

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Tabellen und Kurven zur Ermittlung
von mittleren freien Weglängen,
Ionisierungsquerschnitten,
Ionisierungsenergien
und therm. Emissionsstromdichten

M. Brandstetter

IPP/4/3

Juni 1962

Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Institut für Plasmaphysik GmbH und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.

I. Mittlere freie Weglänge der Atome bzw. Moleküle (bzw. Ionen)

1.) Mittlere freie Weglänge von Atomen bzw. im Gas gleicher Art :

$$\lambda = \frac{1}{4\pi \cdot \sqrt{2} \cdot n \cdot r^2} = \frac{K \cdot T}{4\pi \cdot \sqrt{2} \cdot p \cdot r^2} = \left[\frac{(\text{erg} \cdot \text{grad}^{-1}) \cdot (^\circ\text{K})}{(\text{dyn} \cdot \text{cm}^{-2}) \cdot (\text{cm})} \right] = [\text{cm}]$$

Faustformel :

$$\lambda \approx \frac{3 \cdot 10^{14}}{n} [\text{cm}] \quad n \text{ in } [\text{cm}^{-3}]$$

2.) Mittlere freie Weglänge der Ionen im Gas gleicher Art :

$$\lambda_i = \sqrt{2} \cdot \lambda$$

3.) Mittlere freie Weglänge der Elektronen im Gas mit der mittleren freien Weglänge λ :

$$\lambda_e = 4 \cdot \sqrt{2} \cdot \lambda$$

4.) Gesetz der Weglängenverteilung von Clausius :

$$N_x = N_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

n = Gasteilchendichte

r = Gaskinetisch wirksamer Radius der Gasteilchen

K = Boltzmannkonstante = $1,38 \cdot 10^{-16}$ erg-grad⁻¹

T = Temperatur des Gases

p = Druck (1 Torr = $1,33 \cdot 10^3$ dyn·cm⁻²)

m = Masse der Gasteilchen

\bar{v} = Mittlere thermische Geschwindigkeit

$N = \frac{\bar{v}}{\lambda}$ = Zahl der Zusammenstöße eines Teilchens pro Sekunde

N_0 = Zahl gleichzeitig gestarteter Teilchen

N_x = Teilchenzahl ohne Zusammenstöße auf der Strecke x .

Die mittlere freie Weglänge λ von Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Luft bei einem Druck von $p = 1$ Torr und einer Temperatur von $T = 20^\circ\text{C}$; dabei ist $\lambda \sim \frac{1}{p}$.

	N_2	O_2	H_2	Luft
Gas λ (10^{-3}cm)	4,5	4,82	8,81	4,56
Ionen λ (10^{-3}cm)	6,4	6,8	11,5	6,5
Elektronen λ (10^{-3}cm)	25,0	27,5	50,0	26,0

(Siehe Tabellen 1 und 1a)

Die Eigenschaften vakuumtechnisch wichtiger Gase
Die physikalischen Eigenschaften der wichtigsten Gase¹⁾

Eigenschaften	T(°C)	Edelgase										Uedle Gase					Luft
		He	Ne	Ar	Kr	Xe	H ₂	D ₂	N ₂	O ₂							
Atomgewicht		4,003	20,183	39,941	83,7	131,3	2,016	4,029	28,016	32,000			28,96				
Molekulargewicht $\frac{A}{M}$		6,66	33,6	66,5	139	218	3,35	6,70	46,6	53,3			$\cdot 10^{-11}$ F				
Atommasse		0,1786	0,9002	1,7838	3,708	5,845	0,08987		1,2507	1,4290			g				
Molekülmasse		--289	--216	--186	--153	--109	--253	--219,7	--196	--183			°C				
Gewicht des Normaliters	0°	1,13	1,35	1,70	2,15	2,5	1,35		1,85	1,80			$\cdot 10^{-18}$ cm				
Siedepunkt (760 Tor)	20°	0,97	1,23	1,43	1,68	1,78	1,21		1,60	1,48			$\cdot 10^{-18}$ cm				
Gaskin. Wirkungsradius r		79	56	169	112	252	76		112	132			°K				
r_{∞}		16,0	11,19	7,03	5,96	4,87	10,56		6,1	6,87			$\cdot 10^{-18}$ cm				
Verdopplungstemperatur T_r		13,32	9,4	4,73	3,63	2,62	8,81		4,5	4,82			$\cdot 10^{-3}$ cm				
λ_{∞} bei 1 Tor		18,9	13,3	6,7	5,1	3,7	11,5		6,4	6,8			$\cdot 10^{-3}$ cm				
Mittlere freie Weglänge	Gas λ	75	53	27	21	15	50		25	27,5			cm				
	Ionen λ_i	13,32	9,4	4,73	3,63	2,62	8,81		4,5	4,82			$\cdot 10^{-3}$ cm				
	Elektronen λ_e	18,9	13,3	6,7	5,1	3,7	11,5		6,4	6,8			$\cdot 10^{-3}$ cm				
	Gas λ	75	53	27	21	15	50		25	27,5			cm				
	Ionen λ_i	13,32	9,4	4,73	3,63	2,62	8,81		4,5	4,82			$\cdot 10^{-3}$ cm				
	Elektronen λ_e	18,9	13,3	6,7	5,1	3,7	11,5		6,4	6,8			$\cdot 10^{-3}$ cm				
	Gas λ	75	53	27	21	15	50		25	27,5			cm				
	Ionen λ_i	13,32	9,4	4,73	3,63	2,62	8,81		4,5	4,82			$\cdot 10^{-3}$ cm				
	Elektronen λ_e	18,9	13,3	6,7	5,1	3,7	11,5		6,4	6,8			$\cdot 10^{-3}$ cm				
	Gas λ	75	53	27	21	15	50		25	27,5			cm				
	Ionen λ_i	13,32	9,4	4,73	3,63	2,62	8,81		4,5	4,82			$\cdot 10^{-3}$ cm				
	Elektronen λ_e	18,9	13,3	6,7	5,1	3,7	11,5		6,4	6,8			$\cdot 10^{-3}$ cm				
Spezifische Wärme c_p	20° (760 Tor)	1,25		0,125			3,42		0,247	0,219			cal · K ⁻¹ · grad ⁻¹				
Verb. spez. Wärme c_p/c_v	20°	1,63	1,61	1,648	1,689	1,666	1,407		1,401	1,596							

¹⁾ Zusammenstellt und extrapoliert aus Daten in Jaeger, Kleinste Drucke, Springer, Berlin, 285, 1950. — D'Ans-Lax, Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Springer, Berlin 822 (Gp), 1013 (Gp), 1052 (Gp, Gv), 1133 (Wärmehitung), 1913. — Espe-Knoll, Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik, Springer, Berlin, 250 (Kathodendall), 1936 usw. Ionisierungsspannungen siehe Tabelle Abschnitt C, Ionisierungsspannungen der Elemente. Dampfdrucke siehe Tabelle Abschnitt D, Übersicht über die Sättigungs-Dampfdrucke der Elemente.

Die Eigenschaften vakuumtechnisch wichtiger Metalle

Physikalische Eigenschaften vakuumtechnisch wichtiger Metalle¹⁾
(geordnet nach abnehmender Schmelztemperatur)

Eigenschaften	T [°C]	W ²⁾	Re ³⁾	Ta	Mo ⁴⁾	Nb	Zr ⁵⁾	Pt ⁶⁾	Ti ⁷⁾	Pd	Fe ¹⁰⁾	Ni	Be	Cu	Ag	Al ¹¹⁾	C ¹²⁾	
Dichte ρ		19,3	20,63	16,6	10,2	8,56	6,5	21,5	4,5	12,0	7,87	8,9	1,85	8,93	10,4	2,70	2,25	g · cm ⁻³
Mohs-Härte		5 ÷ 8		6,3	5,5	≈ 4,5	6,5	4,5		4,8	4,5	3,8	7,8	2,4	2,6	2,0	1	
Schmelzpunkt F_p		3380	3172	3020	2622	2410	1820	1773	1668	1557	1535	1453	1284	1084	960	658	5800	°C
Siedepunkt K_p		5900	5900	5500	4800	5000	3700	3827	3250	≈ 2500	2735	2837	2507	2595	2212	2500	4500	°C
Zugfestigkeit	20	115	50	93	95	30 ÷ 60	95	24	66	36	25	60		40	16	9	0,50	kp · mm ⁻²
	500	55			58			18			8	34		3		0,7	0,54	
	1000	30			48			6				4					0,65	
	2000	14			≈ 35												0,85	
Dehngrenze $\sigma_{0,2}$	20	75			55				45		14	15		4	3			kp · mm ⁻²
Brinellhärte		350 ⁴⁾	≈ 200	45 ÷ 350	147	450	80	55		49	45	150 ÷ 220	60	50	20	16		kp · mm ⁻²
	20	36000	> 36000	19000	32000		10700	16500	12800	11500	21200	20100	15000	12000	8600	7100	840	kp · mm ⁻²
	500	35000									12000	15000		4000		5000		
	1000	32500										10000						
2000	27000																	
Torsionsmodul	20	22000		6300	17000			6500		5000	8000	7000		4000	2800	2700		kp · mm ⁻²
	500	21800																
	1000	18000																
	2000	2000																
Spezifische Wärme	20	0,034		0,034	0,062	0,064	0,07	0,033		0,054	0,11	0,10	0,10	0,09	0,056	0,21	0,17	cal / g · grad
	500	0,037		0,036	0,068	0,07		0,035		0,065	0,16	0,13	0,6	0,11	0,058	0,26	0,10	
	1000	0,041		0,038	0,074	0,075		0,038		0,072	0,16	0,15		0,13			0,47	
	2000	0,048		0,045	0,09	0,086											≈ 0,6	
Wahrer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	20	44,3	53	66	51	70	63	89	90	106	115	125	140	164	187	231	28	· 10 ⁻⁷ grad ⁻¹
	500	47		68	62	≈ 85	83	≈ 100		126	170	172	180	200		300	35	
	1000	51		82	76	≈ 105	130	≈ 112		147	290	205					42	
	2000	72		≈ 130	≈ 91												≈ 56	
Wärmeleitfähigkeit	20	0,39		0,13	0,38		0,038	0,17	0,045	0,14	0,17	0,20	0,43	0,94	1,00	0,53	0,38	cal / cm · s · grad
	500	0,31		0,14	0,34			0,19			0,11	0,14		0,85	0,90	0,40	0,22	
	1000	0,29		0,16	0,30			0,21			0,06	0,10					0,13	
	2000	0,31		0,20	0,19												0,04	
Spezifischer elektrischer Widerstand	20	5,0	21	12,4	5,1	13,8	41	9,88	32	10,95	8,83	6,18	6,6	1,63	1,57	2,50	≈ 80	· 10 ⁻⁴ Ω · cm
	500	18	28	37	18	≈ 30	115	28	95	≈ 20	45	36		3,3	3,0	8,4	≈ 60	
	1000	33	56	55	31		128	43,5	95		113	50					≈ 65	
	2000	66	110	88	60												≈ 80	
Gesamte Strahlung	20	2 · 10 ⁻³																W · cm ⁻²
	500	0,14		0,12	0,1	0,1	0,8	0,22			0,65	0,24			0,06	0,1	1,7	
	1000	2,3		2,1	1,9	1,9	3,5	2,3			6	2,7					12	
	2000	45		40	35	35											120	
Teilstrahlungsvermögen für $\lambda = 650 \mu\mu$	20	47		49,5	41,9			27	63		42	37,5	61	10	6	≈ 23	≈ 83	%
	500	46		47	40			28,0			40	37,5		11	6		≈ 85	
	1000	45		45	38	≈ 38	48	29,8			38	37,5		11			≈ 85	
	2000	43		41	34	≈ 36											≈ 85	
Ionisierungsspannung U_{I1}		8,1	7,8		7,2		6,92	8,8		8,3	7,83	7,6	9,3	7,67	7,58	5,94	11,24	V
Austrittsarbeit eU_A		4,54	5,04	4,12	4,24	3,96	4,13	5,76		4,98	4,77	4,99	3,92	4,29	4,73	4,25	4,55	eV
Verschmelzbar mit Gläsern der Ausdehnungskoeffizienten zwischen $\alpha =$	40				48			90		90	105			Nachgiebige Anglassungen				· 10 ⁻⁷ grad ⁻¹
	und 50				und 60			und 100		und 110	und 110							

¹⁾ Zusammengestellt und extrapoliert aus Daten in van Arkel, Reine Metalle, Springer, Berlin, 1939. — Espe-Knoll, Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik, Springer, Berlin, 9ff., 1936. — Hodgman, Handbook of Chemistry and Physics 33, Chemical Rubber Publ. Co., Cleveland, Ohio, 1952. — D'Ans-Lax, Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Springer, Berlin, 1943. — Guertler, Metalltechnisches Taschenbuch, Barth, Leipzig, 180ff., 1939. — Howe, J. Amer. Ceram. Soc. 35, 275, 1952 (C). — Espe, Werkstoffe der Elektrotechnik, Akademie-Verlag, Berlin, 1954.

Weitere Fußnoten siehe S. 716.

II. Ionisationsquerschnitt (Ionisierungsfunktion)

Die Ionisierungswahrscheinlichkeit f_1 ergibt sich zu :

$$f_1 = \alpha (U - U_1) \cdot e^{-\frac{(U-U_1)}{\beta}}$$

wobei α und β Konstanten sind, U_1 die Ionisierungsenergie und U die Elektronengeschwindigkeit (Siehe Kurve 2).

Zur besseren Bestimmung dieser Daten wird die differentielle Ionisierung angegeben. Sie ergibt sich mit der Anzahl der Ionisierungen, die von einem Elektron von bestimmter Geschwindigkeit auf 1 cm Wegstrecke durchgeführt wird :

$$S_e = f_1 \cdot \frac{1}{\lambda} \left[\frac{\text{Ionenpaare}}{\text{cm} \cdot \text{mm Hg}} \right]$$

Die differentielle Ionisierung ist damit proportional dem Druck p ($p \sim S_e$).

Die graphischen Darstellungen der Kurven 3 - 5 gelten für $p = 1$ [Torr] und $T = 0$ [°C].

Zur exakten Bestimmung des Ionisationsquerschnitts muß die Winkelverteilung der Elektronen (Ramsauer-Effekt) berücksichtigt werden.

v.Engel gibt ein Diagramm an, in dem die differentielle Ionisierung von einigen Gasarten in verschiedenen Gasarten in Abhängigkeit der Ionenenergie dargestellt ist (Siehe Kurve 6).

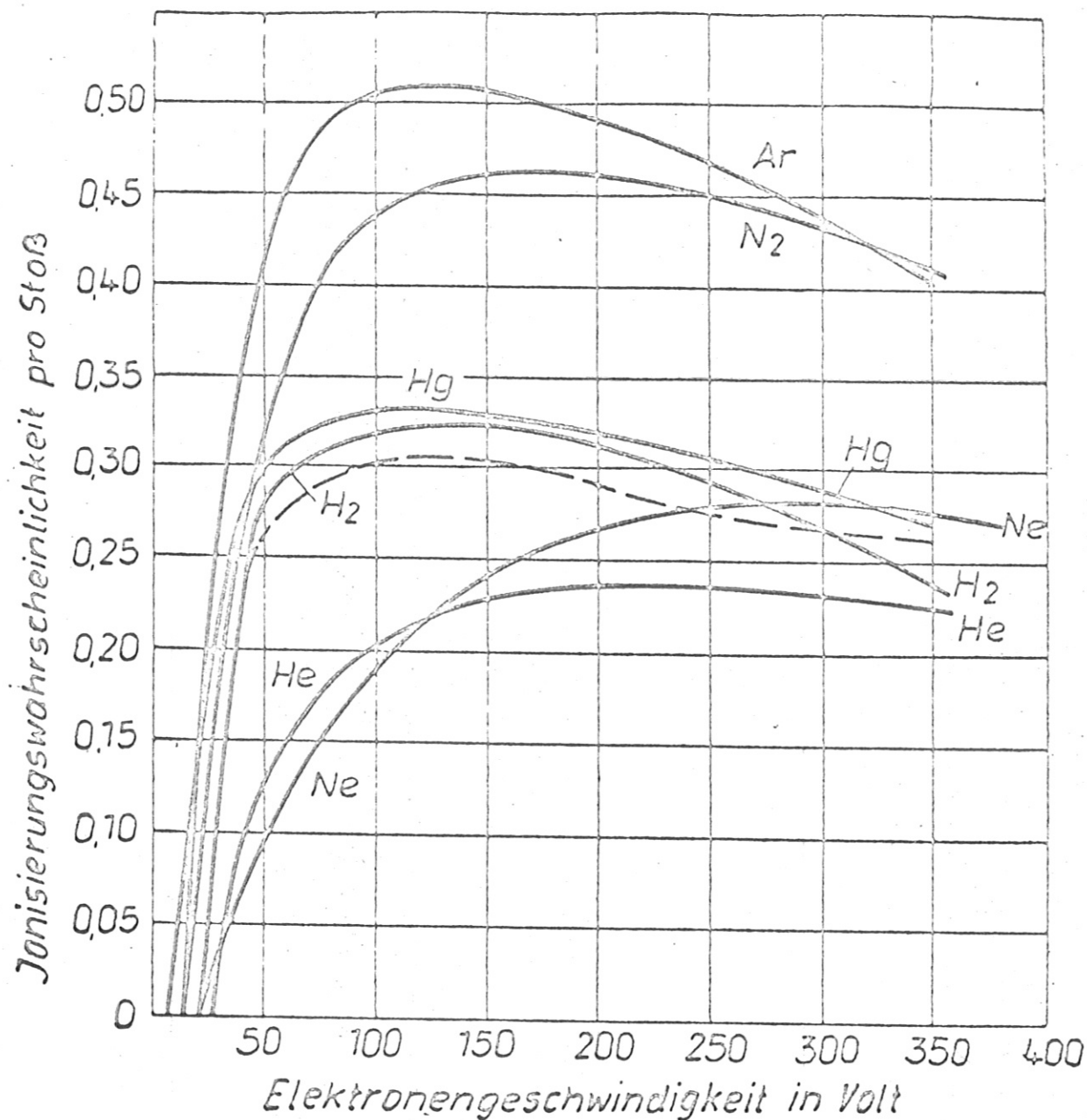


Abb. 95. Verlauf der Ionisierungsfunktion für einige Gase

Jonenpaare/cm·mm Hg

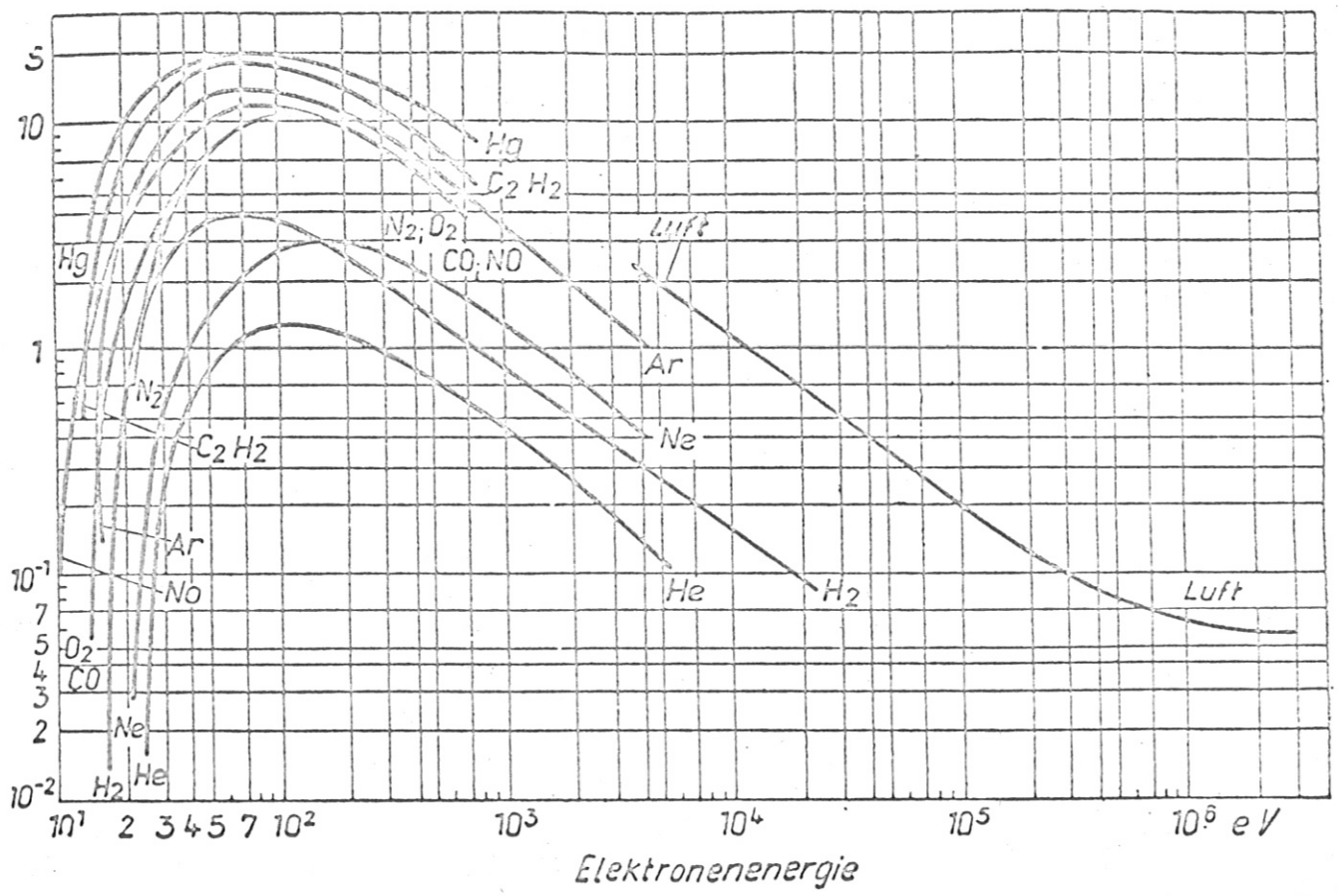
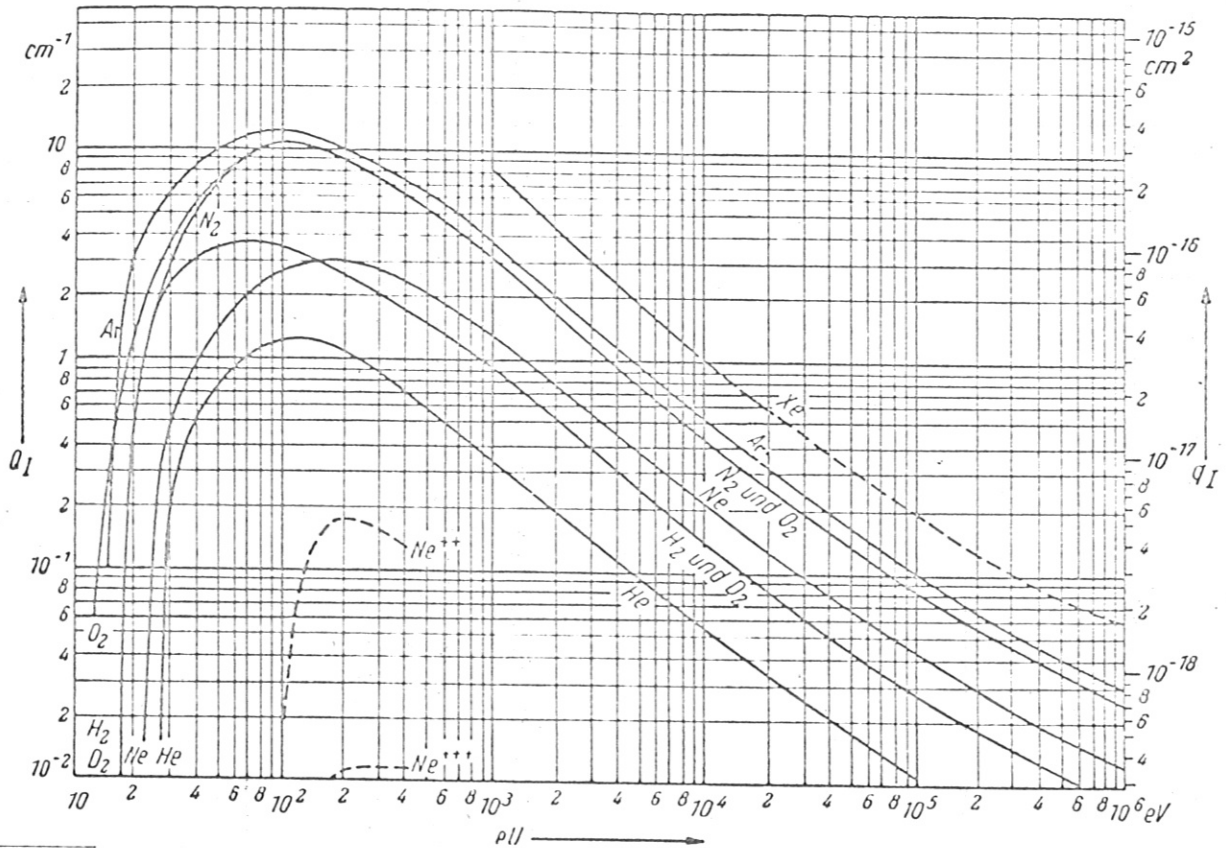


Abb. 96. Differentiale Ionisierung in verschiedenen Gasen

Kurven zur differentiellen Ionisierung von Gasen durch Elektronenstrahlen¹⁾

$$Q_I = f(eU, \text{Gasart})$$



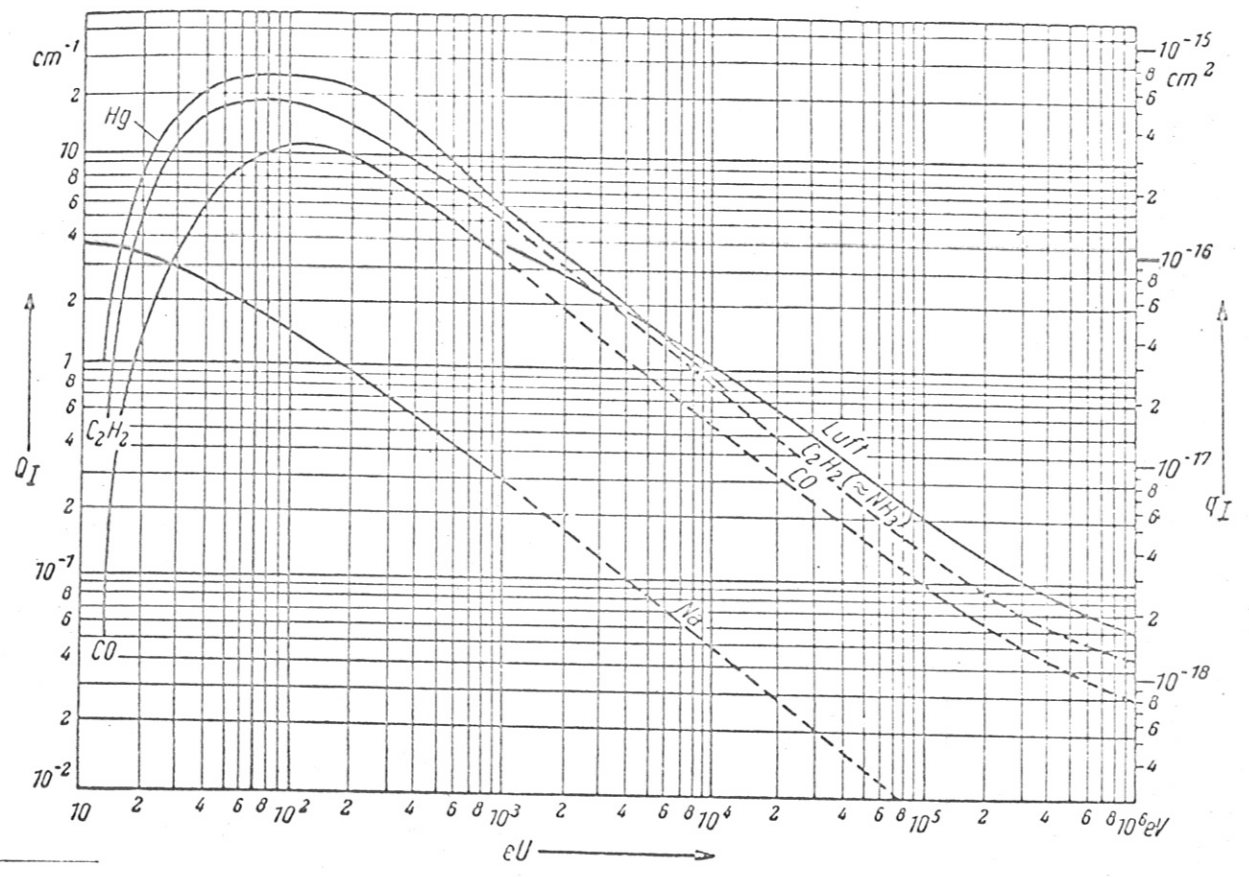
¹⁾ Zusammengestellt aus Werten in der Literatur, hauptsächlich nach von Engel-Steenbeck, Elektrische Gasentladungen I. Springer, Berlin, 35, 1932. — Hanle-Riede, Z. f. Physik 133, 537, 1952 (Xe, Ar, He). — Honig, Journ. Chem. Phys. 16, 837, 1948 (D_2).

Zu neueren Messungen der differentiellen Ionisation siehe McClure, Phys. Rev. 90, 796, 1953. — Sommermeyer-Dresel, Z. f. Physik 141, 307, 1955. (Messungen im Bereich 10^3 bis $1,5 \cdot 10^6$ eV an H_2 , N_2 , O_2 und Ar. Neue Q_I -Werte kleiner, und zwar bei 10^3 eV: $\text{H}_2 \approx 0,44$; N_2 2,44; O_2 2,74; Ar $\approx 2,1$ und bei 10^4 eV: H_2 0,085; N_2 0,356; O_2 0,36; Ar 0,42 cm^{-1}).

Zur Lichtausbeute bei Anregung durch Elektronenstoß (Anregungsfunktionen) siehe Hanle-Larché, Ergebn. exakt. Naturwiss. 10, 285, 1931. — Landolt-Börnstein, Physikalisch-Chemische Tabellen 2, 3, Ergänzungsband, Springer, Berlin, 885ff., 1935 und Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Physik-Chemie I. 1, Springer, Berlin, 327, 1950.

Kurven zur differentiellen Ionisierung von Dämpfen durch Elektronenstrahlen¹⁾

$Q_I = f(eU, \text{Dampfart})$



¹⁾ Zusammengestellt aus Werten in der Literatur, hauptsächlich nach von Engel-Steenbeck, Elektrische Gasentladungen I. Springer, Berlin, 35, 1932. -- Landolt-Börnstein, Physikalisch-Chemische Tabellen 2, 3, Ergänzungsband, Springer, Berlin, 1301, 1935 (Na). -- Massey-Burhop, Electronic and Ionic Impact Phenomena, Clarendon Press, Oxford, 39, 1952 (Hg). -- Für UCl_4 und $eU = 100$ eV findet sich der (zu große?) Meßwert $q_I = 5 \cdot 10^{-15}$ cm^2 angegeben (Guthrie-Wakerling, The characteristics of electrical discharges in magnetic fields, McGraw Hill, New York, 143, 1949).

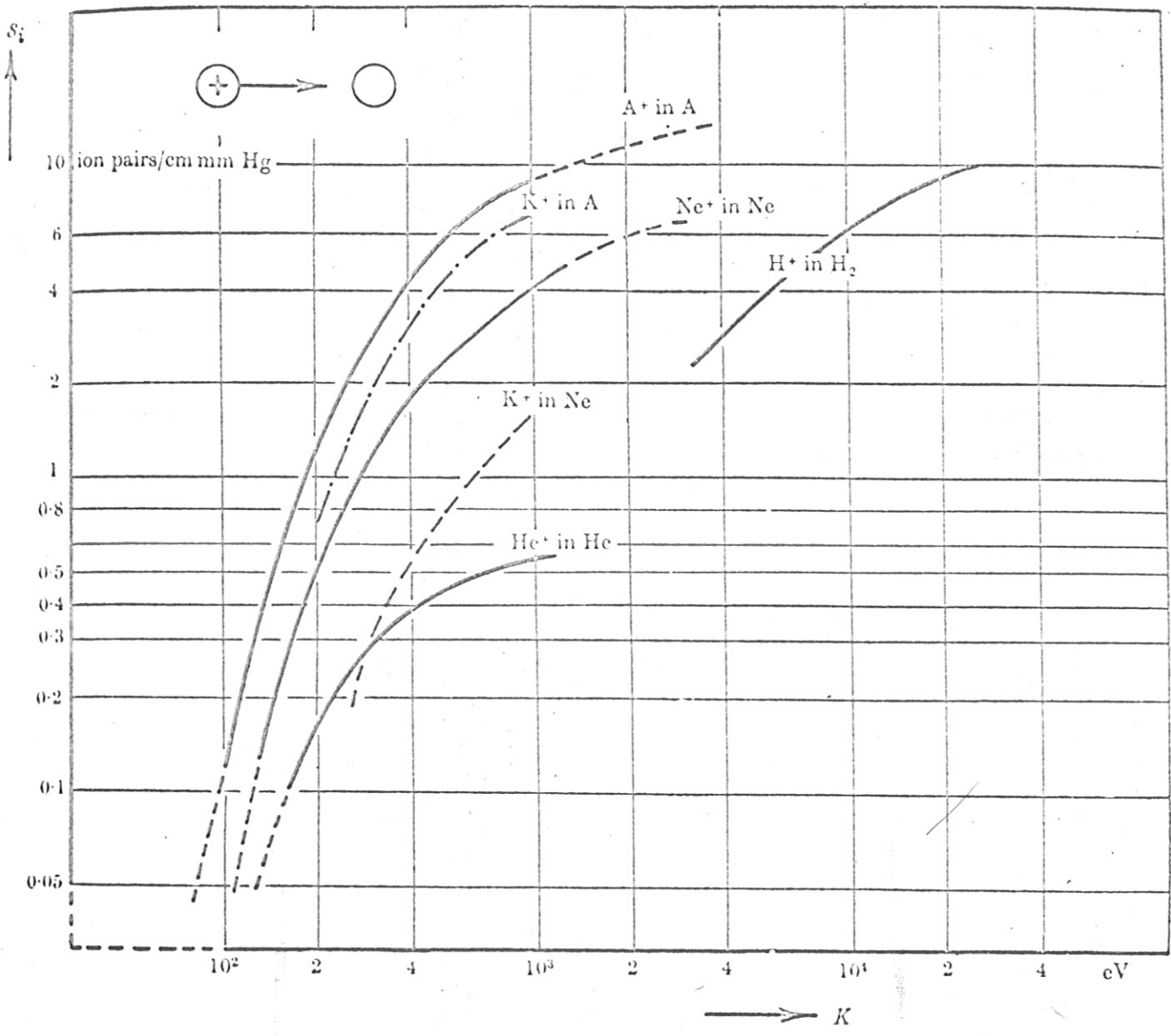


FIG. 36. Efficiency of ionization s_i of ions in various gases as a function of their energy K at 1 mm Hg and $0^\circ C$ (89, 91).

III. Ionisierungsspannungen

Die folgenden Tabellen zeigen die Ionisierungsspannungen für die Elemente in verschiedenen Ionisierungsstufen.

Z = Ordnungszahl des Elements

U_{I_1} = Ionisierungsspannung des neutralen, nicht angeregten Atoms

U_{I_2} = Ionisierungsspannung des einfach ionisierten, nicht angeregten Atoms

usw.

W_{I_1} = Ionisierungswärme, für das neutrale, nicht angeregte Atom

(Siehe Tabellen 7 - 10)

Ionisierungsspannungen der Elemente
Tabelle der Ionisierungsspannungen in Volt¹⁾

Die in schräger Schrift gedruckten Zahlen sind gemessene Werte. Die ()-Zahlen sind von Iritzen mit Näherungsformel auf etwa $\pm 2\%$ berechnete Werte. Die einfachen Zahlen sind extrapolierte Werte. [F]-Zahlen stellen angenäherte Meßwerte dar

Z	Element	$\frac{W_{I_1}}{\text{keil} \cdot \text{mol}^{-1}}$	U_{I_1}	U_{I_2}	U_{I_3}	U_{I_4}	U_{I_5}	U_{I_6}	U_{I_7}	U_{I_8}	U_{I_9}	$U_{I_{10}}$	$U_{I_{11}}$	$U_{I_{12}}$	$U_{I_{13}}$	$U_{I_{14}}$	$U_{I_{15}}$	$U_{I_{16}}$	$U_{I_{17}}$	$U_{I_{18}}$	$U_{I_{19}}$	$U_{I_{20}}$	
1	H	313,2	13,595																				
2	He	566,3	24,580	54,400																			
3	Li	124,2	5,300	75,62	122,42																		
4	Be	214,7	9,320	18,21	153,85	217,66																	
5	B	191,1	8,296	23,45	37,92	239,30	346,13																
6	C	239,5	11,261	21,376	47,86	61,48	391,99	489,81															
7	N	335,0	14,51	29,60	47,426	77,45	97,86	551,93	660,83														
8	O	313,7	13,611	35,15	51,93	77,39	113,87	138,08	739,11	871,72													
9	F	401,3	17,418	31,98	62,65	87,23	111,21	157,72	185,11	935,8													
10	Ne	496,7	21,539	41,07	63,5	97,16	126,1	157,9	207,2	239,1	1195,4	1300,2											
11	Na	118,4	5,178	47,29	71,8	98,88	138,6	172,4	208,11	261,7	299,7	1164,7	1643,9										
12	Mg	176,1	7,611	15,03	78,2	109,3	111,23	186,8	225,3	265,81	328,0	367,2	1761,2	1958,7									
13	Al	137,9	5,981	18,82	28,11	119,96	153,8	190,42	241,8	285,13	339,1	398,6	411,5	2971,3	2298,8								
14	Si	187,8	8,119	16,31	33,46	45,13	166,73	205,1	246,41	301,9	354,8	401,3	475,9	522,8	2436,0								
15	P	213,1	10,55	19,65	30,16	51,35	65,01	220,41	263,3	309,3	372,8	425,4	476	560,0	610,7	2666,0							
16	S	238,6	10,357	23,4	31,8	47,29	72,9	88,0	280,99	328,4	378,9	448,5	505,6	567	651,4	2815							
17	Cl	299,8	13,01	23,80	39,9	53,3	67,8	96,6	114,2	140,3	178,9	211,3	250,9	292,9	367	3220							
18	Ar	263,6	15,755	27,6	40,90	59,79	75,9	91,3	123,9	143,4	187,9	211,3	251,6	291,4	351,4	3060,5							
19	K	109,9	4,339	31,81	45,9	61,1	82,6	99,4	117,9	154,3	176,9	203,8	262,7	328,7	416,7	2815							
20	Ca	149,8	6,111	11,87	51,21	67,3	84	109	127,9	143,3	187,9	211,3	261,6	301,6	351,4	3220							
21	Sc	151,1	6,56	12,89	21,75	73,9	91,8	111	139	159,2	180,2	221,9	249,7	286,4	329,5	3060,5							
22	Ti	157,4	6,83	13,57	28,11	43,21	59,8	119	141	172	193,1	216,9	265	291,4	329,5	3060,5							
23	V	157,3	6,71	14,2	29,7	48,0	65,2	128,9	151	171	196	230,2	260	308	336,1	2666,0							

¹⁾ Finkelburg-Bundlach, Ionisierungsspannungen von Atomen und Atomionen, Naturwiss. 42, Heft 2, 33, 1955. — Iritzen, Soc. Sci. techn. Comment. physico-math. 10, H. 4, 1958.

Z	Element	W _I kcal · mol ⁻¹	U _{I1}	U _{I2}	U _{I3}	U _{I4}	U _{I5}	U _{I6}	U _{I7}	U _{I8}	U _{I9}	U _{I10}	U _{I11}	U _{I12}	U _{I13}	U _{I14}	U _{I15}	U _{I16}	U _{I17}	U _{I18}	U _{I19}	
51	Sb	199,1	8,64	16,7 ± 0,5	24,8	44,1	63,8 ± 0,5	119	(132)	(157)	(184)	(211)										
52	Te	207,6	9,01	18,8 ± 0,5	31	38	66 ± 1	85 ± 2	149	(164)	(192)	(220)										
53	J	240,5	10,44	19,9	33	(42)	71	83 ± 2	101 ± 3	182	(200)	(229)										
54	Xe	273,4	12,127	21,2	32,1	(45)	(57)	89	102 ± 3	126 ± 3	218	(238)										
55	Cs	89,7	3,893	25,1	34,6 ± 0,7	(46)	(62)	(74)	108	122 ± 3	159 ± 4	256										
56	Ba	133,9	5,810	10,99	37 ± 1	(49)	(62)	(80)	(93)	127	144 ± 4	158 ± 5										
57	La	129,5	5,61	11,53	19,17	(52)	(66)	(80)	(100)	(114)	151	165 ± 5	201 ± 6									
58	Ce	[159,2]	[6,91]	12,3	19,5	36,7	(70)	(85)	(100)	(122)	(137)	172	189 ± 6									
59	Pr	[132,7]	[5,76]					(89)	(106)	(122)	(146)	(162)	197									
60	Nd	[145,4]	[6,31]						(111)	(129)	(147)	(171)										
61	Pm									(135)	(154)	(175)										
62	Sm	129,9	5,6	[11,2]							(161)	(181)										
63	Eu	130,6	5,67	11,24								(187)										
64	Gd	141,9	6,19	[12]																		
65	Tb	[155,3]	[6,74]																			
66	DY	[157,1]	[6,82]																			
67	Ho																					
68	Er																					
69	Tm																					
70	Yb	142,8	6,2	12,19																		
71	Lu	141,7	6,15	11,7	(19)																	
72	Hf	126,7	5,5	11,9	(21)	(31)																
73	Ta	177,4	7,7	16,2 ± 0,5	(22)	(33)	(45)															
74	W	185,9	7,98	17,7 ± 0,5	(24)	(35)	(48)	(61)														
75	Re	181,3	7,87	16,6 ± 0,5	(26)	(38)	(51)	(65)	(79)													
76	Os	200,4	8,7	17 ± 1	(25)	(40)	(54)	(68)	(83)	(99)												
77	Ir	212,0	9,2	17,0 ± 0,3	(27)	(39)	(57)	(72)	(88)	(101)	(121)											

Z	Element	W_{I_1} kcal · mol ⁻¹	U_{I_1}	U_{I_2}	U_{I_3}	U_{I_4}	U_{I_5}	U_{I_6}	U_{I_7}	U_{I_8}	U_{I_9}	$U_{I_{10}}$	$U_{I_{11}}$	$U_{I_{12}}$	$U_{I_{13}}$	$U_{I_{14}}$	$U_{I_{15}}$	$U_{I_{17}}$	$U_{I_{18}}$	$U_{I_{19}}$	$U_{I_{20}}$	
78	Pt	206,4	8,96	18,54 ± 0	(29)	(41)	(55)	(109)	(127)	(146)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
79	Au	212,5	9,223	20,5	(30)	(44)	(58)	(114)	(133)	(153)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
80	Hg	240,4	10,431	18,751	34,2	(46)	(61)	(120)	(139)	(159)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
81	Tl	140,7	6,106	20,42	29,8	50	(61)	(117)	(145)	(166)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
82	Pb	170,8	7,415	15,03	31,93	39,0	69,7	(122)	(142)	(173)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
83	Bi	167,9	7,287	19,3	25,6	45,3	56,0	(127)	(148)	(169)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
84	Po	188,9	8,2	19,4 ± 1,7	27,3 ± 0,8	(38)	(61)	(132)	(154)	(176)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
85	At	212,0	9,2	20,1 ± 1,7	29,3 ± 0,9	(41)	(51)	(138)	(160)	(183)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
86	Rn	247,6	10,745	21,4 ± 1,8	29,4 ± 1,0	(41)	(55)	(111)	(166)	(190)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
87	Fa	91,7	3,98	22,5 ± 0,10	33,5 ± 1,5	(43)	(59)	(117)	(133)	(197)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
88	Ra	121,6	5,277	10,111	(31)	(46)	(59)	(103)	(149)	(156)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
89	Ac	158,7	6,89	11,5 ± 0,4	---	(49)	(62)	(109)	(123)	(164)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
90	Th	---	---	11,5 ± 1,0	20,0	28,7	(65)	(115)	(139)	(155)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
91	Pa	---	---	---	---	---	---	(115)	(138)	(151)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
92	U	92,2	4	---	---	---	---	(121)	(137)	(162)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Anregungsspannungen für metastabile Niveaus
Tabelle für U_{Ms} und U_{I_1} ¹⁾

Elemente	H ₁	He	N	Ne	Na	Ar	Kr	Hg
U_{Ms} von	10,2	19,72	2,37	16,57	2,12	11,49	9,86	4,66
bis	12,7	20,51	3,56	16,66	4,27	11,66	10,51	5,43
U_{I_1}	13,59	24,56	14,55	21,56	5,14	15,76	13,94	10,41

U_{Ms} = Anregungsspannung für metastabile Niveaus,
 U_{I_1} = Ionisierungsspannung des neutralen, nicht angeregten Atoms.

Z = Ordnungszahl des Elementes,

U_{I_1} = Ionisierungsspannung des neutralen, nicht angeregten Atoms,

U_{I_2} = Ionisierungsspannung des einfach ionisierten, nicht angeregten Atoms usw.,

W_{I_1} = Ionisierungswärme für das neutrale, nicht angeregte Atom.

¹⁾ Zu U_{Ms} -Werten siehe Backer-Goudsmith, Atomic Energy States, New York 1932. - Uytendoyen, Elektrische Gasentladungslampen, Springer, Berlin, 67, 1938. - B. J. Ppanoncinii, Elektrische Gasentladungslampen, Moscow 1952 (W. L. Granowski, Der elektrische Strom im Gas, Staatsverlag f. techn.-theoret. Literatur, Moskau-Leningrad, 413, 1952). Deutsche Übersetzung: Akademie-Verlag, Berlin, 479, 1955.

IV. Thermische Emission

1.) Geschwindigkeitsverteilung nach Maxwell für Elektronen, Ionen, Gasteilchen

(Einheitliches Gas im thermodynamischen Gleichgewicht)

Geschwindigkeitsfunktion :

$$F(v) = \frac{dn}{n} \cdot \frac{1}{dv} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi \cdot K \cdot T} \right)^{3/2} \cdot v^2 \cdot e^{-\frac{m \cdot v^2}{2KT}}$$

dn = Zahl der Teilchen der Geschwindigkeit zwischen v und dv

n = Gesamtzahl der Teilchen

dv = Geschwindigkeitsbereich

m = Masse der Teilchen

$K = 1,38 \cdot 10^{-16}$ erg \cdot grad $^{-1}$ (Boltzmannkonstante)

T = absolute Temperatur

v = Geschwindigkeit der Teilchen

$F(v) \cdot dv$ = Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Geschwindigkeit im Bereich v bis $(v + dv)$.

2.) Die drei thermischen Geschwindigkeiten von Elektronen

a) Wahrscheinlichste thermische Geschwindigkeit :

$$v_{ew} = \sqrt{\frac{2 \cdot K \cdot T_e}{m_e}} = 5,46 \cdot 10^5 \sqrt{T_e(^{\circ}K)} \quad [\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}]$$

b) Mittlere thermische Geschwindigkeit

(Zur Berechnung "ungerichteter" Elektronenstromdichte, Stoßzahlen usw. benutzt. Es ist die "einseitig gerichtete Geschwindigkeit" = $\sqrt{\frac{K \cdot T_e}{2 \cdot m_e}} = \frac{\bar{v}}{4}$!)

$$\bar{v}_e = \sqrt{\frac{8 \cdot K \cdot T_e}{\pi \cdot m_e}} = 6,15 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{T_e(^{\circ}\text{K})} \quad [\text{cm sec}^{-1}]$$

c) Effektivwert der thermischen Geschwindigkeit (quadratischer Mittelwert)

(Zur Berechnung von Elektronendruck, mittlerer thermischer Voltgeschwindigkeiten usw. benutzt)

Siehe Tabelle 11.

$$v_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{3 \cdot K \cdot T_e}{m_e}} = 6,68 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{T_e(^{\circ}\text{K})} \quad [\text{cm sec}^{-1}]$$

3.) Mittlere thermische Voltgeschwindigkeit von Ladungsträgern

Unter der Voraussetzung, daß eine Geschwindigkeitsverteilung nach Maxwell vorliegt, ergibt sich folgender Ausdruck für den quadratischen Mittelwert der Voltgeschwindigkeiten von Ladungsträgern. Dieser wird meist kurz bezeichnet als mittlere thermische Voltgeschwindigkeit oder auch als Elektronentemperatur bzw. Iontemperatur in Volt :

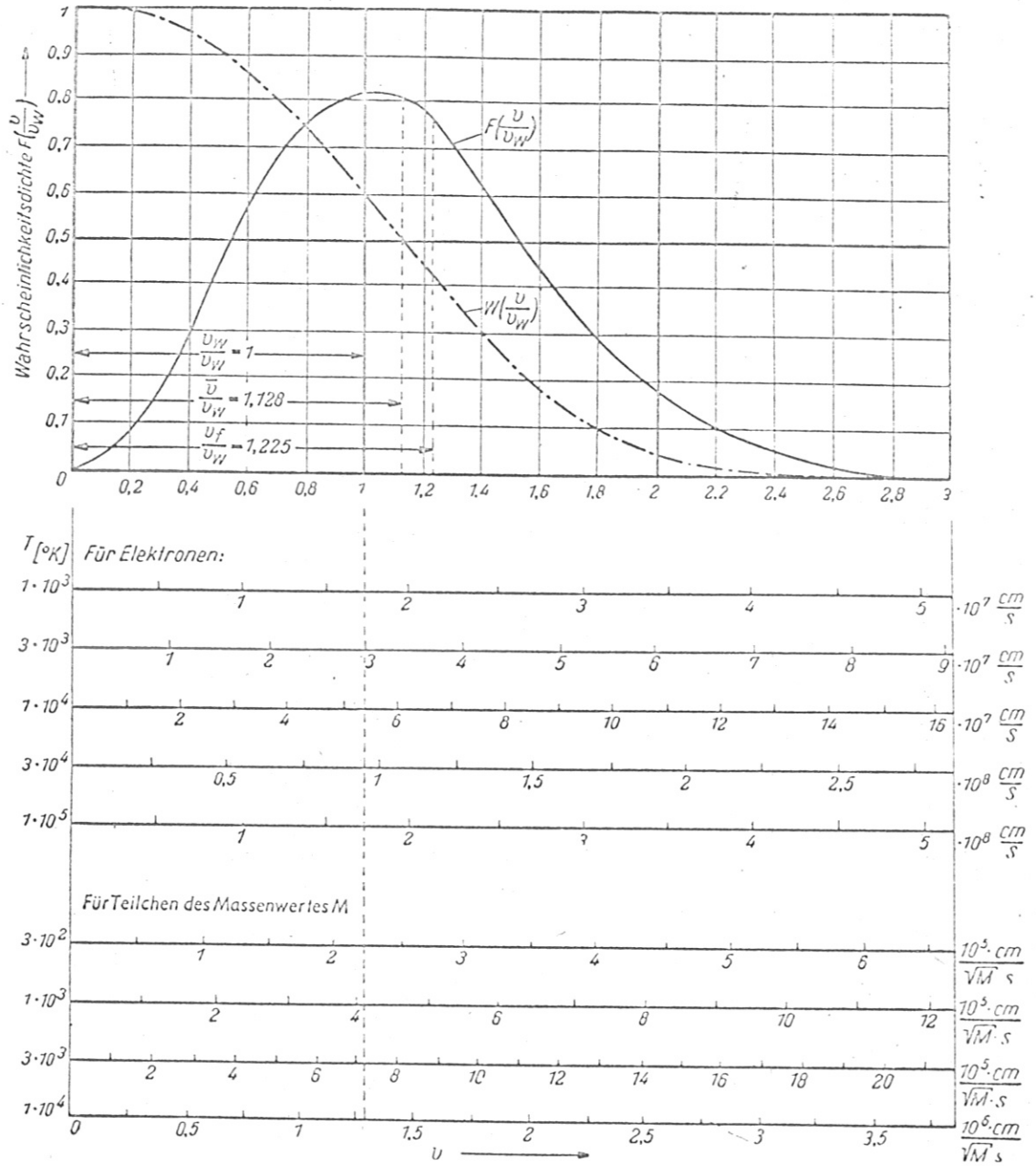
$$\bar{U}_e \text{ bzw. } \bar{U}_i = \frac{3 \cdot K \cdot T}{2e} = \frac{T[^{\circ}\text{K}]}{7770} \quad [\text{V}]$$

$$K = 1,38 \cdot 10^{-16} \text{ erg} \cdot \text{grad}^{-1}$$

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} = 1,602 \cdot 10^{-12} \text{ erg V}^{-1} = \text{Elementarladung}$$

(Siehe Tabelle 12)

Darstellung zur Geschwindigkeitsverteilung nach Maxwell für verschiedene Teilchen und Temperaturen

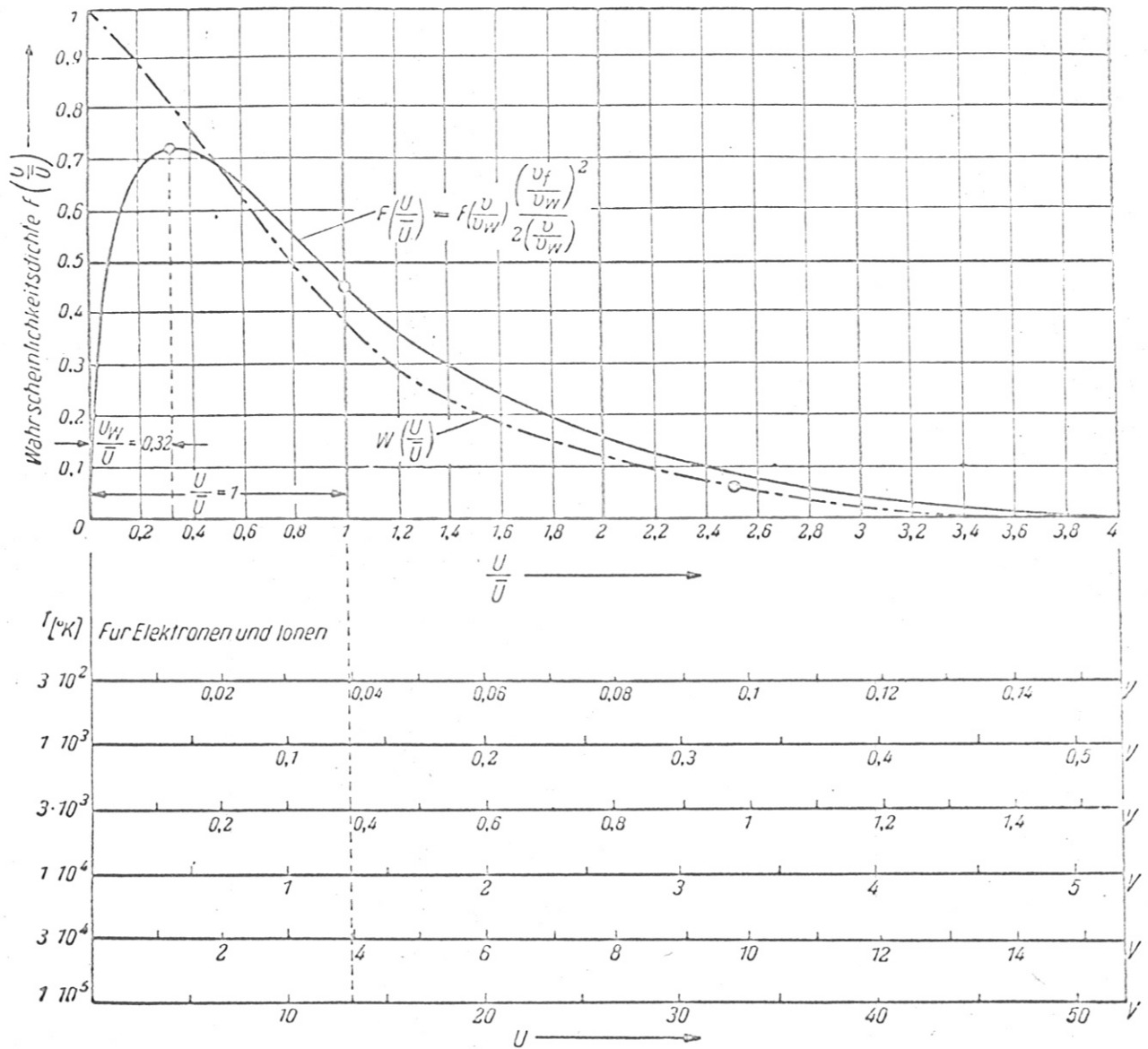


$$\frac{\bar{v}}{v_w} = \int_0^{\infty} \frac{v}{v_w} \cdot F\left(\frac{v}{v_w}\right) \cdot d\left(\frac{v}{v_w}\right); \quad \frac{v_f}{v_w} = \left[\int_0^{\infty} \left(\frac{v}{v_w}\right)^2 \cdot F\left(\frac{v}{v_w}\right) \cdot d\left(\frac{v}{v_w}\right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Teilchen in dem Geschwindigkeitsbereich $\frac{v}{v_w}$ bis $\frac{v}{v_w} + d\left(\frac{v}{v_w}\right)$ enthalten ist, beträgt $F\left(\frac{v}{v_w}\right) \cdot d\left(\frac{v}{v_w}\right)$.
 Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Teilchen eine höhere Geschwindigkeit als v hat, ist somit

$$W\left(\frac{v}{v_w}\right) = \int_0^{\infty} F\left(\frac{v}{v_w}\right) \cdot d\left(\frac{v}{v_w}\right)$$

Darstellung zur Voltgeschwindigkeitsverteilung nach Maxwell von Ladungsträgern für verschiedene Temperaturen



$$e \cdot \bar{U} = \frac{1}{2} m v_f^2 = \frac{3 k T^1}{2}$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Teilchen in dem Voltgeschwindigkeitsbereich $\frac{U}{\bar{U}}$ bis $\frac{U}{\bar{U}} + d\left(\frac{U}{\bar{U}}\right)$ enthalten ist, beträgt $F\left(\frac{U}{\bar{U}}\right) \cdot d\left(\frac{U}{\bar{U}}\right)$.

Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Teilchen eine höhere Voltgeschwindigkeit als U hat, ist somit

$$W\left(\frac{U}{\bar{U}}\right) = \int_{\left(\frac{U}{\bar{U}}\right)}^{\infty} F\left(\frac{U}{\bar{U}}\right) \cdot d\left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2.$$

1) Zur Vermeidung von Mißverständnissen sei bemerkt, daß die Größe \bar{U} den quadratischen Mittelwert der Voltgeschwindigkeiten darstellt, \bar{v} dagegen den arithmetischen Mittelwert der Geschwindigkeiten.

2) Beispiel: Es sei die Elektronentemperatur in einem Plasma $T_e = 3 \cdot 10^4$ °K. Dann beträgt die mittlere thermische Voltgeschwindigkeit $\bar{U} = 4$ V, die wahrscheinlichste Voltgeschwindigkeit $U_f = 1,28$ V und z. B. die Wahrscheinlichkeit von Elektronen-Voltgeschwindigkeiten über 10 V = $4 \cdot 2,5$ V, $W = 0,06$.

4.) Dichteverteilung nach Boltzmann für Elektronen und Ionen
(Dichteverteilung thermischer Ladungsträger im elektrischen Bremsfeld)

Für Elektronen :

$$n_e = n_{e_0} \cdot e^{-\frac{eU}{KT_e}} = n_{e_0} \cdot e^{-\frac{3U}{2\bar{U}_e}} \quad [\text{cm}^{-3}]$$

Für Ionen :

$$n_i = n_{i_0} \cdot e^{-\frac{eU}{KT_i}} = n_{i_0} \cdot e^{-\frac{3U}{2\bar{U}_i}} \quad [\text{cm}^{-3}]$$

n_{i_0} bzw. n_{e_0} = Elektronen- bzw. Ionendichte am Ort $U = 0V$
in $[\text{cm}^{-3}]$

U = Potential am Ort der Dichte n_e bzw. n_i

T = Temperatur des Elektronen- bzw. Ionengases

\bar{U} = Mittlere thermische Voltgeschwindigkeit des
Elektronen- bzw. Ionengases

5.) Elektronen-Thermoemissionsgleichung

(Richardson-Gleichung)

$$j_{es} = 60,2 \cdot G \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{eU_A}{KT}} \quad [\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}]$$

j_{es} = Elektronenstromdichte

T = Kathodentemperatur

U_A = Elektronenaustrittspotential

G = Besetzungszahl (= 2 bei fast allen für die Elektronenemission in Frage kommenden Metallen. Oberstes besetztes Energieband ein s-Band !)

e = Elementarladung

K = Boltzmannkonstante

6.) Kühlung von thermischen Kathoden durch Elektronenaustritt

Durch die thermische Elektronenemission tritt an der Oberfläche von Kathoden eine Wärmeabfuhr ein, die bei Emissionsstromdichten von etwa $j_{e_s} > 5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ (stationär!) bereits die Wärmebilanz der Kathodenheizung wesentlich zu beeinflussen beginnt.

Wärmeabfuhr pro cm^2 Kathodenoberfläche durch thermische Elektronenemission :

$$- n_H = j_e \cdot U_A \quad [\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}]$$

j_{e_s} = Elektronen-Emissionsstromdichte $[\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}]$

U_A = Elektronen-Austrittspotential $[\text{V}]$

Bei Feldelektronenemission tritt eine Wärmeabfuhr durch Elektronenemission nicht ein, da bei ihr der Anteil des temperaturabhängigen Teils der Fermiverteilung verschwindet und dem Elektronenspender daher auch keine thermische Energie entzogen wird.

(Siehe Tabelle 13 - 19)

Elektronenaustrittspotentiale der Elemente

Elektronenaustrittspotentiale der Elemente¹⁾, geordnet nach steigendem Potential U_A in Volt, und langwellige Grenzen der lichtelektrischen Elektronenemission. λ_{gr} in Angström-Einheiten ($e \cdot U_A = \Phi_A =$ Elektronenaustrittsarbeit, $e =$ Elementarladung)

Element	Austritts- potential	Langwellige Grenze
	U_A	λ_{gr}
	V	ÅE
Cs	1,94	6390
Rb	2,13	5820
K	2,25	5510
Na	2,28	5430
Li	2,46	5040
Ba*	2,52	4920
Pr	2,70	4600
Sr	2,74	4520
Ce	2,88	4300
Sm	3,20	3900
Ca	3,20	3870
La	3,30	3750
U	3,45	3590
Th	3,47	3570
Hf kubisch	3,53	3510
Si	3,59	3450
Mg	3,70	3350
Be*	3,92	3160
Zr	3,93	3150
Mn	3,95	3140
Nb	3,99	3110
Cd	4,04	3070
Pb	4,04	3070
Tl	4,05	3060
V	4,11	3010
Ta*	4,13	3000
Ti	4,16	2980
Ga	4,16	2980
Al	4,20	2950

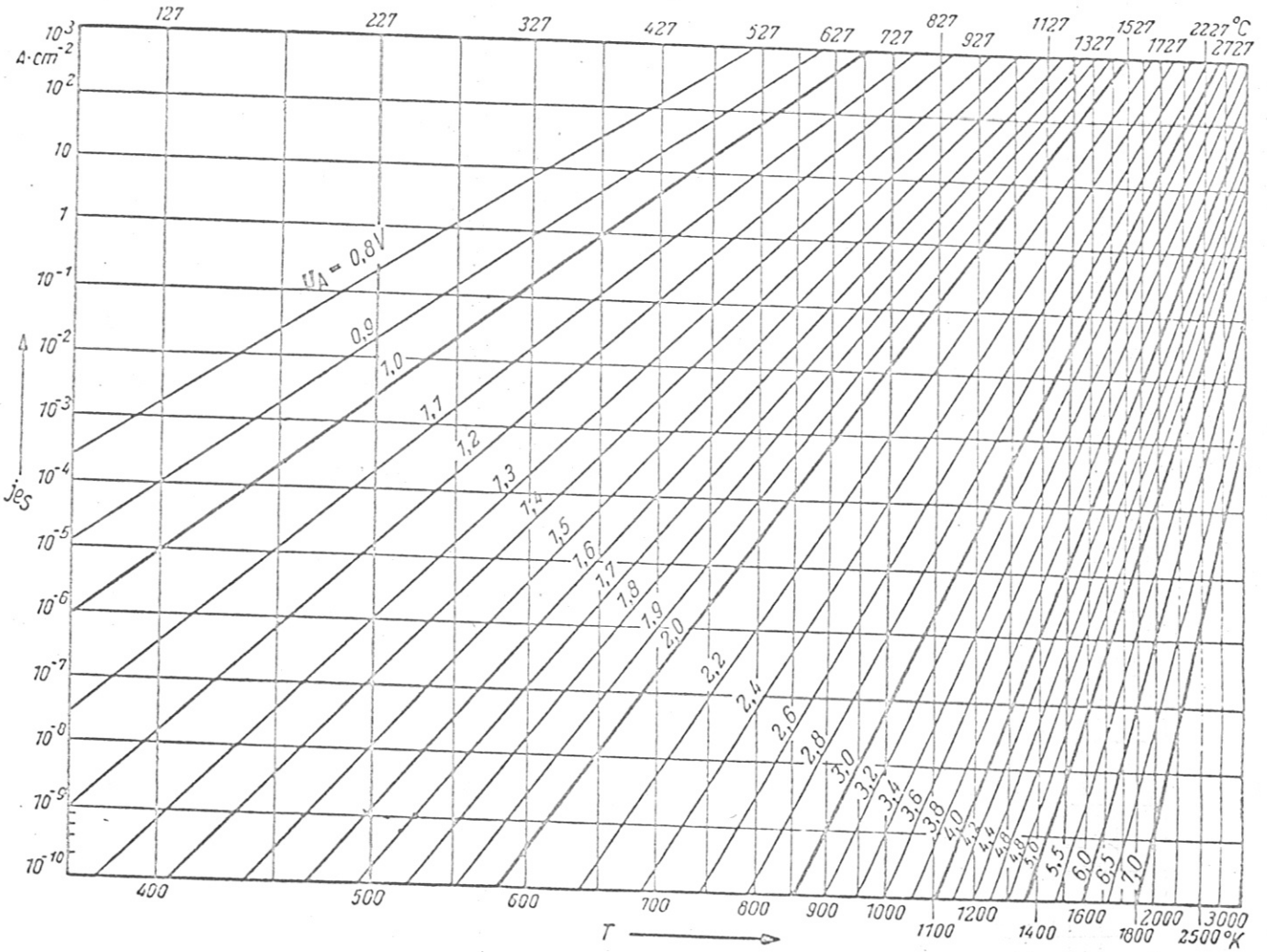
Element	Austritts- potential	Langwellige Grenze
	U_A	λ_{gr}
	V	ÅE
Mo*	4,24	2920
Co	4,25	2920
Zn	4,27	2900
Bi	4,34	2850
C	4,36	2840
Sn	4,39	2820
Cr	4,45	2780
Cu	4,48	2770
Ru	4,52	2740
W	4,53	2730
Hg	4,53	2730
Os	4,55	2720
Sb	4,56	2715
Ir	4,57	2710
B	4,60	2690
Ge	4,62	2680
Fe	4,63	2675
Rh	4,65	2660
Ag	4,70	2640
Au	4,71	2630
Te	4,73	2620
As	4,79	2590
Se	4,87	2540
Ni	4,91	2520
Re	4,97	2490
Pd	4,98	2490
Pt I	5,36	2320
(Pt II	6,37	1995)

¹⁾ Ausgewählt aus Wagener, Die Oxydkathode. Ambrosius Barth, Leipzig, 81, 1943 (Mittelwerte aus Messungen zwischen 1930 bis 1943 gekennzeichnet durch *). — Hodgman, Handbook of Chemistry and Physics. Chemical rubber publ., Cleveland Ohio, 33, 2128, 1951 (Einzelmessungen mit Literaturangaben, zwischen 1923 und 1949). — D'Ans-Lax, Taschenbuch für Chemiker und Physiker. Springer, Berlin, 192, 1943. — Whitney, Phys. Rev. 50, 1154, 1936 (Pt I. Aus Thermoemission). — Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Physik-Chemie I, 4. Springer, Berlin, 759, 1955.

A. Elektronenphysik

Thermische Elektronenemission in Abhängigkeit von Temperatur und Austrittspotential

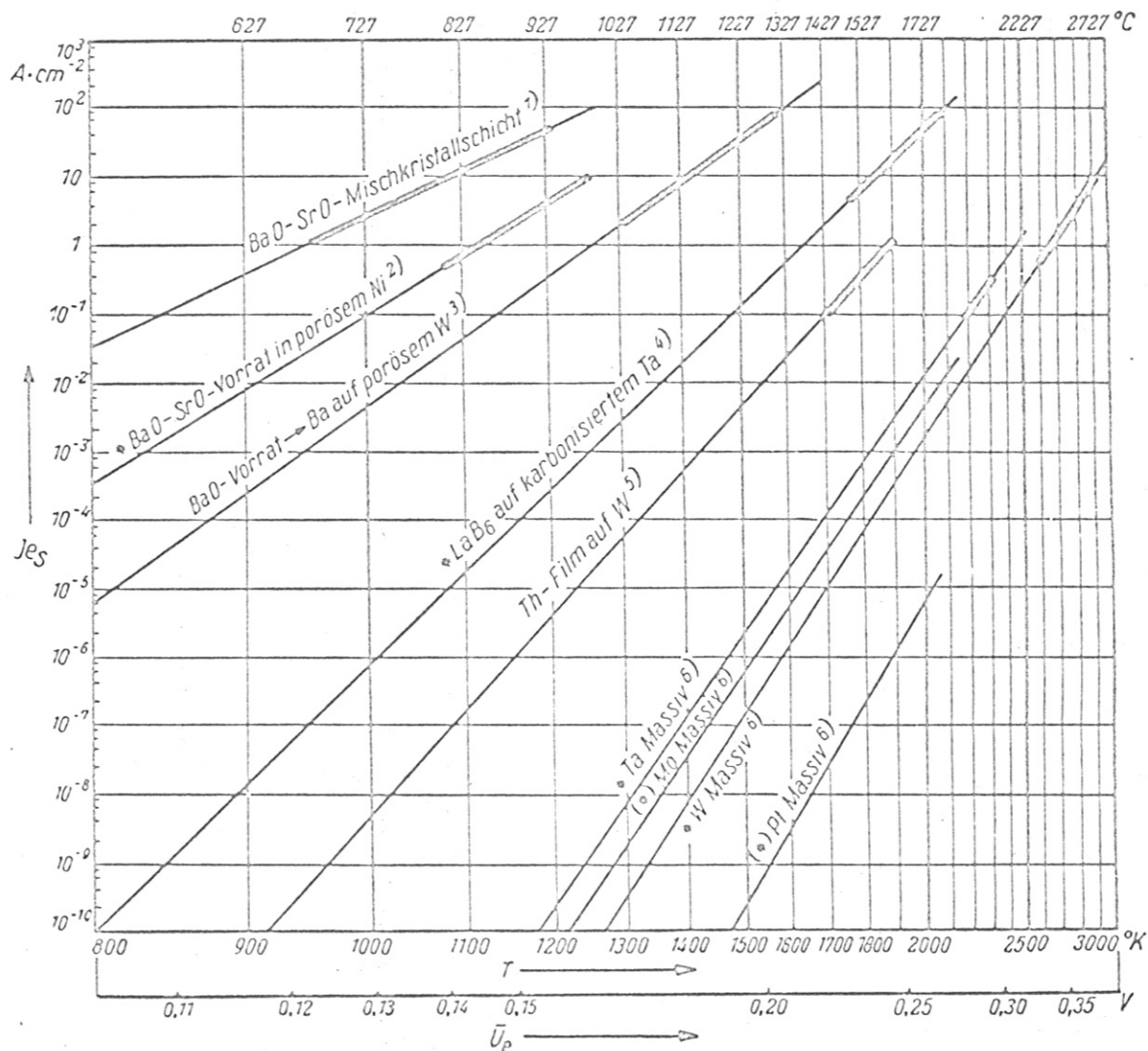
Die Sättigungsstromdichte j_{eS} in Abhängigkeit von der Kathodentemperatur T mit dem Elektronenaustrittspotential U_A als Parameter¹⁾²⁾



Thermische Elektronenemission von Standardkathoden in Abhängigkeit von der Temperatur

Für die Beurteilung einer thermischen Kathode ist hauptsächlich die Größe ihrer Sättigungsstromdichte bei Betriebstemperaturen maßgebend, die eine noch genügende Lebensdauer gestatten (10 bis 100 h bei auswechselbaren Kathoden, sonst 500 bis 10000 h).

Die Sättigungsstromdichte j_s von Standardkathoden in Abhängigkeit von der Kathodentemperatur T (Arbeitsbereiche verstärkt ausgezogen. \bar{U}_e — Mittlere thermische Voltgeschwindigkeit der Elektronen^{1a)} bei Betrieb mit j_s)



* bedeutet: Im kalten Zustand nicht empfindlich gegen Zutritt von Luft.

^{1a)} Zur Erhöhung von \bar{U}_e bei Betrieb mit Strombegrenzung durch Raumladung siehe Abschnitt A, Mittlere thermische Voltgeschwindigkeit von Ladungsträgern.

¹⁾ Neuere, hochbelastbare Oxydkathode. Siehe Herrmann-Wagener, Die Oxydkathode II, Ambrosius Barth, Leipzig, 79 und 178, 1944.

Ältere Oxydpastekathoden verhalten sich ähnlich wie die unter 3) genannte Kathode, sind aber nur bis etwa 1 A·cm⁻² im Dauerbetrieb belastbar.

²⁾ Hoch belastbare BaO-SrO-Sinternickel-Kapillarkathode. Nair-Lynch-Hammy, Journ. Appl. Phys. 24, 1335, 1953. — Etwa die gleiche, jedoch nur bis 2 A·cm⁻² ausnutzbare Emission liefern auf oxydiertes Wolfram aufgedampfte Ba-Film-Kathoden nach Espe-Knoll, Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik, Springer, Berlin, 258, 1936.

³⁾ Sehr hoch belastbare Sinterwolfram-Kapillarkathode (L-Kathode). Siehe Lemmens-Jansen-Loosjes, Philips Techn. Rundsch. 11, 349, 1950. — Hughes-Coppla, Journ. Appl. Phys. 23, 1261, 1952. — Espe-Knoll, loc. cit. 236.

⁴⁾ Sehr hoch belastbare Lanthanboridkathode. Siehe Lafferty, Journ. Appl. Phys. 22, 299, 1951.

⁵⁾ Thoriierte Wolframkathode. Siehe De Boer, Elektronenemission und Adsorptionsercheinungen, Ambrosius Barth, Leipzig, 74 und 85, 1937. — Formiervorschrift siehe Espe-Knoll, loc. cit. 268.

⁶⁾ Massive Metallkathoden. Siehe z. B. Espe-Knoll, loc. cit. 258 und 263.

III. Erzeugung von Elektronen

Thermische Kathoden. Reines Wolfram

Im kalten Zustand nicht empfindlich gegen Luftzutritt.

Thermische Daten von Wolfram¹⁾ 2)

(Dichte $\rho = 19,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Elektronenaustrittspotential $\mathcal{U}_A = 4,53 \text{ V}$)

Wahre Temperatur ³⁾		Elektronen-emission $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$	Verdampfungs-geschwindigkeit $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Elektronen-emission/ Verd.-Geschw. $\text{C} \cdot \text{g}^{-1}$	Dicke der pro h verdampfenden Schicht ⁴⁾ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	Lebens-dauer		
$^{\circ}\text{K}$	$^{\circ}\text{C}$					h	h	h
2100	1827	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-13}$	$2,0 \cdot 10^{10}$	$3,7 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^8$
2200	1927	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-12}$	$6,2 \cdot 10^9$	$3,9 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^7$
2300	2027	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^9$	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$
2400	2127	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$9,3 \cdot 10^8$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$
2500	2227	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$7,6 \cdot 10^{-10}$	$4,0 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	2150	$2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$
2600	2327	$7,0 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-9}$	$1,8 \cdot 10^8$	$7,3 \cdot 10^{-6}$	410	4100	$2 \cdot 10^4$
2700	2427	1,6	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$9,0 \cdot 10^7$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	90	900	4500
2800	2527	3,5	$7,4 \cdot 10^{-8}$	$4,7 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	21	210	1080
2900	2627	7,3	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^7$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	5,8	58	290
3000	2727	14,0	$9,5 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	1,7	17	84

Lebensdauer- begrenzung durch W- Abdampfung	I. Drahtkathoden $\varnothing 0,1 \text{ mm}$: $D_{\text{Kr}} \approx 3 \mu$	II. Heizer aus Blech $0,1 \text{ mm}$: $D_{\text{Kr}} \approx 5 \mu$	III. Drahtkathoden $\varnothing 1 \text{ mm}$: $D_{\text{Kr}} \approx 30 \mu$	IV. Massiv (E-Stoß)-Kathoden: $D_{\text{Kr}} \approx 150 \mu$	I	III	IV
					----->		
					----->		
					----->		

D_{Kr} = Kritische Dicke der Abtragung durch Verdampfung (bei I und III: 12% Gewichts-minderung) (Be-rechnung Abschnitt D, Verdampfungs-geschwindigkeit und Sättigungsdruck).

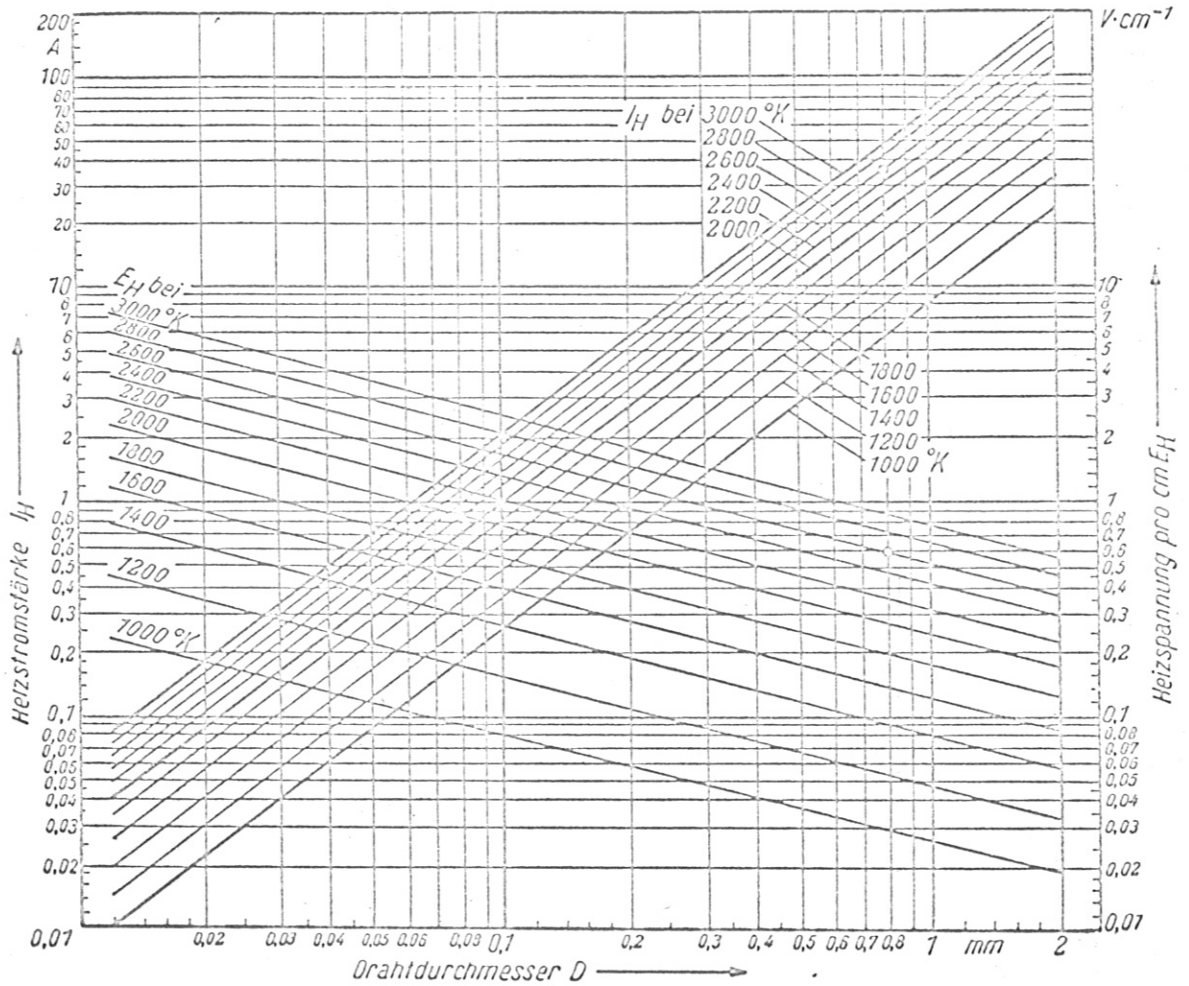
¹⁾ Weitere thermische Daten siehe Abschnitt D. Thermische Daten von Wolfram. Daten von thoriertem Wolfram und Oxykathoden siehe Espe-Knoll, Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik. Springer, Berlin, 267 ff., 1936.

²⁾ Berechnung der Heizdaten von W-Drahtkathoden siehe Espe-Knoll, loc. cit. S. 266, Fig. 285. — Messungen von Lebensdauern siehe Bas-Taymaz, Z. f. angew. Physik 2, 374, 1950.

³⁾ Zur pyrometrischen Bestimmung der wahren Temperatur siehe Abschnitt F, Bestimmung der wahren Temperatur freier Strahler mit Teilstrahlungs-pyrometern.

⁴⁾ Voraussetzung: Keine chemisch schädlichen Restgase wie O_2 , H_2O , CO und kein Ionenbombardement, sonst Abbau viel schneller. W gut beständig gegen Hg und andere Metaldämpfe, H_2 , auch NH_3 .

Tafel zur Bemessung der Daten von im Hochvakuum glühenden Wolframdrähten
 Beziehung zwischen Strom, Spannung pro Längeneinheit, Temperatur und Durchmesser von glühendem
 Wolframdraht im Hochvakuum^{1) 2)}



$$\text{Heizspannung } U_H = E_{H[V \cdot \text{cm}^{-1}]} \cdot L_{H[\text{cm}]} \quad [\text{V}].$$

E_H = Heizspannung pro Zentimeter Heizdrahtlänge,
 L_H = Länge des geheizten Wolframdrahtes.

Der Heizspannungsverlust infolge der Wärmeleitungskühlung an beiden Drahtenden ist hierbei vernachlässigt.³⁾

¹⁾ Werte nach Espe-Knoll, Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik. Springer, Berlin, 266, 1936.

²⁾ Beispiel: Es ergibt sich aus dem Diagramm für eine verlangte wahre Temperatur von 2600° K und W-Draht von 0,8 mm Durchmesser eine Heizspannung pro cm Drahtlänge von 0,6 V und ein Heizstrom von 35 A.

³⁾ Zur Berücksichtigung des Endverlustes siehe z. B. Wien-Harms, Handbuch der Experimentalphysik 18, II. Akad. Verlagsges., Leipzig, 332, 1928.

7.) Raumladungsbegrenzte Stromdichte bei ebener Elektrodenanordnung und Elektronen

$$j_e = \frac{1}{9\pi} \cdot \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \cdot \frac{U_B^{3/2}}{d^2} = 2,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{U_B^{3/2}}{d^2} \quad [\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}]$$

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 9,107 \cdot 10^{-28} \text{ g} \quad (\text{Ruhemasse des Elektrons})$$

$$U_B = \text{Beschleunigungsspannung} \quad [\text{V}]$$

$$d = \text{Absaugabstand}$$

(Siehe Tabelle 20)

8.) Elektronengeschwindigkeit als Funktion der Beschleunigungsspannung

Ohne Berücksichtigung der relativistischen Massenzunahme
(ab $U_B > 3 \cdot 10^4 \text{ V}$ zu beachten)

$$v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_B}{m_e}} = 5,93 \cdot 10^7 \sqrt{U_B} \quad [\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}]$$

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 9,107 \cdot 10^{-28} \text{ g}$$

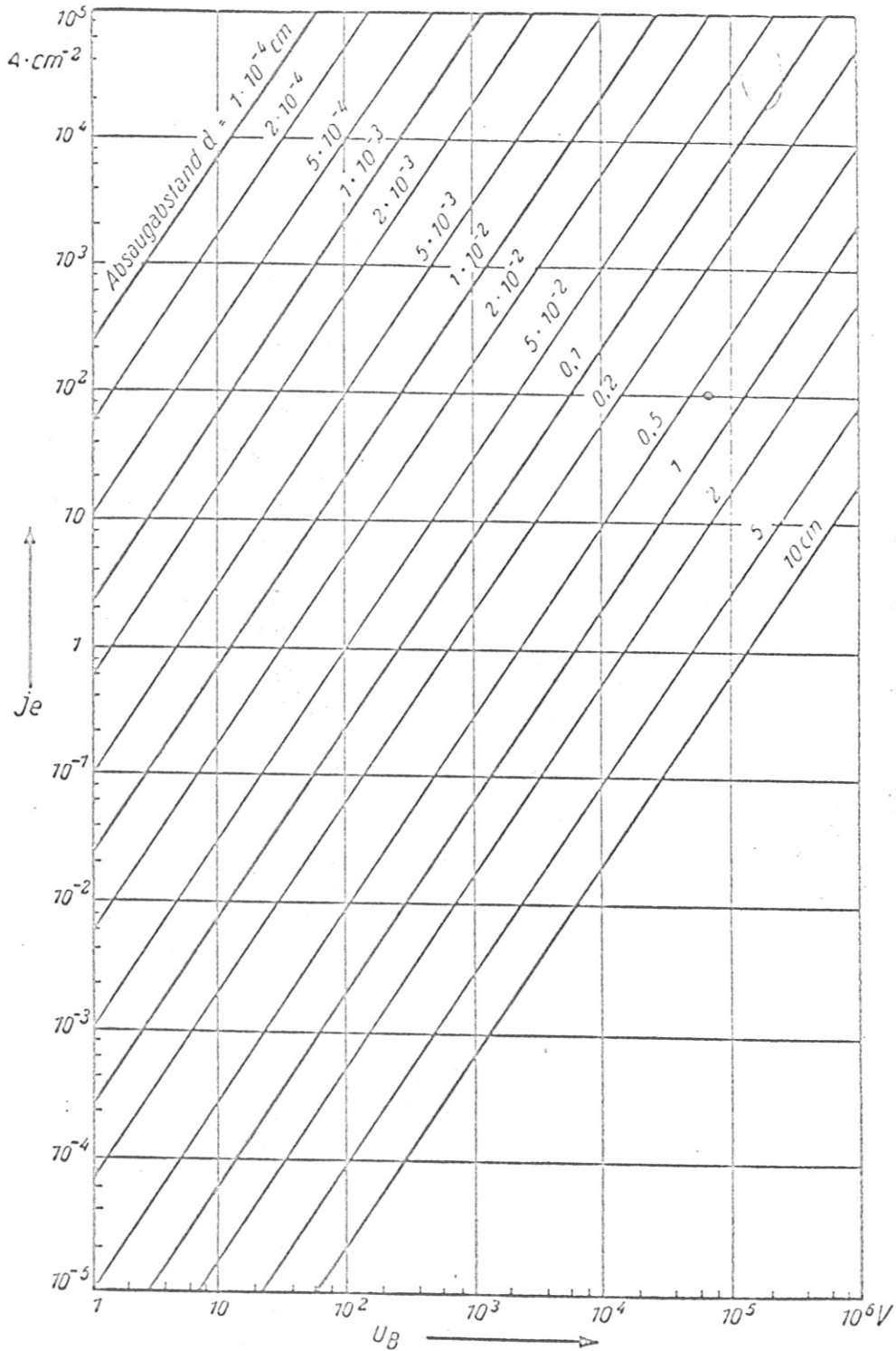
$$U_B = \text{Beschleunigungsspannung in} \quad [\text{V}]$$

(Siehe Tabellen 21 und 22)

Tafel zur raumladungsbegrenzten Stromdichte bei Elektronen

Kathodenfläche und Anodenfläche liegen im Abstand d in parallelen Ebenen¹⁾.

$$j_c = f(U_B, d)$$

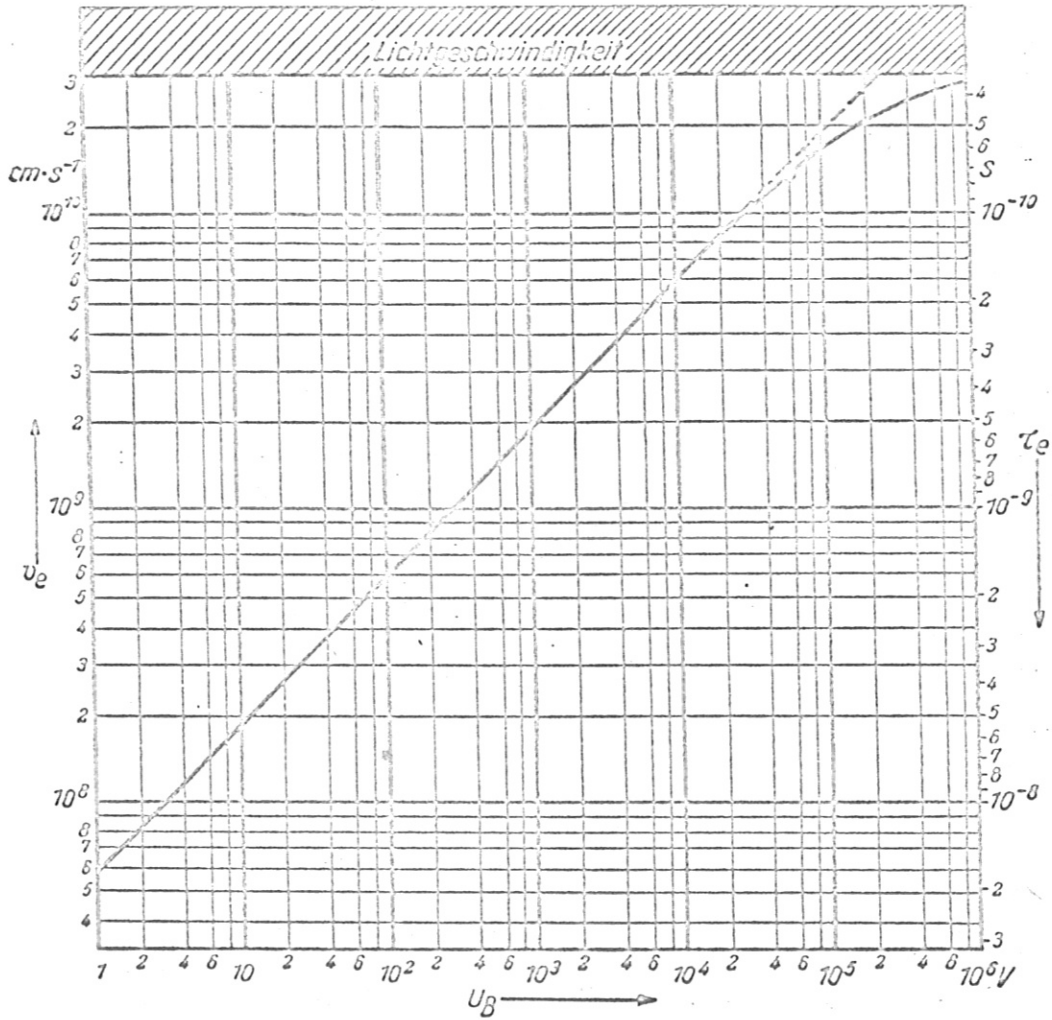


¹⁾ Beispiel: Es sei eine Hochemissionskathode mit einer Sättigungsstromdichte $j_{cs} = 100 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ gegeben, die bis zu ihrer Sättigung ausgenutzt werden soll. Die Beschleunigungsspannung betrage $U_B = 6 \cdot 10^4 \text{ V}$. Dann folgt für den zu wählenden Absaugabstand $d \leq 0,6 \text{ cm}$.

Tafel zur Elektronengeschwindigkeit als Funktion der Beschleunigungsspannung¹⁾

Elektronengeschwindigkeit v_e und Elektronenlaufzeit τ_e pro Zentimeter Weg werden mit Berücksichtigung der relativistischen Massenkorrektur gegeben.

$$v_e = f(U_B)$$



Elektronenlaufzeit bei konstanter Geschwindigkeit

Bei Vernachlässigung der relativistischen Massenkorrektur²⁾ ergibt sich die Laufzeit τ_e auf der Wegstrecke l von Elektronen der Voltgeschwindigkeit U_B zu:

$$\tau_e = \frac{l}{v_e} = 1,67 \cdot 10^{-8} \frac{l_{[\text{cm}]}}{\sqrt{U_{B[\text{V}]}}} \quad [\text{s}].$$

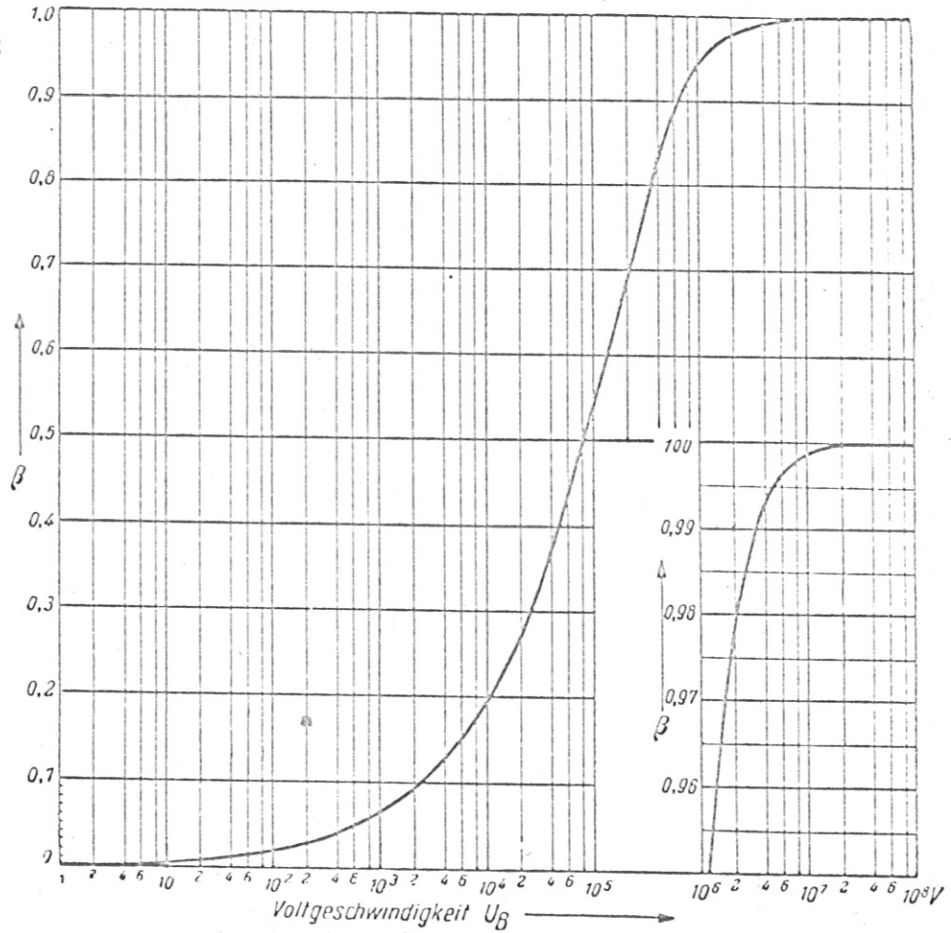
l = Durchlaufene Wegstrecke,
 v_e = Elektronengeschwindigkeit,
 U_B = Beschleunigungsspannung.

¹⁾ Beispiel: Es sei die Beschleunigungsspannung der Elektronen $U_B = 6 \cdot 10^4$ V. Dann beträgt die Geschwindigkeit der Elektronen $v_e = 1,3 \cdot 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (gegenüber $1,45 \cdot 10^{10}$ ohne relativistische Massenkorrektur) und die Elektronenlaufzeit pro cm Weg $\tau_e = 7,5 \cdot 10^{-10} \text{ s}$.

²⁾ Zur Elektronenlaufzeit mit Berücksichtigung der relativistischen Massenkorrektur siehe die vorhergehende Tafel.

Tafel zum Verhältnis von Elektronengeschwindigkeit zur Lichtgeschwindigkeit

$$\beta = \frac{v_e}{c} = f(U_H^1)$$



$$\beta = \frac{v_e}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{1}{1 + \frac{e \cdot U_H}{m_e \cdot c^2}} \right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{1}{1 + \frac{U_H}{511000}} \right)^2}$$

v_e = Elektronengeschwindigkeit,
 $c = 2,99790 \cdot 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ = Lichtgeschwindigkeit,
 U_H = Beschleunigungsspannung der Elektronen.

¹⁾ Über eine Tabelle mit den Zahlenwerten von β siehe Klempner, Einführung in die Elektronik, Springer Berlin, 14, 1933.

9.) Ionengeschwindigkeit als Funktion der Beschleunigungsspannung

(Ohne Berücksichtigung der relativistischen Massenzunahme, diese ist ab $U_B > 5 \cdot 10^7$ V zu beachten)

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot n \cdot U_B}{m_i}} = 1,39 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{n \cdot U_B}{M_i}} \quad [\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}]$$

n = Ladungszahl des Ions

m_i = Masse des Ions

M_i == Massenwert des Ions

U_B = Beschleunigungsspannung [V]

10.) Ionenlaufzeit bei konstanter Geschwindigkeit

Die Laufzeit von mit der Spannung U_B beschleunigten Ionen der Ladungszahl n und des Massenwerts M_i auf der Wegstrecke l beträgt unter der meist zulässigen Vernachlässigung der relativistischen Massenkorrektur :

$$\tau_i = \frac{l}{v_i} = 7,2 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{\frac{M_i}{n \cdot U}} \cdot l \quad [\text{sec}]$$

l = durchlaufene Wegstrecke [cm]

v_i = Ionengeschwindigkeit

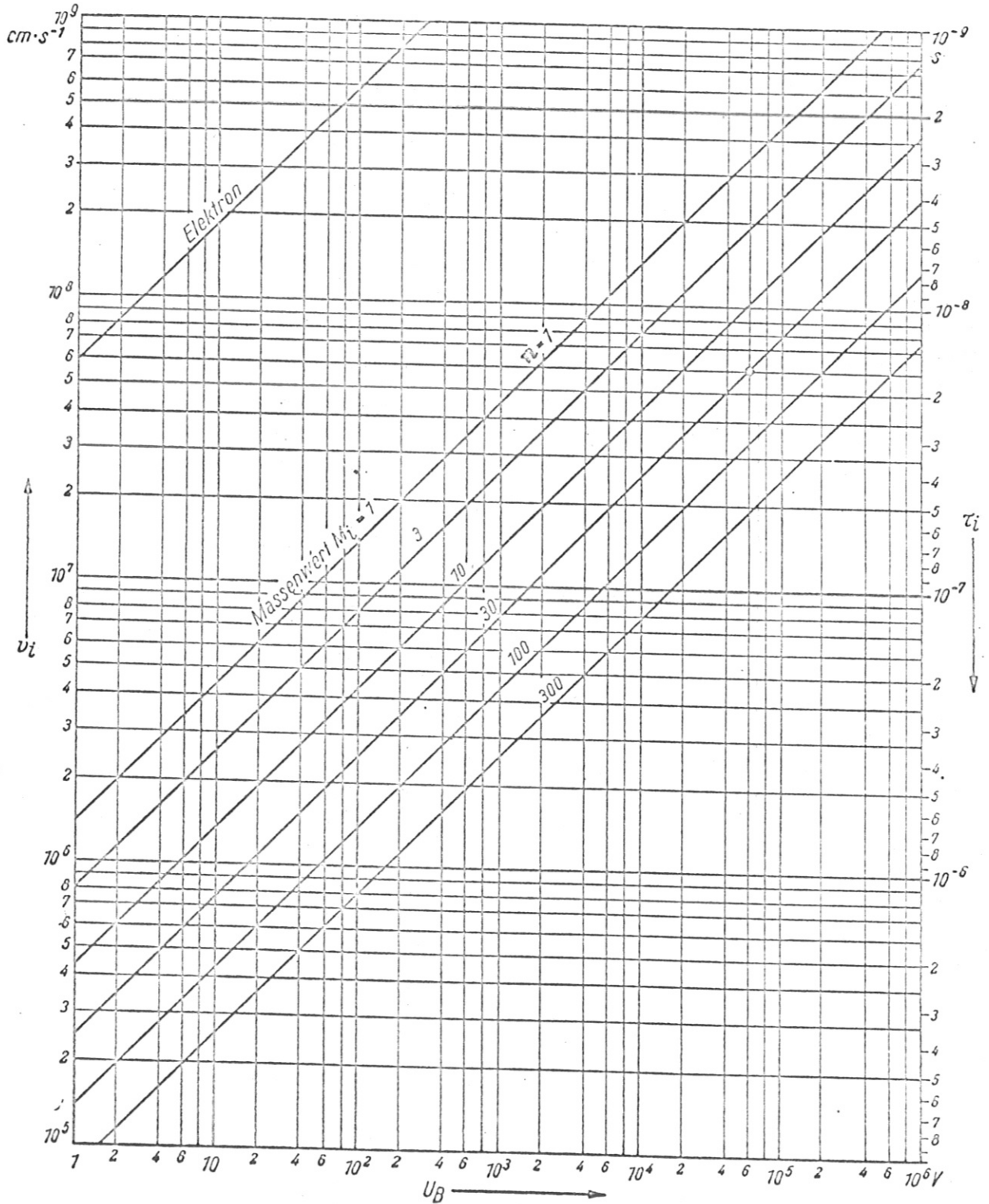
U_B in Volt

(Siehe Tabelle 23)

Tafel zur Ionengeschwindigkeit als Funktion der Beschleunigungsspannung

Ionengeschwindigkeit v_i und Ionenlaufzeit τ_i pro Zentimeter Weg werden für Ionen von verschiedenem Massenwert M_i (Ladungszahl $z = 1$) gegeben.

$$v_i = f(U_B, M_i)^{1)}$$



1) Beispiel: Es sei die Beschleunigungsspannung der Ionen $U_B = 6 \cdot 10^4$ V und ihr Massenwert $M_i = 30$. Dann beträgt die Geschwindigkeit der Ionen $v_i = 6 \cdot 10^7$ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ und die Ionenlaufzeit pro cm Weg $\tau_i = 1.7 \cdot 10^{-8}$ s.

11.) Mittlere thermische Ionengeschwindigkeit

$$\bar{v}_i = \sqrt{\frac{8 \cdot K \cdot T}{\pi m_i}} = 1,455 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{T_i}{M_i}} \quad [\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}]$$

$$K = 1,38 \cdot 10^{-16} \text{ erg} \cdot \text{grad}^{-1}$$

T_i = absolute Temperatur der Ionen [$^{\circ}\text{K}$]

m_i = Ionenmasse

M_i = Ionenmassenwert

12.) Raumladungsbegrenzte Stromdichte bei ebener Elektrodenanordnung und Ionen

$$j_i = \frac{1}{9 \sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot e}{m_i}} \cdot \frac{U_B^{3/2}}{d^2} = 5,45 \cdot 10^{-8} \frac{U_B^{3/2}}{d^2} \sqrt{\frac{n}{M_i}} \quad [\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}]$$

n = Ladungszahl des Ions (meist = 1)

U_B = Beschleunigungsspannung [V]

d = Absaugabstand

13.) Raumladungsbegrenzte Stromdichte bei Ionengemischen

$$j_i = j_{i_1} + j_{i_2} + \dots$$

$$= 5,45 \cdot 10^{-8} \left(\frac{K_1}{\sqrt{M_{i_1}}} + \frac{K_2}{\sqrt{M_{i_2}}} + \dots \right) \cdot \sqrt{n} \frac{U_B^{3/2} [\text{V}]}{d^2 [\text{cm}]} \quad [\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}]$$

$$K_1 + K_2 + \dots = 1$$

$$\frac{j_{i_1}}{j_{i_2}} = \frac{K_1}{K_2} \sqrt{\frac{M_{i_2}}{M_{i_1}}}$$

K_n = Konzentration der n-ten Ionenart im Plasma

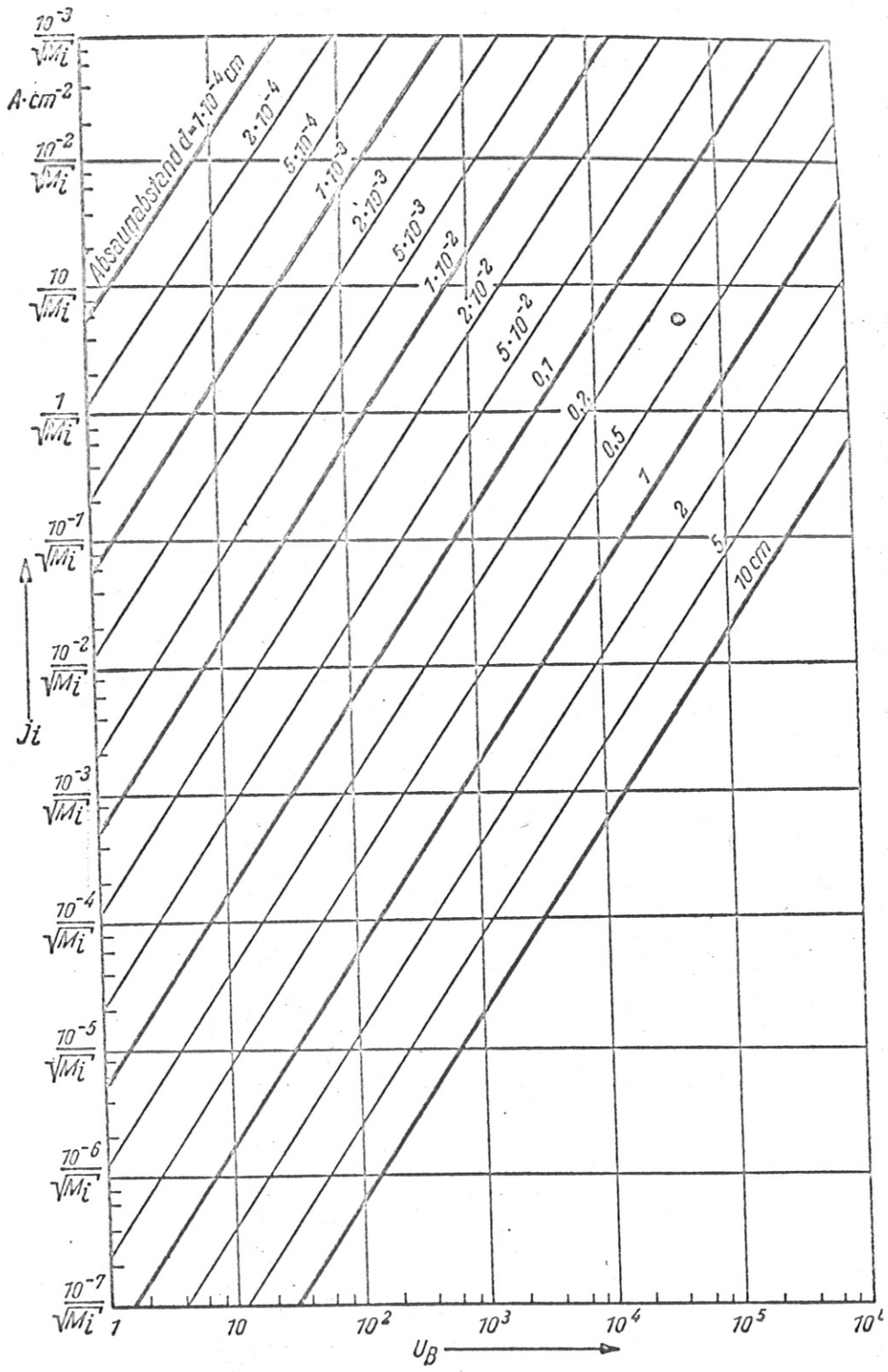
j_{i_n} = Stromdichteanteil der n-ten Ionenart

(Siehe Tabelle 24)

Tafel zur raumladungsbegrenzten Stromdichte bei Ionen

Emissionsfläche und Absaugelektrodenfläche liegen im Abstand d in parallelen Ebenen.

$$j_i = f(U_B, d)^1)$$



M_i = Massenwert der Ionen (Ladungszahl $z = 1$)

¹⁾ Beispiel: Bei einer ebenen Anordnung und Absaugung von Protonen ($M_i = 1$) aus einem Plasma betrage $U_B = 45$ kV und $d = 3,5$ mm. Dann wird $j_i = 6$ A · cm⁻².

V. Literaturverzeichnis

Gerthsen	Physik
Kapzow	Elektrische Vorgänge in Gasen und im Vakuum
Ardenne	Tabellen der Elektronenphysik, Ionenphysik und Übermikroskopie
Sanborn C. Brown	Basic Data of Plasma Physics
v. Engel	Ionized Gases
Massey-Burshop	Electronic and Ionic Impact Phenomena
Mott-Massey	Theory of Atomic Collisions
Landolt-Börnstein	Zahlenwerte und Funktionen aus Physik-Chemie