Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 4 (1931)
Heft: I

Artikel: Die behinderte Bogenentladung
Autor: Bächtiger, P. / Wehrli, M.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-110032

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 17.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die behinderte Bogenentladung

von **P. Bächtiger** und **M. Wehrli.**

(28. XII. 30.)

Inhalt: Zwischen halbkugeligen Wolframelektroden in Stickstoff wird die Spannung als Funktion der Elektrodendistanz sowohl im Gebiete der Glimm- als auch der Bogenentladung gemessen. Die im Druckbereiche 24 bis 500 mm und bei Stromstärken von 0,002 bis 0,75 Amp. erhaltenen Kurven zeigen alle ein Spannungsminimum, welches nach A. Güntherschulze dem Kathodenfalle entspricht.

Resultate:

1. Die von M. Wehrli gefundenen Gesetze des Kathodenfalles werden bestätigt.

2. Die Minimumspannung bzw. der Kathodenfall zeigt als Funktion des Druckes bei etwa 300 mm ein flaches Minimum und wird bei grössern Stromstärken und Drucken annähernd konstant.

3. Der von A. Güntherschulze entwickelte Mechanismus der behinderten Glimmentladung bei niederen Drucken wird im Wesentlichen auch in der Bogenentladung nachgewiesen: Vor der Kathode befindet sich eine Gruppe primärer Elektronen, welche bei Annäherung der Anode einen Zusammenbruch des Anodenfalles bewirken. Diese aus dem Kathodenfallgebiet stammende Elektronenschar erweist sich als ein Teil der von M. Wehrli mit Sondenmessungen festgestellten primären Gruppe.

4. Die Reichweite D dieser Elektronenschar steigt in der Glimmentladung mit wachsender Stromstärke infolge Zunahme der Gastemperatur an. In der Bogenentladung fällt D wegen der Abnahme des Kathodenfalles wieder ab.

5. Bei konstanter Stromstärke und unveränderlichem Kathodenfalle nimmt die Reichweite D in der Bogenentladung umgekehrt proportional mit dem Drucke zu, woraus auf eine annähernd konstante Gastemperatur geschlossen werden kann.

§ 1. Einleitung.

Werden die ebenen Elektroden einer normalen Glimmentladung einander genähert, so verschwindet bei einem bestimmten Abstande D die anodische Glimmhaut. Gleichzeitig sinkt die Entladungsspannung um einen Betrag ΔU. Bei weiterer Verkleinerung der Elektrodendistanz durchläuft die Spannung ein Minimum U_m und steigt bei sehr kleinen Abständen beträchtlich an (s. Fig. 2). Diese Erscheinung, welche als behinderte Entladung bezeichnet wird, ist zuerst von A. Güntherschulze[1]) gefunden worden. Im Gebiete I (der Fig. 2) werden nämlich die Vorgänge an der

[1]) A. Güntherschulze ZS. f. Phys. **30**, 175, 1924, **40**, 414, 1927, **61**, 1, 581, 1930.

Anode und im Gebiete II an der Kathode behindert. Ein analoges Verhalten hat P. BÄCHTIGER[1]) an der Glimm- und Bogenentladung[2]) bei Drucken bis 491 mm Hg beobachtet. Die Abnahme des Anodenfalles im Gebiete I des Bogens wird dabei durch die Feststellung einer vollständig parallel gehenden Abnahme der Anodentemperatur gesichert. Es mag noch erwähnt werden, dass S. ANDERSON und G. KRETSCHMAR[3]) aus dem Verhalten des Abreissbogens an Wolfram einige Spannungs-Bogenlängekurven ermittelt haben, welche bei kleinen Elektrodendistanzen einen steilen Spannungsabfall aufweisen. Ein Wiederanstieg gegen die Bogenlänge Null wird nicht erhalten. Es ist fraglich, ob diese Kurven mit den obigen verglichen werden dürfen, da sie bei nicht stationären Verhältnissen entstanden sind. Beim Kohlebogen hat W. MATHIESEN[4]) kurz vor Berührung der Elektroden eine wesentlich tiefere Spannung gemessen, als sich durch Extrapolation der Spannungs-Bogenlänge-Kurven ergeben würde. Da aber unterhalb 2 mm keine weiteren Messpunkte vorliegen, ist der Kurvenverlauf im Gebiete der behinderten Entladung vollständig unbestimmt. A. GAUDENZI[5]) hat einen Quecksilberbogen ohne Anodenfall hergestellt, der ebenfalls als behinderte Entladung angesehen werden muss.

In der vorliegenden Arbeit soll mit einer verfeinerten Apparatur die behinderte Glimm- und Bogenentladung unter denselben Bedingungen speziell untersucht werden aus folgenden Gründen: Einerseits wird dadurch der Mechanismus der behinderten Bogenentladung weiter geklärt, andrerseits können die von M. WEHRLI[6]) gefundenen Gesetzmässigkeiten des Kathodenfalles überprüft werden.

§ 2. Apparatur und Messmethode.

Alle Messungen geschehen an Wolframelektroden in reinem Stickstoffe. Die Apparatur zur Herstellung der Stickstoffatmosphäre ist die von P. BÄCHTIGER verwendete (l. c.).

In Fig. 1 erkennt man das Entladungsgefäss von 20 cm Durchmesser, den Elektrodenhalter und die Elektroden. Diese können durch eine Mikrometerschraube gegeneinander verschoben werden, welche von aussen mittels eines Fettschliffes gedreht wird. Um

---

[1]) P. BÄCHTIGER, Helv. phys. acta **3**, 335, 1930.

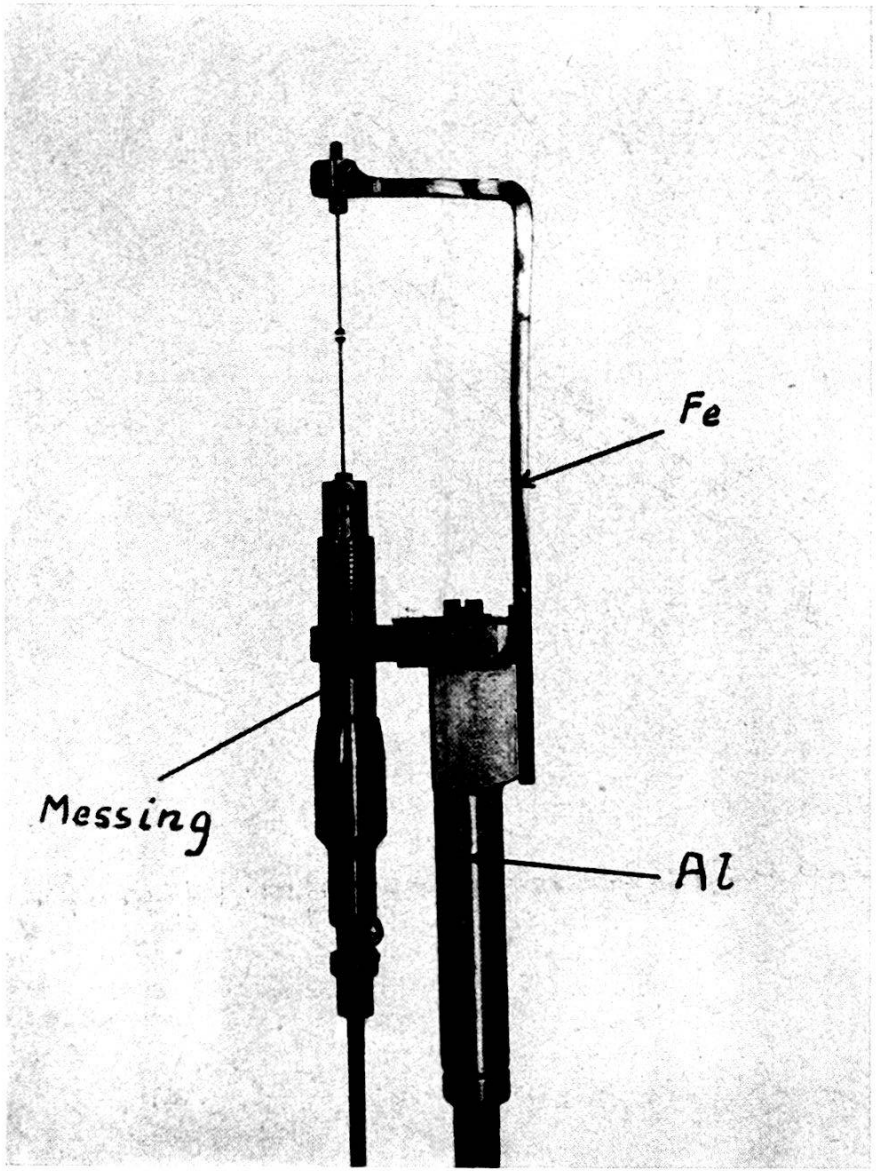
[2]) Es handelt sich dabei um den Glimmbogen (s. A. HAGENBACH und H. VEILLON Phys. ZS. **11**, 833, 1910, R. SEELIGER Phys. ZS. **29**, 168, 1930.

[3]) S. ANDERSON und G. KRETCHMAR Phys. Rev. **26**, 33, 1925.

[4]) W. MATHIESEN Untersuchungen über den elektr. Lichtbogen, Leipzig 1921.

[5]) A. GAUDENZI Brown Boveri Mitt. **16**, 303, 1929.

[6]) M. WEHRLI, Helv. Phys. Acta **1**, 323, 1928, **3**, 180, 1930.



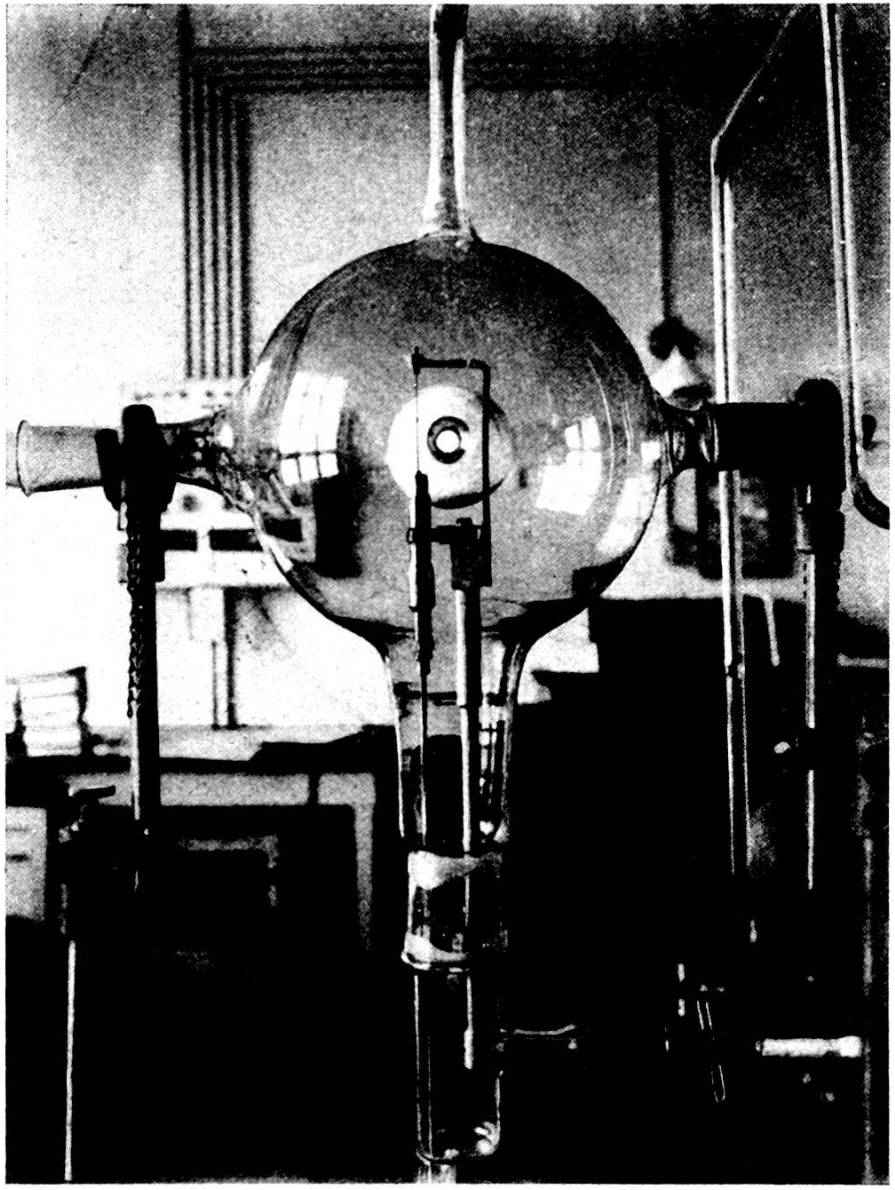


Fig. 1.

bei kleinen Elektrodendistanzen einfache Verhältnisse zu erhalten, gelangen eben abgeschliffene Wolframkugeln zur Verwendung, deren genaue Form aus Fig. 1 und 2 ersichtlich ist[1]). Der aus Eisen bestehende Elektrodenhalter wird so ausgebildet, dass eine Veränderung der Elektrodendistanz bei Erschütterungen nicht auftritt. Die Isolation geschieht durch Glimmer. Zur Strom- und Spannungsmessung werden Präzisionsinstrumente von Siemens und Halske benützt. Die Betriebsspannung beträgt 440 Volt. Bei kleinen Stromstärken ist zur Stabilisierung der Entladung ausser den Widerständen eine Glühkathodenröhre in den Stromkreis geschaltet.

Die Mikrometerschraube gestattet eine Ablesung der Bogenlänge l auf 0,001 mm und wird mit einem Präzisionsmessmikroskope geeicht. Die Messung einer U-l-Kurve geschieht folgendermassen: Zuerst wird bei der maximalen Elektrodendistanz l wegen der Einstellung des thermischen Gleichgewichtes etwa 2 Minuten gewartet. Hierauf misst man mit abnehmendem l die U-l-Kurve. Die Stellung, in der sich die Elektroden berühren, kann durch die Voltmeterbeobachtung scharf festgelegt werden und liefert den Nullpunkt der Bogenlänge l mit einer Genauigkeit von $\pm$ 0,002 mm. Ein Fehler in der Distanzmessung entsteht dann, wenn sich mit wachsender Temperatur die Elektroden ausdehnen. Aus den in § 1 erwähnten Temperaturmessungen von P. Bächtiger ergibt sich eine diesbezügliche Korrektion nur für die Anode und zwar müsste bei l-Werten grösser als D von der gemessenen Elektrodendistanz im Maximum 0,01 mm abgezogen werden. Diese Korrektion wird im weitern vernachlässigt.

Die Bestimmung der Ausdehnung des Kathodendunkelraumes und negativen Glimmlichtes geschieht mit einem Kathetometer.

§ 3. Resultate.

Fig. 2 zeigt alle Messwerte einer U-l-Kurve für die Bogenentladung.

Zuerst werden die als Kreise eingetragenen Punkte beobachtet. Nach der Messung bei verschiedenen anderen Stromstärken geschieht die Ablesung der mit einem Kreuze bezeichneten Werte. Es ergibt sich eine gute Reproduzierbarkeit, d. h. die maximalen Fehler dürften $\pm$ 0,5 Volt bzw. $\pm$ 0,01 mm betragen. Die Distanz D entspricht dem l-Werte des Schnittpunktes aus den

[1]) Stabelektroden besitzen den Nachteil, dass eine Bogenentladung unterhalb 100 mm Druck nicht mehr gezündet werden kann.

Tangenten durch die Punkte U_m (Minimumspannung) und den Wendepunkt W.

Es werden im Druckbereiche 24 bis 497 mm und im Stromintervall 0,002 bis 0,750 Amp. 165 U-l-Kurven gemessen. Ausgehend vom Drucke 497 mm wird sukzessive abgepumpt, sodass alle Kurven der gleichen Gasfüllung angehören.

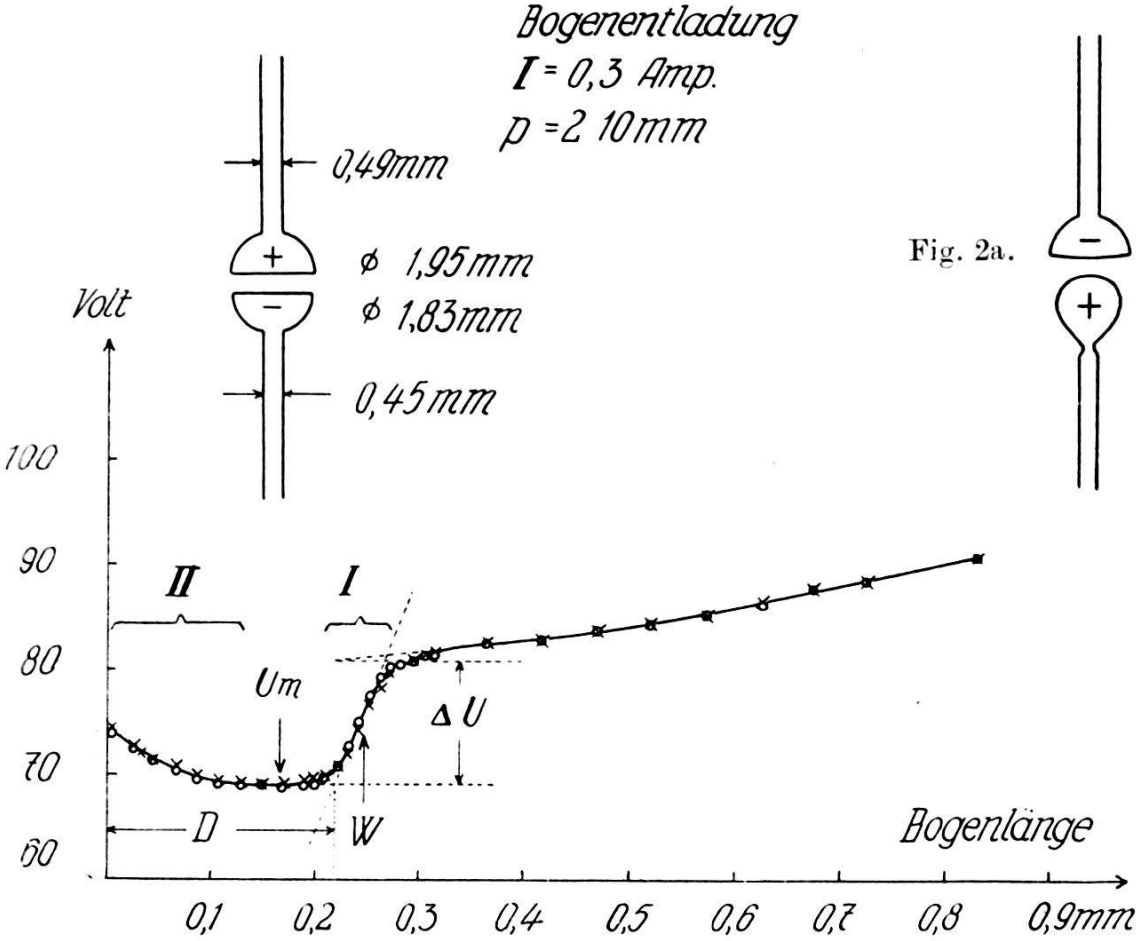


Fig. 2a.

Fig. 2.

In der Tabelle 1 sind für die Bogenentladung die Drucke p, die Minimumspannungen U_m, die Abfallweiten D und die Produkte $p.D$ zusammengestellt.

Eine Komplikation tritt dadurch ein, dass bei Gasdrucken unterhalb 100 mm die Kathodenform infolge Kathodenzerstäubung nicht mehr konstant bleibt. Sie wird kleiner und zwar besonders auf der konvexen Seite, was bekanntlich wegen der verminderten Energieabfuhr eine Erniedrigung des Kathodenfalles zur Folge hat (s. § 4). Eine Veränderung der Anode ist nur von kleinem Einfluss. Es wird deshalb folgendermassen gemessen:

Normalerweise ist die Kathode unten. Unterhalb 150 mm Druck geschehen jedoch die meisten Messungen umgepolt, wobei

Tabelle 1. Bogenentladung.

p_0 mm Hg	p mm Hg	U_m Volt	D mm	$p \cdot D$ mm · mm	Bemerkungen
		$I = 0{,}060$ Amp.			
475	488	219,0	0,169	82,5	
376	385	216,2	0,195	75,0	
276	284	206,6	0,245	69,6	
201	208	211,5	0,319	66,4	
140	144	241,5	0,472	68,0	*
90	93	242,6	0,814	75,6	*
		$I = 0{,}080$ Amp.			
475	491	181,8	0,148	72,7	
376	387	178,8	0,174	67,3	
276	284	171,6	0,239	67,9	
201	209	174,4	0,315	65,8	
140	146	191,8	0,471	68,8	*
90	93,5	192,6	0,768	71,8	*
47,5	51	213,4	1,251	63,7	* †
		$I = 0{,}110$ Amp.			
475	491	153,3	0,150	73,6	
376	387	142,4	0,160	61,9	
276	285	138,0	0,215	61,3	Fig. 4 Type I
201	210	139,8	0,285	59,8	
140	145	150,0	0,435	63,1	*
90	93	151,4	0,709	66,0	*
47,5	51	161,6	1,084	55,3	* †
		$I = 0{,}150$ Amp.			
475	491	120,0	0,134	65,8	
376	387	114,4	0,145	56,1	
276	283	111,2	0,194	54,9	
201	208	112,2	0,260	54,0	
140	145	119,6	0,398	57,7	*
90	94	119,6	0,621	58,4	*
47,5	51	129,0	0,968	49,3	* †

Normalerweise ist die Kathode unten. * bedeutet Kathode oben. † untere Elektrode ist zu seiner ellipsoidähnlichen Form geschmolzen. p_0 Kaltdruck des Gases. p Warmdruck. U_m Spannungsminimum. Zimmertemperatur etwa 18° C.

Tabelle 1. (Fortsetzung.)

p_o mm Hg	p mm Hg	U_m Volt	D mm	$p \cdot D$ mm · mm	Bemerkungen
		$I = 0{,}200$ Amp.			
475	490	96,0	0,119	58,3	
376	389	93,0	0,134	52,1	
276	285	90,5	0,176	50,1	
201	210	91,2	0,240	50,4	
140	146	96,4	0,362	52,9	*
90	94,5	96,5	0,576	54,5	*
47,5	51,5	103,5	0,927	47,8	* †
		$I = 0{,}300$ Amp.			
475	492	71,4	0,101	49,7	Fig. 5b
376	391	69,8	0,118	46,1	
276	287	68,5	0,154	44,2	
201	210	68,8	0,218	45,8	Fig. 2
140	147	72,1	0,325	47,8	*
90	94	72,0	0,493	46,3	*
47,5	51,5	77,3	0,943	48,5	* Fig. 5b
24	24	89,7	1,820	43,7	* †
		$I = 0{,}400$ Amp.			
475	494	59,1	0,099	48,9	
376	390	57,5	0,105	40,9	
276	288	56,7	0,145	41,8	
201	211	56,8	0,185	39,1	
140	147	59,4	0,308	45,3	*
90	94,5	59,2	0,430	40,6	*
47,5	52	63,2	0,700	36,4	* †
		$I = 0{,}500$ Amp.			
475	495	51,3	0,086	42,5	
376	387	50,1	0,109	42,1	
276	288	48,9	0,129	37,2	
201	212	48,9	0,172	36,5	
140	148	51,3	0,284	42,0	*
90	95	51,1	0,399	37,9	*
47,5	52,5	54,7	0,630	33,1	* †
24	24	63,8	1,530	36,7	* †

Normalerweise ist die Kathode unten. * bedeutet Kathode oben. † untere Elektrode ist zu einer ellipsoidähnlichen Form geschmolzen. p_o Kaltdruck des Gases. p Warmdruck. U_m Spannungsminimum. Zimmertemperatur etwa 18° C.

Tabelle 1. (Schluss.)

p_o mm Hg	p mm Hg	U_m Volt	D mm	$p \cdot D$ mm · mm	Bemerkungen
		$I = 0{,}600$ Amp.			
475	496	45,4	0,080	39,7	
376	392	44,3	0,101	39,4	
276	288	43,6	0,121	34,8	
201	213	43,8	0,155	33,0	
140	148	45,7	0,270	40,0	* Fig. 3a
140	148	45,0	0,251	37,2	Fig. 3b
90	95	45,8	0,369	35,0	* Fig. 3c
90	95	47,8	0,380	36,1	Fig. 3d
47,5	53	48,9	0,590	31,3	* †
		$I = 0{,}750$ Amp.			
475	497	39,8	0,075	37,3	
376	397	38,9	0,091	36,1	
276	287	38,1	0,126	36,2	
201	212,5	38,1	0,158	33,6	
201	212,5	40,0	0,179	38,0	*
140	149	39,7	0,260	38,8	*
90	95	40,0	0,347	33,0	*
47,5	53	42,6	0,581	30,8	* †
24	25,5	49,3	1,316	33,6	* †

Normalerweise ist die Kathode unten. * bedeutet Kathode oben. † untere Elektrode ist zu einer ellipsoidähnlichen Form geschmolzen. p_o Kaltdruck des Gases. p Warmdruck. U_m Spannungsminimum. Zimmertemperatur etwa 18° C.

die obere Elektrode durch Zerstäubung kleiner wird. Nur bei der Stromstärke 0,6 Amp. werden beide Schaltungen angewendet. Die zu dieser Stromstärke gehörenden U-l-Kurven finden sich in Fig. 3.

In Tabelle 1, in der auch die entsprechenden Figuren angegeben sind, erkennt man folgendes: Ursprünglich ist gemäss Fig. 2 die obere Elektrode die grössere. Deshalb findet man bei der Stromstärke 0,75 Amp. und dem Drucke 212,5 mm, bzw. 0,6 Amp. und 148 mm mit der Kathode oben die höhere Minimumspannung. Im Falle 0,6 Amp. und 95 mm hat sich infolge Zerstäubung der obern Elektrode das Verhältnis umgekehrt. Mit abnehmendem U_m nimmt auch die Abfallweite D ab.

Eine weitere Störung erkennt man in Fig. 3 a) und c), indem oberhalb D ein Nebenminimum auftritt. P. Bächtiger (l. c.) hat

dieselbe Erscheinung in viel stärkerem Masse bei einer Kugelkathode gefunden, während sie bei der am Ende eben geschliffenen Stabkathode nicht aufgetreten ist. Eine Kontrolle der zerstäubten Elektrodenform in einer 14fach vergrössernden Projektion ergibt, dass die ursprünglich ebene Kathodenfläche schwach konvex geworden ist; die Störung, welche mit wachsendem Drucke abnimmt, zeigt sich also nur bei unebener Kathodenfläche. Einen weitern Beweis liefern die ungestörten Kurven in Fig. 3 b) und d),

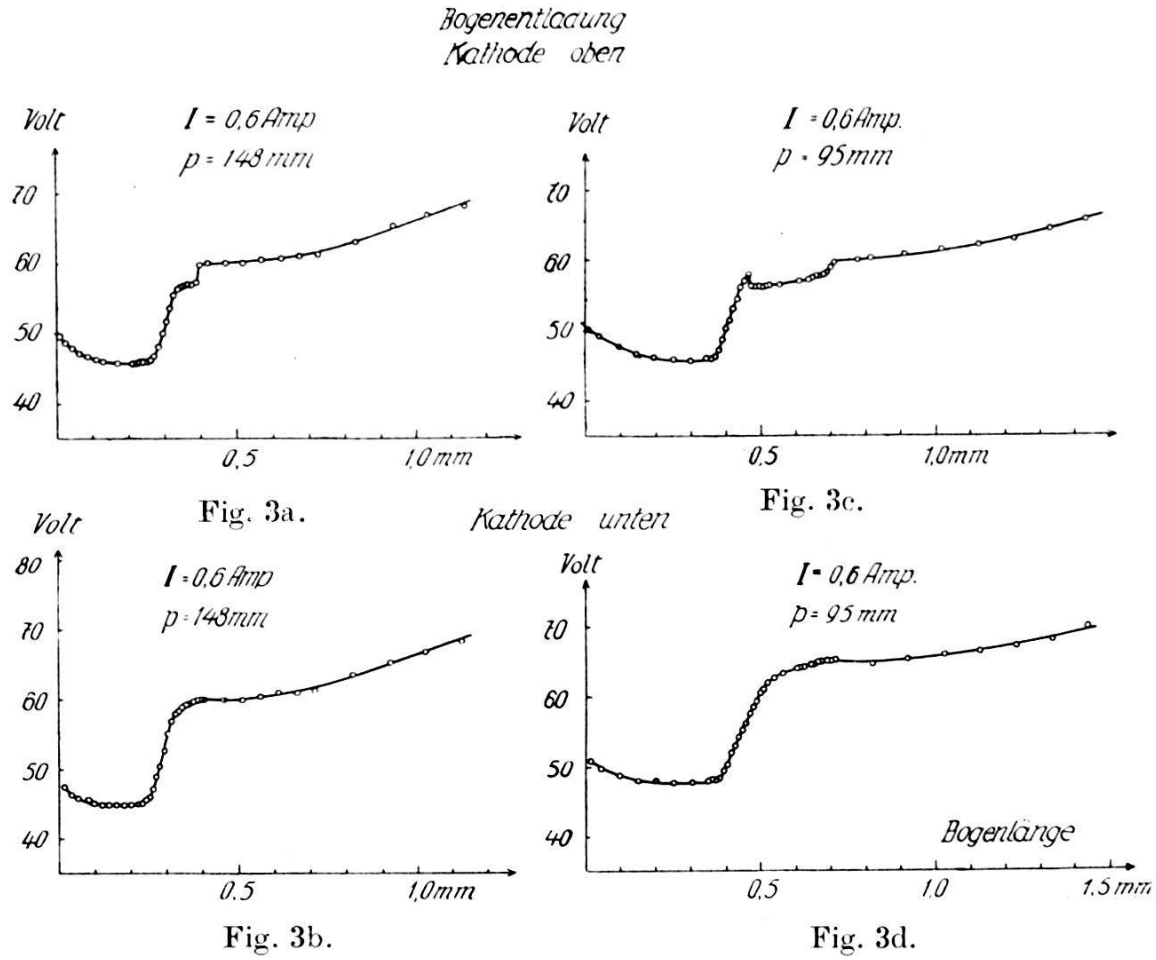


Fig. 3a. Fig. 3c.

Fig. 3b. Fig. 3d.

welche bei umgepolter Entladung gemessen werden. Die Form der Anode scheint keine grosse Rolle zu spielen.

Bei der Stromstärke 0,4 Amp. und dem Druck 52 mm wird die untere Elektrode geschmolzen und erhält die in Fig. 2a angegebene Form. Es kann dadurch der Einfluss der Anodenform auf die Abfallweite D studiert werden. Die so erhaltenen Werte sind in Tabelle 1 mit † bezeichnet. Ein Vergleich mit den übrigen Werten ergibt für die Ellipsoidform ein kleineres D. Verfolgt man zum Beispiel beim Drucke 47,5 mm die Abfallweite D als Funktion der Stromstärke, so erhält man aus Tabelle 1 eine kontinuierliche Abnahme von D mit steigendem I. Eine Ausnahme zeigt die

Messung bei 0,3 Amp., welche vor dem Schmelzen beobachtet worden ist. Das D ist dabei um 0,14 mm zu gross. Ähnliche Verhältnisse erhält man beim Betrachten verschiedener Drucke, d. h. die vorn abgerundete Anode ergibt eine kleinere Abfallweite D als die ebene Elektrode.

In Tabelle 2 sind einige Zahlen für die Glimmentladung zusammengestellt.

Tabelle 2. Glimmentladung.

p mm	U_m Volt	D mm	$p \cdot D$ mm · mm	Kurventyp (Fig. 4)	ΔU_m	Bemerkungen
			$I = 0{,}03$ Amp.			
488	267	0,18	87,9	IV	9	ü
384	258	0,21	80,7	IV	3	ü
282	246	0,27	76,1	IV	5	ü
206	241	0,32	66,0	III	0	ü $d_a = 0{,}15$
143	260	0,38	54,3	III	0,5	ü*
92	287	0,57	52,4	IV	2	ü*
50	339	0,83	41,5	III	0	ü*
			$I = 0{,}004$ Amp.			
475	330	0,11	52,2	IV	8	
376	290	0,13	48,8	IV	4	
276	284	0,17	47,0	IV	3	
204	287	0,22	44,9	IV	3	$d_a = 0{,}21$
140	285	0,27	37,8	IV	2	$d_a = 0{,}22$
48	298	0,62	29,8	IV	2	ü* $\begin{cases} d_a = 0{,}30 \\ d_i = 0{,}15 \end{cases}$
7,5	258	2,17	16,3			Güntherschulze

Normalerweise ist die Kathode unten. * bedeutet Kathode oben. p Warmdruck, U_m absolutes Spannungsminimum, ü Glimmlicht übertrifft ebenen Kathodenteil, ΔU_m ist die Differenz von U_m und der Spannung im Nebenminimum M_1 (s. Fig. 4d). d_i, d_a Abstand Kathode – innerer bzw. äusserer Glimmlichtsaum in mm.

Bei den mit ü bezeichneten Werten ist die Ausdehnung des negativen Glimmlichtes grösser als der ebene Teil der Kathode, so dass unübersichtliche Verhältnisse eintreten.

Alle U-l-Kurven lassen sich ohne Zwang in die 4 Kurventypen der Fig. 4 einordnen. Beim Glimmbogen tritt nur Type I auf. Sie besitzt ein Minimum M_1. Ungefähr beim Übergang von der Bogen- zur Glimmentladung zeigt sich ein schwaches Nebenminimum M_2 (Type II). Im Gebiete der Glimmentladung bildet sich das Minimum M_2 stärker aus (Type III) und kann bei höhern Drucken und kleinen Stromstärken gegen M_1 bis 12 Volt tiefer

liegen (Type IV). Mit U_m wird stets das absolute Spannungsminimum bezeichnet.

Das Verhalten der Beziehung zwischen U und l bei konstanter Stromstärke und verändertem Druck erkennt man aus Fig. 5.

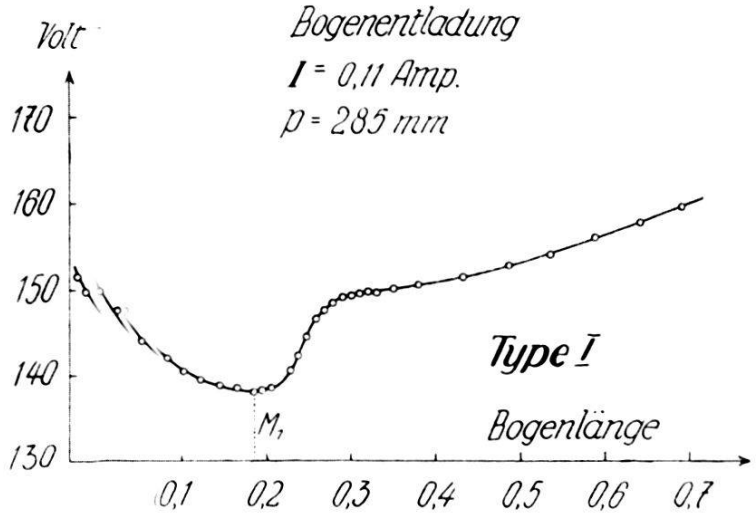


Fig. 4a.

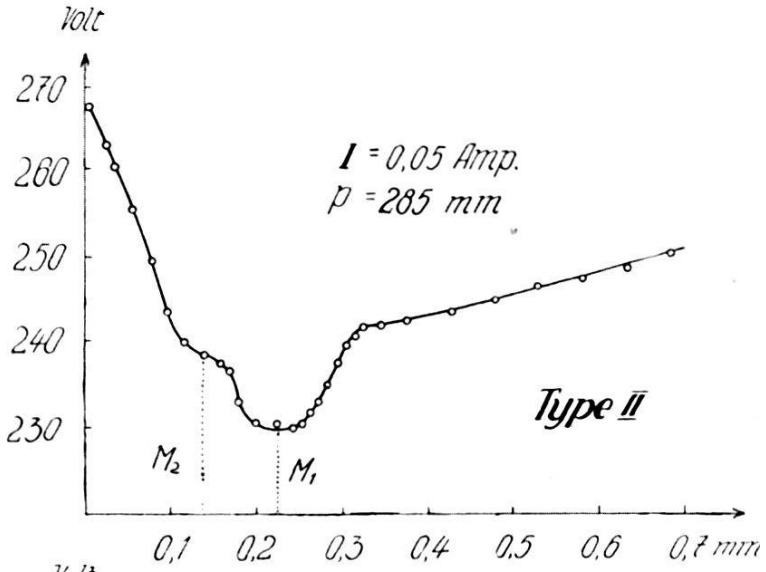


Fig. 4b.

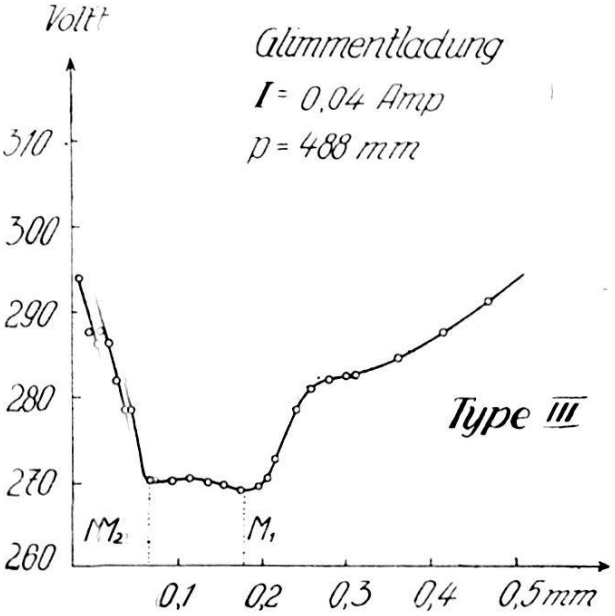


Fig. 4c.

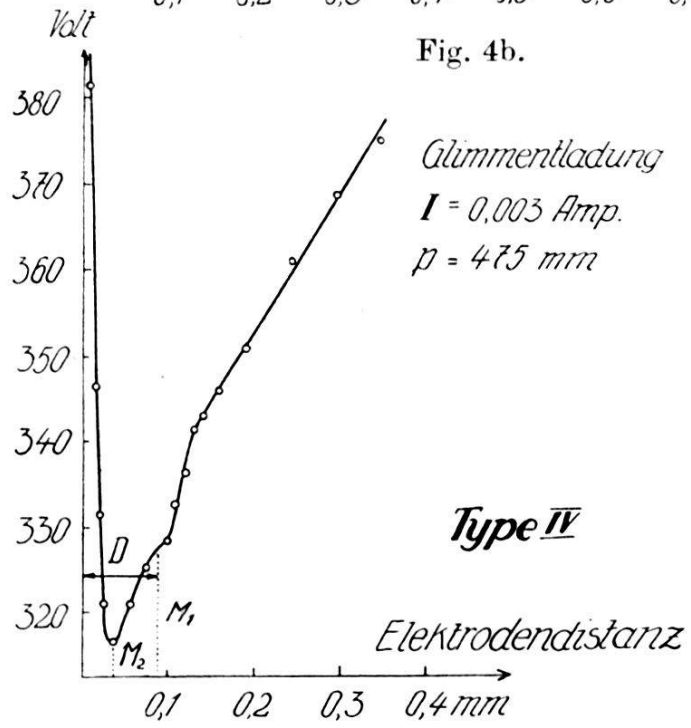


Fig. 4d.

Sowohl bei der Glimm- als auch der Bogenentladung drängen sich die Kurven mit wachsendem Drucke zu kleinerm l zusammen. Eine weitere zur Stromstärke 0,04 Amp. gehörende Messreihe findet sich in Fig. 4c.

Die Übereinstimmung des Spannungsabfalles ΔU (s. Fig. 2) mit der Ionisierungsspannung 17 Volt, wie A. Güntherschulze

gefunden hat, wird im Glimmentladungsgebiet auf $\pm$ 1 Volt bestätigt. Dagegen nimmt im Glimmbogen das ΔU mit steigendem Drucke ab und erreicht bei $p = 500$ mm den Wert von etwa 10 Volt.

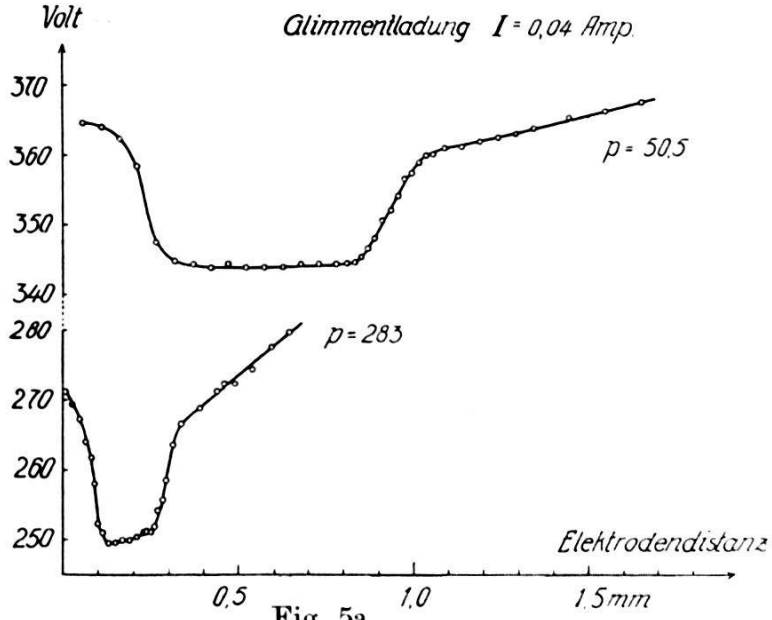


Fig. 5a.

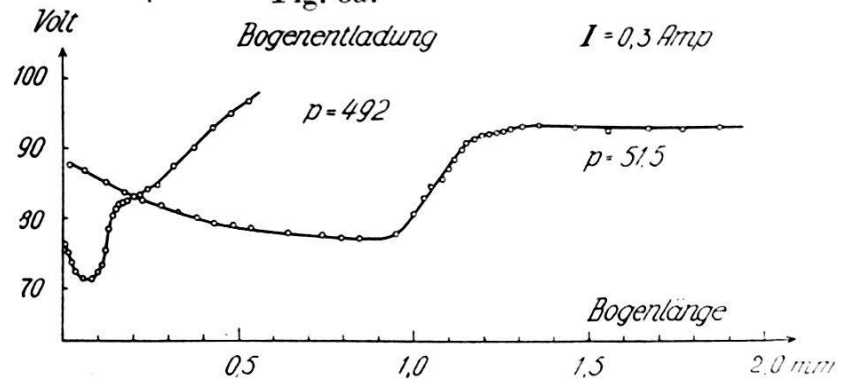


Fig. 5b.

§ 4. Die Minimumspannung U_m und der Kathodenfall U_k.

Man kann aus den U-l-Kurven den Kathodenfall U_k ermitteln nach der sogenannten Methode der behinderten Entladung. Wenn man nämlich mit A. Güntherschulze (l. c.) annimmt, dass der Spannungsabfall ΔU im Wesentlichen mit dem Anodenfalle übereinstimmt, so wird das Spannungsminimum U_m mit dem Kathodenfalle U_k identisch. Die Genauigkeit dieser Übereinstimmung ist noch unbekannt und muss durch eingehende Sondenmessungen nach der Langmuir'schen Methode bestimmt werden. Wie M. Wehrli (l. c.) gezeigt hat, liegt im Bogengebiet die Minimumspannung U_m dem wahren Kathodenfalle um etwa 20 Volt näher, als der statisch gemessene Wert.

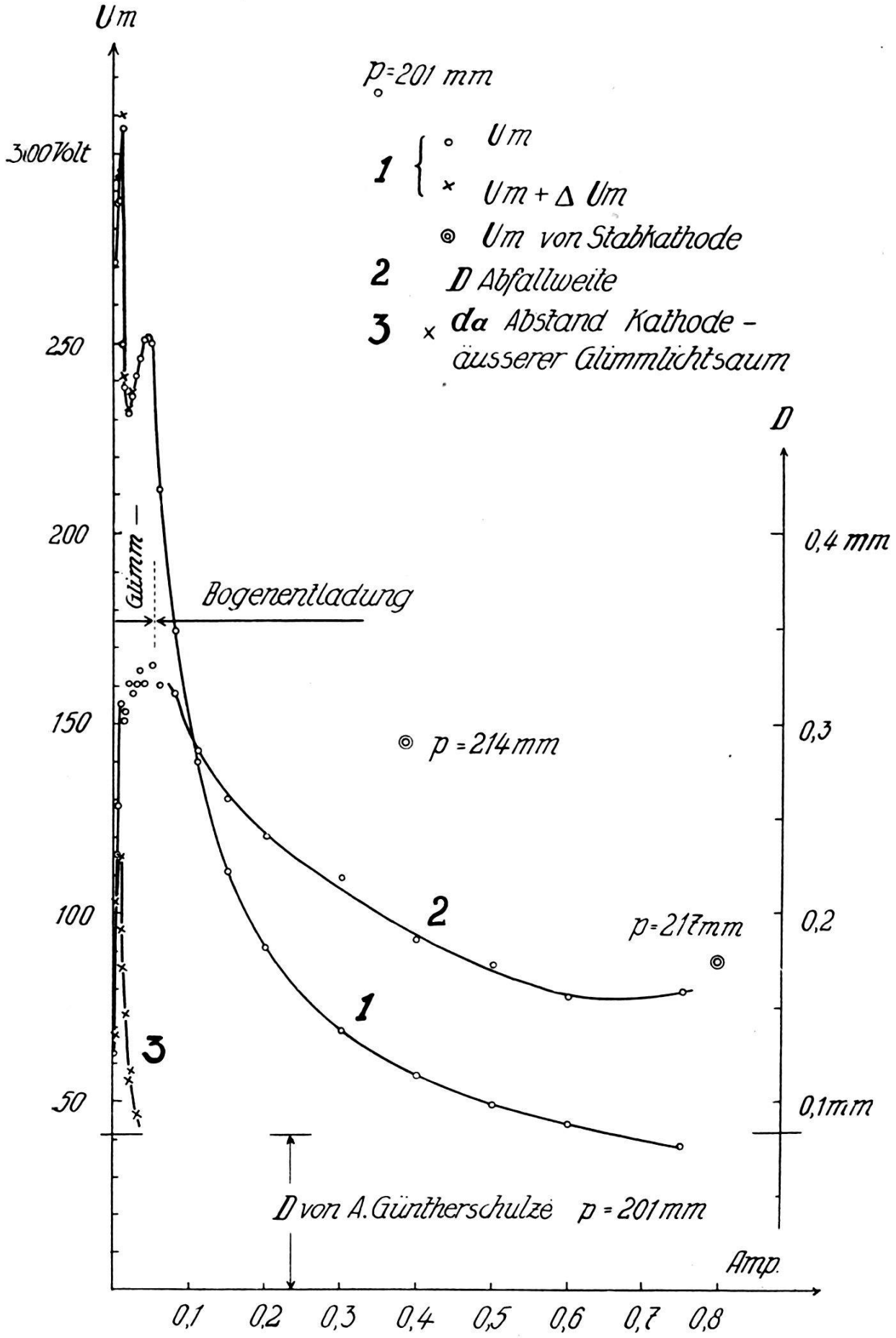

Um
p=201 mm
1
Um
Um + Δ Um
Um von Stabkathode
2
D Abfallweite
3
da Abstand Kathode - äusserer Glimmlichtsaum
3100 Volt
250
200
150
100
50
Glimm —
Bogenentladung
p = 214 mm
p = 217 mm
D
0,4 mm
0,3
0,2
0,1 mm
D von A. Güntherschulze p = 201 mm
Amp.
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8

Fig. 6.

Kurve 1 der Figur 6 enthält die Beziehung zwischen Stromstärke und Minimumspannung bzw. Kathodenfall beim Kaltdrucke 201 mm. Vollständig analoge Kurven ergeben sich auch bei den andern Drucken. Zwei Messwerte aus der Arbeit von P. Bächtiger (l. c.) für eine Stabkathode von 1,75 mm Durchmesser sind in Fig. 6 hinzugefügt. Es werden damit die von M. Wehrli (l. c.) gefundenen Gesetzmässigkeiten bestätigt, nämlich: „Der Kathodenfall steigt noch im Gebiete der Bogenentladung bis über 250 Volt an, er hängt bei kleinen Stromstärken stark von der Elektrodenform ab. Im Glimmentladungsgebiet zeigt er ein Minimum.“ Setzt man an Stelle von U_m die Spannung des Minimums M_1, so werden obige Gesetze nicht verändert.[1])

Die Abhängigkeit der Minimumspannung vom Drucke erkennt man aus Fig. 7.

Die Kurven sind so gezeichnet, wie wenn die Elektrodenformen sich nicht verändert hätten (korrigierte Kurventeile dünn ausgezogen). Die Minimumspannung bzw. der Kathodenfall ist bei grössern Stromstärken und Drucken annähernd unabhängig von von p. Im Allgemeinen zeigt sich ein Minimum, das etwa bei 300 mm liegt.

§ 5. Diskussion.

Ausgehend von einer Beobachtung von G. Schmidt entwickelt A. Güntherschulze für das Verschwinden des Anodenfalles bei der Glimmentladung folgenden Mechanismus: Wird die Elektrodendistanz verkleinert, so gerät die negative Raumladung vor der Anode bei der Distanz D in eine Schar von Elektronen. Diese kommt aus dem Kathodenfallgebiete und besitzt eine genügende Geschwindigkeit durch Bildung positiver Ionen die negative Ladung zu vernichten. Infolge der ungleichen Beweglichkeit

[1]) Ein ähnliches Nebenminimum wie M_2 in Fig. 4 hat A. Güntherschulze (l. c.) bei der anomalen Glimmentladung beobachtet (Druck etwa 4 mm). Er führt dasselbe auf eine Abnahme des Kathodenfalles zurück, welche durch eine Gas- und Wasserdampfhaut auf der Anode hervorgerufen werden soll. Unsere Elektroden sind bei 3000° K geglüht und weisen deshalb keine Wasserhaut auf. Vielmehr scheint es, dass im vorliegenden Falle eine solche Abnahme des Kathodenfalles die gleiche Ursache hat, wie das Minimum der Kurve 1 in Fig. 6, das auch bei grossen Elektrodenabständen auftritt. Nach den Beobachtungen von M. Wehrli hängt dasselbe mit der Kathoden- bzw. Gastemperatur eng zusammen. Danach wäre für den Kathodenfall nicht die Grösse U_m, sondern die Spannung in M_1 massgebend. Diese Korrektion tritt nur beim Kurventyp IV auf. Sie wird deshalb in Tabelle 2 als ΔU_m aufgeführt. Die so korrigierten Werte sind in die Kurve 1 der Fig. 6 eingetragen.

der beiden Ladungsträger braucht es zu dieser Neutralisation auf einige Hundert Elektronen nur ein positives Ion. Die Distanz D gibt ein Mass für die Reichweite dieser primären Elektronenschar und übertrifft die Ausdehnung des negativen Glimmlichtes beträchtlich. Sie wächst mit dem Kathodenfalle U_k und mit der mittleren

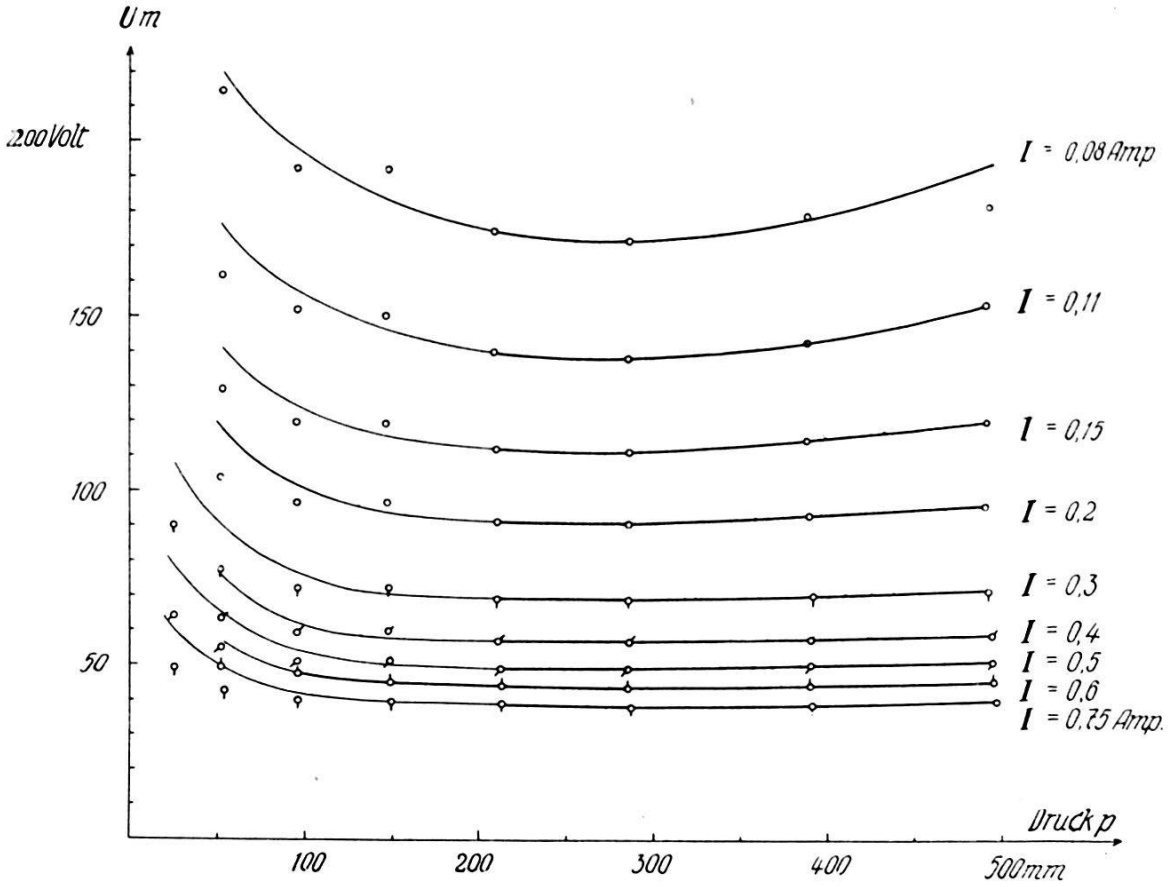


Fig. 7.

freien Weglänge λ. A. Güntherschulze findet für ein bestimmtes Gas und konstante Temperatur folgende Beziehung:

$$\frac{p \cdot D}{U_k^2} = \text{konst.} \tag{1}$$

d. h. die Grösse D ist proportional λ. Interessant ist, dass die Stromdichte bzw. die Stromstärke in dieser Gleichung nicht auftritt.

Bei der Bogenentladung hat M. Wehrli mittels dynamischer Sondenmessungen eine primäre Elektronenschar vor der Kathode festgestellt, welche gerade die oben geforderten Eigenschaften aufweist. Bei einem Kathodenfall von 143 Volt und dem Drucke 260 mm beträgt ihre Reichweite etwa 1,5 mm. Dieselbe steigt mit wachsendem U_k und abnehmendem Drucke.[1])

[1]) Die Druckabhängigkeit ist noch unveröffentlicht.

Es soll untersucht werden, wieweit sich obiger Mechanismus auf die Bogenentladung anwenden lässt. Durch Einführung der Gastemperatur folgt aus Gleichung (1):

$$D = \text{konst.} \frac{T}{p} U_k^2 . \tag{2}$$

Es dürfte aber im Allgemeinen eine kompliziertere Abhängigkeit von U_k auftreten als nach Gleichung (2). In unserem Falle ist infolge der grossen Stromdichten und Drucken eine hohe Gastemperatur T vorhanden, was schon aus den glühenden Elektroden hervorgeht. Man wird also gemäss Gleichung (2) grössere D erwarten als bei den Bedingungen von A. Güntherschulze nach Beziehung (1).

Kurve 2 der Fig. 6 zeigt den Verlauf der Abfallweite D als Funktion der Stromstärke I beim Kaltdrucke 201 mm. Ferner ist für die Glimmentladung der Abstand von der Kathode bis zur äussern Begrenzung des negativen Glimmlichtes in Kurve 3 angegeben. Dieser Abstand d_a steigt bei kleinem I mit der Grösse D steil an und fällt von 0,007 Amp. im Gegensatz zu D stark ab. Die primären Elektronen reichen also wie bei A. Güntherschulze beträchtlich über das negative Glimmlicht hinaus. Ihre Reichweite besitzt im Gebiete der Glimmentladung ein Maximum und nimmt beim Glimmbogen mit wachsendem I ab. Dieses Verhalten kann man gemäss Beziehung (2) leicht verstehen. Der Anstieg dürfte zum grössern Teile auf einer Zunahme der Temperatur T beruhen, da ja, wie M. Wehrli festgestellt hat, gerade in diesem Strombereiche auch die Kathodentemperatur stark zunimmt. Im Glimmbogengebiet wird die Temperatur weiter wachsen; aber der Kathodenfall fällt so steil ab, dass die Reichweite D der Elektronenschar sich dennoch verkleinert.

Nach den Messungen von A. Güntherschulze wird die Konstante der Formel (1) für N_2 von einigen Millimetern Druck und dem Kathodenfalle 258 Volt

$$2{,}45 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mm} \cdot \text{mm}}{\text{Volt} \cdot \text{Volt}} .$$

In Fig. 6 ist das zum Druck 201 mm gehörende D nach Gleichung (1) eingezeichnet. Die Kurve 2 scheint für kleines I wirklich diesem Werte zuzustreben.

Setzt man in der normalen Glimmentladung von A. Günther-Schulze die Gastemperatur gleich 330° K, so ermöglicht Formel (2) eine grobe Abschätzung der Temperatur T, denn es gilt dann:

$$T = 1{,}35 \cdot 10^6 \frac{p \cdot D}{U_k^2} . \tag{3}$$

Man erhält mit dieser Beziehung für den Kaltdruck 201 mm folgendes: Bei der Stromstärke 0,002 Amp. beträgt die Temperatur T 462° K und steigt im Gebiete der Glimmentladung bis etwa 1500° K. Im Glimmbogen wächst T weiter und kommt in die Grössenordnung von 20 000° K hinein.[1])

Wie schon erwähnt (s. Fig. 7) ist in der Bogenentladung bei höheren Stromstärken und Drucken der Kathodenfall U_k annähernd unabhängig von p. Wäre für ein bestimmtes I die Temperatur T nahezu konstant, so müsste nach Gleichung (2) auch das Produkt $p.\ D$ konstant sein. Nach Tabelle 1 trifft das tatsächlich zu. So weicht zum Beispiel bei der Stromstärke 0,3 Amp. $p.\ D$ im Maximum 6% vom Mittelwerte 46,9 ab, während der Druck von 47,5 bis 475 mm ändert, d. h. um das Zehnfache. Die Messung beim Drucke 24 mm fällt infolge der geschmolzenen Anode ausser Betracht (s. § 3). Man kann daraus entnehmen, dass bei konstanter Stromstärke die Gastemperatur nur wenig vom Drucke abhängt.

Zusammenfassend ergibt sich, dass auch bei hohen Drucken und Stromstärken (bis 500 mm und 0,8 Amp.) sowohl im Glimmentladungs- als auch im Glimmbogengebiete der Zusammenbruch des Anodenfalles gemäss dem obigen Mechanismus (A. Günther-Schulze) durch eine Gruppe primärer Elektronen aus dem Raume des Kathodenfalles hervorgerufen wird. Die primäre Gruppe nach M. Wehrli zeigt eine Reichweite in der richtigen Grössenordnung, übertrifft jedoch die Abfallweite D, sodass möglicherweise für den Zusammenbruch des Anodenfalles nur ein Teil dieser Gruppe verantwortlich ist. Letztere könnte ja gemäss der stufenweisen Energieverluste durch die Ionisation in einzelne Untergruppen

---

[1]) Eine genauere Temperaturbestimmung nach dieser Methode setzt eine bessere Kenntnis der Beziehung zwischen D und U_k voraus. Setzt man die Werte von Tabelle 1 in Formel (3) ein, so ergibt sich im Bogengebiet eine mit dem Strome I proportional zunehmende Temperatur T. Unabhängig von T besteht bei konstantem p_0 mit guter Annäherung die Beziehung:

$$\frac{p \cdot D}{I\ U_m^2} = \text{konst.} \tag{4}$$

Die Werte der Konstanten sind für die Kaltdrucke 90; 201 und 475 mm, 0,029; 0,031 bezw. 0,032.

verschiedener translatorischer Geschwindigkeit zerfallen.[1]) A. GÜNTHERSCHULZE macht die plausible Annahme, dass die primäre Elektronengruppe die negative Raumladung vor der Anode durch Stossionisation neutralisiert.

Es soll auf eine weitere Ursache dieser Neutralisation hingewiesen werden. Neben der Entstehung von positiven Ionen kann auch die Veränderung des Verhältnisses der Geschwindigkeiten der negativen und positiven Ladungsträger eine Neutralisierung ergeben. Vor der Anode bewegen sich die Elektronen im Wesentlichen ungeordnet, ihre mittlere translatorische Geschwindigkeit gegen dieselbe ist gering. Sobald aber die primäre Elektronengruppe die Anode erreicht, tritt eine Änderung ein. Dann beginnt die mittlere translatorische Geschwindigkeit zu wachsen, und zwar umso mehr, je grösser die primäre, translatorische Gruppe im Verhältnis zur gesamten Stromdichte der Elektronen wird. Gleichzeitig nimmt die Temperatur der ungeordneten Elektronen ab, sodass die gesamte negative Stromdichte etwa konstant bleibt, wie M. WEHRLI zeigen konnte.

Die Zunahme des Verhältnisses der Geschwindigkeiten v^-/v^+ bewirkt in einem Entladungsgebiete eine Abnahme der negativen Raumladung, was gerade im vorliegenden Falle an der Anode festgestellt wird.[2])

In welchem Verhältnisse diese beiden Ursachen der Abnahme des Anodenfalles bei verschiedenen Bedingungen stehen, kann erst eine quantitative Betrachtung abklären.

Zum Schlusse möchten wir Herrn Prof. Dr. A. HAGENBACH für die gütige Überlassung der Institutsmittel danken.

Basel, Physikalische Anstalt der Universität.

---

[1]) Einen Hinweis in dieser Richtung ergibt die von M. WEHRLI (Helv. Phys. Acta **3**, 196, 1930) festgestellte stufenweise Zündung der Sonde als Kathode.

[2]) Eine solche Änderung von v^-/v^+ (Mittelwerte über da ganze Gebiet), ist von M. WEHRLI bereits ausführlich in Betracht gezogen worden für die Abnahme des Kathodenfalles im Glimmbogen. Er hat dabei ein Gleichungssystem aufgestellt, welches auch, für den Anodenfall umgerechnet, angegeben wird. Mit der Anwendung dieser Formeln soll noch gewartet werden, bis mittels Temperaturmessungen an den Elektroden die Energieabfuhr genauer bekannt ist.