4721,85	4718,70[5])	4702,5	4688	4684	—	—	—	4394,50	4390,8	—
19 K	3737,25	3733,86[5])	3718,7	3711,0	3708,8	—	—	—	3446,38	3442,46	3434,(6)
20 Ca	3355,12	3351,86[5])	3339,86	3332,3	3330,0	—	—	—	3082,97	3079,57	3067,40
21 Sc	3028,63	3025,26[5])	—	3006		—	—	—	2773,66	—	2755,(5)
22 Ti	—	—	—	2726,9		—	—	2515,06	2508,74	—	2493,67
23 V	—	—	—	2484,6		—	—	2285,26	2279,68	—	2265,37
24 Cr	2289,28	2285,17	—	2273,3		—	—	2086,31	2081,44	—	—
26 Fe	1936,60	1932,39	—	1923,30		—	—	1756,60	1752,72	—	1740,76
27 Co	1789,52	1785,24	—	1777,4		—	—	—	1617,15	—	1606
28 Ni	1658,60	1654,67	—	1647,6		—	—	1498,11	1496,69	—	1484,03
29 Cu	1541,22	1537,36[6])	—	1530,75		—	—	—	1388,87	—	1377,4
30 Zn	—	1431,9	—	1428,8		—	—	—	1292,50	—	1279,15
31 Ga	1341,61	1337,85	—	—	—	—	—	—	1205,91	—	—
42 Mo	712,36	708,07	—	—	—	—	—	632	631,31	—	619,9
45 Rh	616,6	612,3	—	—	—	—	—	546,1	545,5	—	534,4
74 W	213,48	208,67	—	—	—	—	—	185,0	184,26	—	179,07

[4]) Die älteren Messungen aus den Jahren 1915/16 sind hier nicht mitgeteilt, da man die betr. Wellenlängen genauer durch Intrapolation mittels der Moseleyschen Formel erhält.

[5]) Herr *M. Siegbahn* hat nach freundlicher brieflicher Mitteilung bei den Elementen 17 Cl bis 21 Sc einen weiteren kurzwelligen $K\alpha$-Begleiter in engster Nachbarschaft der Hauptlinie gemessen; Cl: λ = 4712, ν/*R* = 193,4; K: λ = 3730, ν/*R* = 244,3; Ca: λ = 3349, ν/*R* = 272,1; Sc: λ = 3023, ν/*R* = 301,4. Die Werte für α_1', α_3, α_4 bei den Elementen 17 Cl bis 30 Zn sind derselben Mitteilung entnommen.

[6]) *Siegbahn*, der in allerjüngster Zeit die Genauigkeit seiner Messungen abermals um eine Dezimale vorgetrieben hat, gibt neuerdings (C. R. *173*, 1350, 1921) die Wellenlänge der $K\alpha$-Linie von Cu zu 1537,302 *X*.-E. an

Tabelle 5.
K - Serie, ν/R.

	α', α_2 $K-L_2$	α, α_1 $K-L_1$	α_1', α_7	α_3	α_4	α_5	α_6	β_3, β'	β, β_1 $K-M_3$	β''	γ, β_2 $K-N_5$
11 Na	76,68		76,99	77,21	77,34	—	—	—	78,62	—	—
12 Mg	92,35		92,73	92,99	93,11	93,65	93,83	94,46	95,58	—	—
13 Al	109,53		109,98	110,26	110,41	111,05	111,27	113,55	114,76	—	—
14 Si	128,18		128,65	120,02	129,18	129,92	130,12	134,15	135,22	—	—
15 P	148,37		—	149,33	149,51	—	—	156,56	157,52	—	—
16 S	169,89	169,98	170,62	170,98	171,18	173,1	—	180,62	181,48	—	181,79
17 Cl	192,99	193,12	193,78	194,4	194,5	—	—	—	207,37	207,54	—
19 K	243,83	244,06	245,04	245,56	245,70	—	—	—	264,41	264,71	265,3
20 Ca	271,61	271,87	272,85	273,47	273,65	—	—	—	295,58	295,91	297,08
21 Sc	300,88	301,22	—	303,1		—	—	—	328,54	—	330,7
22 Ti	—	—	—	334,18		—	—	362,32	363,24	—	365,43
23 V	—	—	—	366,77		—	—	398,76	399,73	—	402,26
24 Cr	398,06	398,78	—	400,86		—	—	436,78	437,81	—	—
26 Fe	470,55	471,58	—	473,80		—	—	518,77	519,92	—	523,49
27 Co	509,23	510,45	—	512,70		—	—	—	563,50	—	567,4
28 Ni	549,42	550,73	—	553,09		—	—	608,28	608,86	—	614,05
29 Cu	591,26	592,75	—	595,31		—	—	—	656,12	—	661,59
30 Zn	—	636,42	—	637,79		—	—	—	705,04	—	712,40
31 Ga	679,23	681,14	—	—	—	—	—	—	755,67	—	—
42 Mo	1279,2	1287,0	—	—	—	—	—	1442	1443,5	—	1470,0
45 Rh	1477,9	1488,3	—	—	—	—	—	1669	1670,5	—	1705,2
74 W	4268,6	4367,0	—	—	—	—	—	4926	4945,6	—	5088,9

u. 1245; 1920) relativ zu β_1 gemessen; sie entspricht der Kombination $K—M_4$. Die bei den Elementen $Z < 30$ beobachteten weichen β-Begleiter sind *nicht* mit dieser de Broglieschen β'-Linie zu identifizieren. Bei den Elementen 12 Mg bis 15 P ist von *Hjalmar* außer dem angeführten noch ein weiterer weicher β-Begleiter beobachtet und bei 14 Si zu $\lambda = 6744{,}2$, $\nu/R = 135{,}12$ gemessen. Ferner haben *Duane* und *Stenström* (l. c.) bei W einen zweiten weichen α-Begleiter entdeckt, welcher der α'-Linie eng benachbart ist und innerhalb der Fehlergrenzen durch die Termdifferenz $K—L_3$ dargestellt wird: $\lambda = 215 \pm 1$, $\nu/R = 4239 \pm 20$.

Für die schwächeren K-Linien ist in den Tabellenköpfen keine Termdarstellung angegeben; im normalen Niveauschema ist kein Platz für sie. Wie Verf.[7]) kürzlich gezeigt hat, sind sie als eine Art „Funkenlinien" im Röntgenspektrum zu deuten, nämlich als Emissionen eines im Innern zwei- oder dreifach ionisierten Atoms.

2. *L-Serie.* Die umfangreichen Messungen der L-Serie geben wir in zwei Gruppen für die mittleren und schweren Elemente getrennt. Tab. 6 und 7 enthalten die Präzisionsmessungen der Elemente 29 Cu bis 73 Ta von *E. Hjalmar* (Zs. f. Phys. *7*, 341; 1921), welche sich nur auf die intensivsten Linien erstrecken und auch bei diesen teilweise lückenhaft sind. Bei 58 Ce und 59 Pr hat *Hjalmar* einige zerstreute Linien gemessen; doch weist *Dauvillier* (C. R. *173*, 1458; 1921) nach, daß diese (sowie einige von *Friman* beobachtete Linien) von Verunreinigungen herrühren. Die Linie α_3, die ohne Termdarstellung angeführt ist, ist eine Funkenlinie in dem oben angegebenen Sinne.

Eine weit eingehendere Musterung haben die L-Spektren der Elemente 73 Ta bis 92 U durch *D. Coster* (Zs. f. Phys. *6*, 185; 1921) und *A. Dauvillier* (C. R. *173*, 647; 1921) erfahren; letzterer hat neuerdings (C. R. *173*, 1458; 1921) auch 51 Sb und 58 Ce genauer untersucht. Die Tabellen 8 und 9 enthalten die Messungen beider Autoren für jedes Element untereinanderstehend, durch ein C oder D am Anfang der Zeile voneinander unterschieden; die Übereinstimmung der voneinander unabhängigen Messungen ist, wenigstens bei den intensivsten Linien, überraschend gut. Bei 51 Sb, 58 Ce und 73 Ta sind die Hjalmarschen Zahlen aus den Tabellen 6 und 7 (unter dem Buchstaben H) wiederholt; auch hier ist die Übereinstimmung befriedigend. — Sämtliche Linien sind einerseits in der Art von *Moseley-Sommerfeld* (obere Zeile), andererseits in der Art von *Siegbahn-Dauvillier* (untere Zeile) bezeichnet; wo die Costersche Bezeichnung von der Dauvillierschen abweicht, ist sie in Klammern hinzugefügt. Die Sommerfeldsche Bezeichnung erstreckt sich nur auf diejenigen Linien, die dem Auswahlprinzip gehorchen (vgl. Abschnitt II). — Der Übersichtlichkeit wegen ist die ganze L-Serie, gemäß der Zugehörigkeit der einzelnen Linien zu den drei Endniveaus L_1, L_2, L_3, in eine L_1-, L_2- und L_3-Serie zerlegt. Linien der L_1- und L_2-Serie, die das gleiche Anfangs-

[7]) *G. Wentzel*, Ann. d. Phys. *66*, 437; 1921.

Tabelle 6.
L-Serie, 29 Cu bis 73 Ta, λ.

	α', α_2 $L_1 - M_2$	α, α_1 $L_1 - M_1$	α_3	β, β_1 $L_2 - M_2$	φ', β_4 $L_3 - M_4$	φ, β_3 $L_3 - M_3$	γ, β_2 $L_1 - N_3$	δ, γ_1 $L_2 - N_4$
29 Cu	—	13309,1	—	—	—	—	—	—
30 Zn	—	12222,5	—	11951	—	—	—	—
32 Ge	—	10413,6	—	—	—	—	—	—
33 As	—	9650,3	9617,3	9394,0	—	—	—	—
34 Se	—	8970,6	8938,6	8717,2	—	—	—	—
35 Br	-	8356,6	8326,2	8107,6	—	—	—	—
37 Rb	—	7302,7	7272,7	7060,4	—	—	—	—
38 Sr	—	6847,8	6818,3	6609,2	—	—	—	—
39 Y	—	6434,9	6406,5	6198,4	—	—	—	—
40 Zr	—	6055,9	6027,2	5822,8	—	—	—	—
41 Nb	—	5711,3	5688,6	5479,6	—	—	5295,1	—
42 Mo	—	5394,3	5372,1	5165,8	—	—	—	4711,1
44 Ru	4843,67	4835,67	—	4611,00	—	—	—	4172,82
45 Rh	4595,56	4587,78	—	4364,00	—	—	—	3935,7
46 Pd	4366,60	4358,50	—	4137,30	—	—	—	3716,36
47 Ag	4153,82	4145,64	4131,70	3926,64	3861,09	3824,45	3693,83	3514,85
48 Cd	3956,36	3947,82	—	3730,08	3674,25	3636,42	—	3328,00
49 In	3772,42	3763,67	3749,91	3547,83	—	—	—	3155,29
50 Sn	3601,08	3592,18	—	3377,92	—	3297,68	3163,84	2994,93
51 Sb	3440,75	3431,77	—	3218,36	—	3145,14	—	2845,07
52 Te	3291,00	3281,99	—	3069,97	3040,04	3001,33	—	2706,47
53 J	3150,87	3141,66	—	2930,93	—	—	2746,08	2577,48
55 Cs	2895,60	2886,10	—	2677,84	2660,53	2622,93	—	2342,52
56 Ba	2779,02	2769,64	—	2562,24	2549,76	2511,00	2399,28	2236,60
57 La	2668,93	2659,68	—	2453,30	2444,26	2405,31	—	2137,20
58 Ce	2565,11	2556,00	—	2351,00	2344,80	2305,9	2203,80	2044,33
59 Pr	2467,63	2457,70	—	2253,90	—	2212,37	2114,68	1956,81
60 Nd	2375,63	2365,31	—	2162,21	—	2122,30	—	1873,83
62 Sa	2205,68	2195,01	—	1993,57	—	—	—	1723,09
63 Eu	2127,33	2116,33	—	1916,31	—	—	—	—
64 Gd	2052,62	2041,93	—	1842,46	—	—	—	1588,63
65 Tb	1982,31	1971,49	—	1772,68	—	1742,56	1679,25	—
66 Ds	1915,64	1904,60	—	1706,58	—	—	1619,75	—
67 Ho	1852,06	1840,98	—	1643,52	—	1616,77	1563,65	—
68 Er	1791,40	1780,40	—	1583,44	—	—	1511,2	—
70 Ad	1678,9	1667,79	—	—	—	—	—	—
71 Cp	1626,36	1615,51	—	—	—	—	—	—
73 Ta	1529,33	1518,24	—	1323.51	—	—	1280,65	1134,71

niveau haben, also miteinander die *L*-Dublettdifferenz L_2—L_1 bilden, kommen dabei untereinander zu stehen. In den Teilserien sind die Linien durchweg nach steigender Härte (bzw. zunehmender Höhe des Anfangsniveaus) geordnet, und Linienüberschneidungen können in ihnen nur ausnahmsweise (β_7!) vorkommen. Stellen, an denen eine Überschneidung von zwei Linien verschiedener Teilserien stattfindet und eine getrennte Ausmessung der betr. beiden Linien nicht möglich war, sind in den Tabellen (nach dem Vorgang von *Coster*) durch * gekennzeichnet. Die betr. Wellenlängen stellen Mittelwerte dar und sind daher mit größeren Fehlern behaftet. — Die Funkenlinien α_3, β_2'' (β_8) und γ_{10} sind kurzwellige Begleiter der Linien α, γ und δ. Ihrer Härte nach sollten also α_3 und β_2'' zwischen α und ι bzw. zwischen γ und β_7' zu stehen kommen; doch läßt das Schema hier keinen Platz, und wir haben sie deshalb zwischen ε und α' bzw. zwischen ι und γ' untergebracht. Die Linie γ_{10} wurde in die L_2-Serie genau unter β_2'' eingereiht, weil sie mit dieser Linie die *L*-Dublettdifferenz bildet[8]). Bei 79 Au hat *Dauvillier* die β_2''-Linie in ein enges Dublett aufgespalten. Die Linie α_3 ist identisch mit der gleichbezeichneten Funkenlinie der Tabellen 6 und 7 (S. 378).

An zerstreuten Linien gibt *Dauvillier* die fol-

[8]) Bezüglich der Bedeutung dieser Tatsache (Superposition von relativistischer und Ionisierungsfeinstruktur, vgl. die Anm. [7]) zitierte Arbeit des Verf., § 1 und Nachtrag.

Tabelle 8.

L-Serie, 51 Sb, 58 Ce und 73 Ta bis 92 U, λ.

Anfangsniveau		M_5	M_4	M_3	M_2	M_1	N_7	N_6	N_5	N_4	N_3	N_2	N_1	O_5	O_4	O_3	O_2	O_1
		ε			α′	α	ι			γ′	γ			λ			ζ′	ζ
		l		α_3		α_2	α_1	β_6		β_2'' (β_8)		β_2'	β_2	β_7'		β_7		β_5
L_1	51 Sb D	—		3417,7		—	—	—		3011,7		3016,4		—			—	2967,7
	51 Sb H	—		—		3440,75	3431,77	—		—		—		—			—	—
	58 Ce D	—		—		—	—	—		—		—		—			—	2155,3
	58 Ce H	—		—		2565,11	2556,00	—		—		2203,80		—			—	—
	73 Ta C	1724,2		—		1529,4	1518,25	1326,7		1273,8		1281,0		1260,0			—	1250,6
	73 Ta H	—		—		1529,33	1518,24	—		—		1280,65		—			—	—
	74 W C	1675,05		—		1484,52	1473,48	1237,1		1235,4		1241,91		1220,8			—	1212,5
	74 W D	—		—		—	—	1288,3		1236,0		— | 1242,4		1222,4			—	1214,6
	76 Os C	—		—		1398,2	1388,16	1204,8		—		1168,38		—			—	1140
	76 Os D	—		1383,2		1399,3	1388,3	1210,7		1161,6		1169,6 | 1167,8		1147,9			—	1138,9
	77 Ir C	—		—		1359,39	1348,34	1171,7		1126,7		1132,87		—			—	1103,0
	77 Ir D	—		1343,3		1359,5	1348,5	*1177,3		1127,3		1132,9		1111,6		1108,2	—	1103,3
	78 Pt C	1497,23		—		1321,21	1310,08	*1139,8		1092,8		*1099,50		1078,5			—	1070,1
	78 Pt D	—		1304,9		1321,0	1310,0	*1140,0		1094,1		1101,0 | *1099,6		1079,0		1076,2	—	1070,0
	79 Au C	1456,54		—		1284,89	1273,55	1110,6		1060,9		1067,75		1046,5			—	1038,2
	79 Au D	—		1268,9		—	1272,8	1108,7		1062,3 | 1061,0		1069,5 | 1067,5		1047,2		1045,3	—	1038,0
	81 Tl C	—		—		1216,03	1204,71	1048,0		—		1007,86		988			—	978,3
	82 Pb C	1346,62		—		1183,52	1172,02	1018,8		973,5		*979,90		959,0			—	949,52
	83 Bi C	1312,95		—		1153,3	1141,15	991,6		—		952,93		—			—	922,3
	90 Th C	1112,41		—		965,24	953,42	826,2		—		791,08		—			—	*762,59
	92 U C	1064,77		—		920,14	908,33	786,6		—		752,68		376			—	724,13
	92 U D	—		—		—	—	785,9		*745,9		754,7 | 752,7		736,4		734,0	—	724,2
		η			β		ϰ				δ					μ		ϑ	
		η		β_{11}	β_1		γ_5		γ_{10}		γ_1			γ_6				γ_2 (γ_6)	
L_2	51 Sb D	3507,0	—	—	3221,6	—	—		2840,2		2845,1	—		—		—	—	—	—
	51 Sb H	—	—	—	3218,36	—	—		—		2845,07	—		—		—	—	—	—
	58 Ce D	—	—	—	—	—	—		—		2042,8	—		—		—	—	—	—
	58 Ce H	—	—	—	2351,00	—	—		—		2044,33	—		—		—	—	—	—
	73 Ta C	1465,5	—	—	1323,54	—	1170,0		—		1134,71	—		—		—	—	1110,0	—
	73 Ta H	—	—	—	1323,51	—	—		—		1134,71	—		—		—	—	—	—

				φ′ β_4	φ′ β_3	β_9 (β_{10})	β_8 (β_9)		χ′ γ_7 (γ_2)	χ γ_3	γ_9					ψ′ (γ_4)	ψ (γ_4)		
L_2	74 W	C	1417,7	—	—	1279,17	—	1129,2	—		1095,53	—	—		—	—	—	1072,0	—
		D	—	—	1334,4	1278,8	—	1128,8	1088,7		1095,5	—	1078,5		—	—	—	1072,0	—
	76 Os	C	—	—	—	1194,59	—	—	—		1022,47	—	—		—	—	—	—	—
		D	1325,8	—	—	1194,6	—	1054,1	—		1022,5	—	1005,3		—	—	—	999,1	—
	77 Ir	C	—	—	—	1154,95	—	—	—		988,41	—	—		—	—	—	* 963,6	—
		D	1283,6	—	1204,4	1154,9	—	1019,7	982,2		988,4	—	971,4		—	—	—	963,7	—
	78 Pt	C	1240,1	—	—	1117,22	—	985,5	—		955,45	—	—		—	—	—	* 931,7	—
		D	—	—	1163,4	1117,2	—	985,1	950,3		955,4	—	937,9		—	—	—	* 931,6	—
	79 Au	C	1199,5	—	—	1080,93	—	954,2			924,37	—	—		—	—	—	* 901,25	—
		D	—	—	—	1080,9	—	953,3	—	—	924,4	—	907,5		—	—	—	901,2	—
	81 Tl	C	1125	—	—	1012,66	—	894,2	—	—	865,29	—	—		—	—	—	841,7	—
	82 Pb	C	1090,2	—	—	* 979,90	—	863,9	—	—	837,08	—	—		—	—	—	* 813,70	—
	83 Bi	C	1057	—	—	949,30	—	837,8	—	—	810,65	—	—		—	—	—	* 787,4	—
	90 Th	C	—	—	—	* 762,59	—	—	—	—	651,03	—	—		—	—	—	630,1	—
	92 U	C	802,9	—	—	718,07	—	—	—	—	612,83	—	—		—	—	—	592,6	—
		D	802,8	—	—	718,1	—	634,4	—	—	612,8	—	* 603,8		—	—	—	593,3	—
L_3	51 Sb	D	—	3185,3	3146,3	2989	2985,5	—	2694,6	2687,8	—		—	—	—	2633,2		—	—
		H	—	—	3145,14	—	—	—	—	—	—		—	—	—	—		—	—
	58 Ce	D	—	—	—	—	—	—	1960,7	1954,8	—		—	—	—	1894,4		—	—
		H	—	2344,80	2305,9	—	—	—	—	—	—		—	—	—	—		—	—
	73 Ta	C	—	1342,2	1303,3	—	—	—	1102,0	1096,2	—		—	—	—	1062,4		—	—
	74 W	C	—	1298,74	1260,00	—	1203,1	—	1065,84	1059,65	—		—	—	—	1026,47		—	—
		D	—	1298,5	1259,8	1210,5	1203,4	—	1065,6	1059,2	1043,9		—	—	—	1026,2		—	—
	76 Os	C	—	1215,0	1177,2	—	—	—	—	—	—		—	—	—	—		—	—
		D	—	1215,9	1177,4	—	1123,8	—	995,7	988,8	975,0		—	—	—	957,2		—	—
	77 Ir	C	—	1176,4	1137,9	—	—	—	* 963,6	956,6	—		—	—	—	—		—	—
		D	—	*1177,3	1138,4	1094,7	1087,4	—	962,3	956,8	942,6		—	—	—	924,5		—	—
	78 Pt	C	—	*1139,8	*1099,50	—	—	—	* 931,7	925,6	—		—	—	—	895,0		—	—
		D	—	*1140,0	*1099,6	1059,3	1052,4	—	* 931,6	925,8	912,0		—	—	—	894,0		—	—
	79 Au	C	—	1104,4	—	—	—	—	* 901,25	895,68	—		—	—	—	866,3		—	—
		D	—	1104,1	1065,2	1025,4	1018,2	—	902,5	896,1	883,0		—	—	—	865,8		—	—
	81 Tl	C	—	1037,1	997,8	—	—	—	844,7	837,9	—		—	—	—	810,0		—	—
	82 Pb	C	—	1004,69	966,02	—	—	—	818,2	* 813,70	—		—	—	—	783,6		—	—
	83 Bi	C	—	975,4	935,7	—	—	—	792,9	* 787,4	—		—	—	—	761		—	—
	90 Th	C	—	789	752,1	—	—	—	—	—	—		—	—	—	—		—	—
	92 U	C	—	745,4	708,4	—	—	—	604,4	597,0	—		—	—	—	—		—	—
		D	—	* 745,9	708,6	685,3	679,7	—	* 603,8	596,8	—		—	—	—	573,8		—	—

Tabelle 9.

L-Serie, 51 Sb, 58 Ce und 73 Ta bis 92 U, ν/R.

Anfangsniveau		M_5	M_4	M_3	M_2	M_1	N_7	N_6	N_5	N_4	N_3	N_2	N_1	O_5	O_4	O_3	O_2	O_1
		ε			α′	α	ι			γ′	γ			λ			ζ′	ζ
		l	α_3		α_2	α_1	β_6	β_2'' (β_8)		β_2'	β_2	β_7'		β_7			β_5	
L_1	51 Sb D	—	266,6		—	—	—	302,6		302,1		—		—	—	—	307,1	
	51 Sb H	—	—		264,84	265,53	—	—		—		—		—	—	—	—	
	58 Ce D	—	—		—	—	—	—		—		—		—	—	—	422,8	
	58 Ce H	—	—		355,25	356,51	—	—		413,49		—		—	—	—	—	
	73 Ta C	528,50	—		595,83	600,20	686,87	715,60		711,40		723,30		—	—	—	728,65	
	73 Ta H	—	—		595,85	600,20	—	—		711,55		—		—	—	—	—	
	74 W C	544,02	—		613,85	618,45	708,03	737,60		733,76		746,45		—	—	—	751,56	
	74 W D	—	—		—	—	707,3	737,3		733,5		745,5		—	—	—	750,3	
	76 Os C	—	—		651,75	656,45	756,33	—		780,58		—		—	—	—	799,65	
	76 Os D	—	658,8		651,2	656,4	752,7	784,5		779,1	780,3	793,9		—	—	—	800,1	
	77 Ir C	—	—		670,35	675,84	777,75	808,82		804,39		—		—	—	—	826,18	
	77 Ir D	—	678,4		670,2	675,8	* 774,0	808,4		804,4		819,8		822,3	—	—	825,9	
	78 Pt C	608,64	—		689,73	695,58	* 799,52	833,90		* 828,80		844,93			—	—	851,57	
	78 Pt D	—	698,3		689,8	695,6	* 799,4	832,9		827,7	* 828,7	844,5		846,7	—	—	851,7	
	79 Au C	625,63	—		709,22	715,53	820,51	858,94		853,46		870,77			—	—	877,70	
	79 Au D	—	718,2		—	716,0	821,9	857,8	858,9	852,1	853,6	870.2		871,8	—	—	877,9	
	81 Tl C	—	—	—	749,39	756,42	869,49	—		904,16		922,67			—	—	931,47	
	82 Pb C	676,70	—	—	769,96	777,51	894,50	936,03		* 929,98		950,22			—	—	959,72	
	83 Bi C	694,07	—	—	790,20	798,54	918,97	—		956,28		—			—	—	987,98	
	90 Th C	819,19	—	—	944,08	955,78	1102,78	—		1151,93		—			—	—	*1194,94	
	92 U C	855,84	—	—	990,37	1003,23	1158,70	—		1210,70		1238,14			—	—	1258,43	
	92 U D	—	—	—	—	—	1159,5	*1221,7		1207,5	1210,7	1237,5		1241,5	—	—	1258,3	
		η			β		ϰ			δ				μ			ϑ	
		η		β_{11}	β_1		ν_5	γ_{10}		γ_1		γ_6					γ_2 (γ_6)	
L_2	51 Sb D	259,8	—	—	282,9	—	—	320,9		320,3	—	—		—	—	—		—
	51 Sb H	—	—	—	283,13	—	—	—		320,29	—	—		—	—	—		—
	58 Ce D	—	—	—	—	—	—	—		446,1	—	—		—	—	—		—
	58 Ce H	—	—	—	387,60	—	—	—		445,74	—	—		—	—	—		—
	73 Ta C	621,83	—	—	688,51	—	778,86	—		803,04	—	—		—	—	—	820,98	—
	73 Ta H	—	—	—	688,51	—	—	—		803,6	—	—		—	—	—		—

L_2 74 W	C	642,78	—	—	712,39	—	807,03	—		831,81	—	—	—	—	—	850,08	—
	D	—	—	682,9	712,6	—	807,3	837,0		831,8	—	844,5	—	—	—	850,1	—
76 Os	C	—	—	—	762,83	—	—	—		891,25	—	—	—	—	—	—	—
	D	687,3	—	—	762,8	—	864,5	—		891,2	—	906,5	—	—	—	912,1	—
77 Ir	C	—	—	—	788,99	—	—	—		921,96	—	—	—	—	—	* 945,67	—
	D	709,9	—	756,6	789,0	—	893,7	927,8		922,0	—	938,1	—	—	—	945,6	—
78 Pt	C	734,82	—	—	815,65	—	924,71	—		953,77	—	—	—	—	—	* 978,07	—
	D	—	—	783,3	815,7	—	925,1	958,9		953,8	—	971,6	—	—	—	* 978,2	—
79 Au	C	759,97	—	—	843,02	—	955,01			985,83	—	—	—	—	—	*1011,12	—
	D	—	—	—	843,1	—	955,9	—	—	985,9	—	1004,2	—	—	—	1011,2	—
81 Tl	C	810,30	—	—	899,88	—	1019,14	—	—	1053,12	—	—	—	—	—	1082,69	—
82 Pb	C	835,90	—	—	* 929,98	—	1054,83	—	—	1088,37	—	—	—	—	—	*1119,97	—
83 Bi	C	862,32	—	—	959,93	—	1087,75	—	—	1124,10	—	—	—	—	—	*1157,55	—
90 Th	C	—	—	—	*1194,94	—	—	—	—	1399,74	—	—	—	—	—	1446,20	—
92 U	C	1134,95	—	—	1269,08	—	—	—	—	1486,98	—	—	—	—	—	1537,76	—
	D	1135,1	—	—	1269,0	—	1436,4	—	—	1487,1	—	* 1509,2	—	—	—	1535,9	—

			φ' β_4	φ β_3	β_9 (β_{10})	β_8 (β_9)		χ' γ_7 (γ_2)	χ γ_3	γ_9				ψ' ψ γ_4		
L_3 51 Sb	D	—	286,1	289,6	305	305,2	—	338,2	339,0	—	—	—	—	346,1	—	—
	H	—	—	289,73	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—	—
58 Ce	D	—	—	—	—	—	—	464,8	466,2	—	—	—	—	481,0	—	—
	H	—	388,62	395,18	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—	—
73 Ta	C	—	678,93	699,23	—	—	—	826,90	831,28	—	—	—	—	857,74	—	—
74 W	C	—	701,66	723,23	—	757,43	—	854,98	859,97	—	—	—	—	887,77	—	—
	D	—	701,8	723,3	752,8	757,2	—	855,2	860,3	872,9	—	—	—	888,0	—	—
76 Os	C	—	748,25	774,08	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—	—
	D	—	749,5	774,0	—	810,9	—	915,2	921,6	934,6	—	—	—	952,0	—	—
77 Ir	C	—	774,62	800,82	—	—	—	* 945,67	952,64	—	—	—	—	—	—	—
	D	—	* 774,0	800,5	832,4	838,0	—	947,0	952,4	966,8	—	—	—	985,7	—	—
78 Pt	C	—	* 799,52	* 828,80	—	—	—	* 978,07	984,52	—	—	—	—	1018,17	—	—
	D	—	* 799,4	* 828,7	860,3	865,9	—	* 978,2	984,3	999,2	—	—	—	1019,3	—	—
79 Au	C	—	825,15	—	—	—	—	*1011,12	1017,41	—	—	—	—	1051,86	—	—
	D	—	825,3	855,5	888,7	895,0	—	1009,7	1016,9	1032,0	—	—	—	1052,5	—	—
81 Tl	C	—	878,64	913,23	—	—	—	1078,83	1087,54	—	—	—	—	1125,00	—	—
82 Pb	C	—	907,01	943,30	—	—	—	1113,87	*1119,97	—	—	—	—	1162,89	—	—
83 Bi	C	—	934,22	973,85	—	—	—	1149,20	*1157,55	—	—	—	—	1196,89	—	—
90 Th	C	—	1155,00	1211,67	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—	—
92 U	C	—	1222,53	1286,29	—	—	—	1507,82	1526,41	—	—	—	—	—	—	—
	D	—	*1221,7	1286,0	1329,7	1340,7	—	*1509,2	1526,9	—	—	—	—	1588,1	—	—

Tabelle 7.
L-Serie, 29 Cu bis 73 Ta, ν/R.

	α', α_2 $L_1 - M_2$	α, α_1 $L_1 - M_1$	α_3	β, β_1 $L_2 - M_2$	φ, β_4 $L_3 - M_4$	φ, β_3 $L_3 - M_3$	γ, β_2 $L_1 - N_3$	δ, γ_1 $L_2 - N_4$
29 Cu	—	68,47	—	—	—	—	—	—
30 Zn	—	74,55	—	76,25	—	—	—	—
32 Ge	—	87,50	—	—	—	—	—	—
33 As	—	94,42	94,75	97,00	—	—	—	—
34 Se	—	101,58	101,94	104,53	—	—	—	—
35 Br	—	109,04	109,44	112,39	—	—	—	—
37 Rb	—	124,78	125,30	129,06	—	—	—	—
38 Sr	—	133,07	133,64	137,87	—	—	—	—
39 Y	—	141,61	142,24	147,01	—	—	—	—
40 Zr	—	150,47	151,19	156,50	—	—	—	—
41 Nb	—	159,55	160,19	166,29	—	—	172,09	—
42 Mo	—	168,93	169,62	176,40	—	—	—	193,42
44 Ru	188.13	188,44	—	197,62	—	—	—	218,38
45 Rh	198,29	198,62	—	208,77	—	—	—	231,53
46 Pd	208,69	209,07	—	220,25	—	—	—	245,19
47 Ag	219,37	219,80	220,55	232,06	236,01	238,27	246,69	259,15
48 Cd	230,32	230,82	—	244,29	248,00	250,59	—	273,81
49 In	241,55	242,12	243,00	256,84	—	—	—	288,79
50 Sn	253,05	253,67	—	269,76	—	276,33	287,56	304,26
51 Sb	264,84	265,53	—	283,13	—	289,73	—	320,29
52 Te	276,89	277,65	—	296,83	299,75	303,61	—	336,69
53 J	289,20	290,05	—	310,91	—	—	331,83	353,54
55 Cs	314,70	315,74	—	340,29	342,50	347,41	—	389,00
56 Ba	327,90	329,01	—	355,64	357,38	362,89	379,80	407,42
57 La	341,43	342,61	—	371,44	372,81	378,85	—	426,37
58 Ce	355,25	356,51	—	387,60	388,62	395,18	413,49	445,74
59 Pr	369,28	370,77	—	404,30	—	411,89	430,91	465,68
60 Nd	383,58	385,25	—	421,44	—	429,37	—	486,30
62 Sa	413,14	415,14	—	457,09	—	—	—	528,86
63 Eu	428,35	430,58	—	475,52	—	—	—	
64 Gd	443,94	446,27	—	494,58	—	—	—	573,60
65 Tb	459,69	462,21	—	514,05	—	522,93	542,65	—
66 Ds	475,69	478,44	—	533,96	—	—	562,58	—
67 Ho	492,02	494,98	—	554,45	—	563,62	582,77	—
68 Er	508,68	511,82	—	575,48	—	—	602,99	—
70 Ad	542,76	546,38	—	—	—	—	—	—
71 Cp	560,30	564,06	—	—	—	—	—	—
73 Ta	595,85	600,20	—	688,51	—	—	711,55	803,06

genden an: bei 74 W: $\lambda = 1218{,}0$, $\nu/R = 748{,}2$; bei 79 Au: $\lambda = 1041{,}2$, 1036,0, 1031,6, 1029,6, 920,1, 899,0, $\nu/R = 875{,}2$, 879,6, 883,4, 885,1, 990,4, 1013,6; bei 92 U: $\lambda = 568{,}9$, $\nu/R = 1601{,}8$. Die letztgenannte Linie ($L\omega$) verdient besonderes Interesse, da sie als kurzwelligste L- (L_3-) Linie des Urans sogar die ψ-Linie an Härte übertrifft. Ihr Ausgangsniveau ist das oberste Niveau der P-Schale: P_1[9]). Die Au-Linien $\lambda = 1036{,}0$ ($L\varrho$) und 899,0 ($L\sigma$), die miteinander die L-Dublettdifferenz bilden, entsprechen anscheinend den Elektronenübergängen aus dem untersten P-Niveau P_3 in die Niveaus L_1 und L_2[9]).

3. *M-Serie* (Tab. 10, 11). Die hier mitzuteilenden Messungen stammen von *W. Stenström* (Diss. Lund 1919).

II. Systematik.

1. Termdarstellung.

Nach der Kosselschen Theorie der Anregungs- und Emissionsvorgänge im Atominnern ist bekanntlich zu fordern, daß sich die Frequenz jeder Röntgenemissionslinie streng als Differenz der Frequenzen zweier Absorptionsgrenzen des betr. Elementes darstellen lasse:

$$\nu/R = G_1 - G_2.$$

Die Grenzfrequenzen G_1 und G_2 entsprechen vollkommen den Termen der optischen Spektren. Mit Rücksicht auf die elementare Vorstellung, daß jedem solchen Term eine bestimmte Gruppe

[9]) Vgl. *Dauvillier*, l. c., und *G. Wentzel*, Zs. f. Phys. 8, 85, 1921.

Tabelle 10.
M - Serie, λ.

	α′ M_1–N_2	α M_1–N_1	β M_2–N_2	γ M_3–N_3	δ M_3–O_1	ε M_4–N_4
66 Ds	—	9509	9313	—	—	—
67 Ho	—	9123	8930	—	—	—
68 Er	—	8770	8561	—	—	—
70 Ad	—	8123	7895	—	—	—
71 Cp	—	7818	7587	—	—	—
73 Ta	—	7237	7011,5	—	—	—
74 W	—	6973	6745	6091	—	—
76 Os	—	6477	6250	—	—	—
77 Ir	—	6245	6029	—	—	—
78 Pt	—	6028	5812	5311	—	—
79 Au	—	5819	5601	5115	—	—
81 Tl	5461	5449,9	5238,4	4802	—	—
82 Pb	5287	5275,1	5064,8	4663,7	—	—
83 Bi	5119	5107,2	4899,3	4523,8	—	—
90 Th	4143	4129,15	3933,3	3656,5	3127	3006
92 U	3916	3901,4	3708,3	3471,4	2943	2813

Tabelle 11.
M - Serie, ν/R.

	α′ M_1–N_2	α M_1–N_1	β M_2–N_2	γ M_3–N_3	δ M_3–O_1	ε M_4–N_4
66 Ds	—	95,83	97,85	—	—	—
67 Ho	—	99,88	102,0	—	—	—
68 Er	—	103,9	106,4	—	—	—
70 Ad	—	112,2	115,4	—	—	—
71 Cp	—	116,6	120,1	—	—	—
73 Ta	—	125,9	130,0	—	—	—
74 W	—	130,7	135,1	149,6	-	—
76 Os	—	140,7	145,8	—	—	—
77 Ir	—	145,9	151,1	—	—	—
78 Pt	—	151,2	156,8	171,6	—	—
79 Au	—	156,6	162,7	178,2	—	—
81 Tl	166,9	167,21	173,96	189,8	—	—
82 Pb	172,4	172,75	179,92	195,40	—	—
83 Bi	178,0	178,43	186,00	201,44	—	—
90 Th	220,0	220,70	231,68	249,22	291,4	303,1
92 U	232,7	233,58	245,75	262,51	309,6	323,9

Tabelle 12.

Anfangsniveaus:	Endniveaus: K	L_1	L_2	L_3	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
L_1	$K\,\alpha\ \alpha_1$	—	—	—	—	—	—	—	—
L_2	$\alpha'\ \alpha_2$	—	—	—	—	—	—	—	—
L_3	(α_3)	—	—	—	—	—	—	—	—
M_1	—	$L\,\alpha\ \alpha_1$	—	$(\beta_8\ \beta_9)$	—	—	—	—	—
M_2	—	$\alpha'\ \alpha_2$	$\beta\ \beta_1$	$(\beta_9\ \beta_{10})$	—	—	—	—	—
M_3	$\beta\ \beta_1$	—	(β_{11})	$\varphi\ \beta_3$	—	—	—	—	—
M_4	$\beta'\ \beta'$	—	—	$\varphi'\ \beta_4$	—	—	—	—	—
M_5	—	$\varepsilon\ \ l$	$\eta\ \ \eta$	—	—	—	—	—	—
N_1	—	$\{\ (\beta'_7)$	$\{\ (\gamma_6)$	—	$M\ \alpha$	—	—	—	—
N_2	—				α'	β	—	—	—
N_3	—	$\gamma\ \beta_2$	—	$\{\ (\gamma_9)$	—	—	γ	—	—
N_4	—	$\gamma'\ \beta_2'$	$\delta\ \ \gamma_1$		—	—	γ'	ε	—
N_5	$\gamma\ \beta_2$	—	—	$\chi\ \ \gamma_3$	×	×	—	—	×
N_6	γ'	—	—	$\chi'\ \gamma_7\,\gamma_2$	—	×	—	—	×
N_7	—	$\iota\ \ \beta_6$	$\varkappa\ \ \gamma_5$	—	—	—	×	×	—
O_1	—	$\zeta\ \ \beta_5$	—	—	—	—	δ	—	—
O_2	—	ζ'	$\vartheta\ \ \gamma_2\,\gamma_6$	—	—	—	δ'	×	—
O_3	×	—	—	$\psi\ \ \gamma_4$	×	×	—	—	×
O_4	×	—	—	ψ'	—	×	—	—	×
O_5	—	$\lambda\ \ \beta_7$	μ		—	—	×	×	—
P_1	×	—	—	$\omega\ \ \gamma_8$	×	×	—	—	×
P_2	×	—	—	ω'	—	×	—	—	×
P_3	—	ϱ	σ	—	—	—	×	×	—
	K-Serie	*L*-Serie			*M*-Serie				

oder Schale von Elektronen entspricht, und daß der Emissionsprozeß in einem Elektronenübergang aus einer Schale in eine energetisch tiefere besteht, pflegt man G_1 als Endniveau und G_2 als Anfangsniveau der betr. Linie (des betr. Elektronenübergangs) zu bezeichnen[10]).

[10]) In Wirklichkeit entspricht G_1 dem Anfangs- und G_2 dem Endzustand des Atoms; vgl. die in Anm. [7]) zitierte Arbeit des Verf., S. 442 u. 452.

Die Aufgabe, allen bekannten Röntgenlinien eindeutig ihre Anfangs- und Endniveaus zuzuordnen, kann heute als gelöst gelten. Man braucht zu diesem Zwecke, soweit es sich um einfach ionisierte Atome handelt, 24 Terme, nämlich 1 *K*-Term, 3 *L*-Terme, 5 *M*-Terme, 7 *N*-Terme, 5 *O*-Terme und 3 *P*-Terme. Wie dann Linien und Terme einander zuzuordnen sind, zeigt Tab. 12; dieselbe ist vollkommen äquivalent mit der in

Tab. 4 bis 11 angegebenen Termdarstellung der einzelnen Linien. Die „Funkenlinien" (vgl. S. 373 unten $K\alpha'_1\,\alpha_3\,\alpha_4\,\alpha_5\,\alpha_6\,\beta_3\,\beta'\,\beta''\,L_3\,\alpha_3\,\beta_2''\,\gamma_{10}$ finden natürlich in Tab. 12 keinen Platz; sie sind Emissionen zwei- oder dreifach ionisierter Atome und stellen also Kombinationen ganz anderer Energieterme dar. Was ihre Deutung und Termdarstellung im einzelnen anlangt, muß auf die oben (Anm. [7]) zitierte Arbeit des Verf., insbesondere § 4, verwiesen werden.

Desgleichen müssen wir darauf verzichten, auf die historische Entwicklung des Termproblems einzugehen; bezüglich der Fortschritte in jüngerer Zeit verweisen wir auf die Arbeiten von *W. Duane* und *W. Stenström* (Proc. Nat. Acad. *6*, 477; 1920), *W. Kossel* (Zs. f. Phys. *1*, 119; 1920), *A. Sommerfeld* (ebenda *1*, 135; 1920), *A. Smekal* (ebenda *5*, 91 u. 121; 1921), *D. Coster* (ebenda *5*, 139; 1921; *6*, 185; 1921), *G. Wentzel* (ebenda *6*, 84, 1921; *8*, 85, 1921), *A. Sommerfeld* und *G. Wentzel* (ebenda *7*, 86; 1921), *A. Dauvillier* (C. R. *172* u. *173*; 1921).

Die Angaben der Tabelle 12 sind durch eine große Reihe von Additionsbeziehungen gemäß dem Kombinationsprinzip verifiziert und sichergestellt; systematische Kombinationsdefekte, wie sie die früheren unvollständigen Niveauschemata infolge unrichtiger Liniendeutung aufwiesen, sind nicht vorhanden. Überdies sind die Endniveaus G_1 (d. h. die Energiewerte der Atome im angeregten Anfangszustand) für die intensiveren Linien durch direkte Anregungsversuche (Spannungsmessungen) ermittelt und in Übereinstimmung mit Tab. 12 gefunden worden; man vergleiche: *D. L. Webster* (Phys. Rev. *7*, 599, 1916; Proc. Nat. Acad. *2*, 90, 1916; *6*, 26, 1920), *F. C. Hoyt* (ebenda *6*, 639, 1920), *P. A. Roß* (Phys. Rev. *18*, 336, 1921). Zweifel, ob die Anfangsniveaus gewisser Linien ($\beta_7, \beta_7', \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_6, \gamma_7$) in die *N*- oder in die *O*-Schale zu verlegen seien, ließen sich u. a. durch Intensitätsbetrachtungen beseitigen; die zur *O*-Schale gehörenden Linien zeigen nämlich von 74 W über 76 Os, 77 Ir, 78 Pt zu 79 Au eine charakteristische Intensitätszunahme (vgl. *G. Wentzel*, Zs. f. Phys. *6*, 84, 1921, S. 88; *A. Dauvillier*, C. R. *173*, 647, 1458, 1921). Dies erklärt sich daraus, daß sich die *O*-Schale in der Umgebung der Platintriade aus einer Achter- in eine Achtzehnerschale umlagert.

2. Quantenzahlschema, Termmultiplizitäten.

Besonders überzeugend für die Richtigkeit des so erhaltenen Niveau- und Linienschemas sind die in diesem herrschenden Gesetzmäßigkeiten. Wir diskutieren dieselben an Hand des Quantenzahlenschemas Tab. 13. Hierbei beschränken wir uns aber ausdrücklich auf die schweren Elemente ($Z > 78$). Bei leichteren Elementen sind zweifellos die äußeren Schalen unvollständig oder überhaupt nicht vorhanden; doch läßt sich empirisch noch nicht entscheiden, wie Tab. 13 dementsprechend abzuändern wäre.

Wir ordnen zunächst in Anlehnung an *Bohr*[11]) jeder der 6 Atomschalen je zwei Quantenzahlen zu: die „scheinbare Quantenzahl" s und die „Quantensumme" k (bei *Bohr* schlechthin „Quantenzahl" genannt). Letztere nimmt von Schale zu Schale gleichmäßig um 1 zu; erstere stimmt mit ihr bis zur *N*-Schale einschließlich überein, nimmt dann aber in der *O*- und *P*-Schale wieder auf 3 und 2 ab. s bestimmt nach *Bohr* die Unterteilung der Schalen in energetisch verschiedenwertige Elektronengruppen; eine *nichtionisierte* Schale soll gerade s-fach unterteilt sein. Unser empirischer Befund sagt ferner aus, daß *jeder Schale gerade* $2s-1$ *Energieterme entsprechen*, d. h. daß die betr. Schale durch einfache Ionisation in $2s-1$ energetisch verschiedene Modifikationen übergehen kann.

Tabelle 13.

	K	L-Schale	M-Schale	N-Schale	O-Schale	P-Schale
Scheinbare Quantenzahl ..... s	1	2	3	4	3	2
Quantensumme ..... k	1	2	3	4	5	6
	K	$L_1\,L_2\,L_3$	$M_1\,M_2\,M_3\,M_4\,M_5$	$N_1\,N_2\,N_3\,N_4\,N_5\,N_6\,N_7$	$O_1\,O_2\,O_3\,O_4\,O_5$	$P_1\,P_2\,P_3$
Grundquantenzahl ..... m	1	2 2 1	3 3 2 2 1	4 4 3 3 2 2 1	3 3 2 2 1	2 2 1
Azimutale Quantenzahl ..... n	1	2 1 1	3 2 2 1 1	4 3 3 2 2 1 1	3 2 2 1 1	2 1 1

Außerdem belegen wir jedes einzelne Niveau einer Schale mit zwei Quantenzahlen: der „Grundquantenzahl" m und der „Azimutalquantenzahl" n. Diese Zahlen sind so gewählt, daß bei den Niveaus mit ungeradem Index $m = n$, bei den Niveaus mit geradem Index $m = n + 1$ ist; durchweg ist: $1 \leqq n \leqq m \leqq s$.

3. Auswahlprinzip.

Das Quantenzahlschema Tab. 13 ermöglicht zunächst eine sehr einfache Formulierung des *Auswahlprinzips*, das in unserem Niveauschema gilt. Es lautet: Zwei Terme kombinieren dann und nur dann miteinander, wenn ihre Grundquantenzahlen m sich um ± 1 und zugleich ihre Azimutalquantenzahlen n sich um ± 1 oder $\overline{0}$ unterscheiden[12]). Mit Hilfe der Tabellen 12

[11]) Nature-Briefe vom 24. März u. 16. Sept. 1921.

[12]) *G. Wentzel*, Zschr. f. Phys. *6*, 84, 1921; S. 98. Vgl. auch *D. Coster*, Zschr. f. Phys. *6*, 185, 1921; S. 199.