

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

Artikel: Die Behinderung des Anodenfalles bei der Bogenentladung
Autor: Bächtiger, Paul
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-110047>

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: 23.02.2026

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

Die Behinderung des Anodenfalles bei der Bogenentladung

von Paul Bächtiger.

(16. X. 31.)

An einer Bogenentladung mit Wolframelektroden in Stickstoff von 180 mm Druck werden Spannungs-Elektrodendistanzkurven gemessen und daraus die Minimumsspannung U_m sowie die Abfallweite D , bei welcher ein steiler Spannungsabfall ΔU eintritt, ermittelt. Mit Hilfe von Energiegleichungen unter Benützung der Elektrodentemperaturen gelingt der quantitative Nachweis, dass ΔU einer Abnahme des Anodenfalles entspricht. Experimentell ergibt sich bei Stab- und Halbkugelkathoden eine Zunahme der Abfallweite D ungefähr proportional mit der Quadratwurzel aus der Minimumsspannung U_m . Bei Verwendung thermisch verschiedener Anoden zeigt sich, dass die Distanz D und daher auch die Gas-temperatur wesentlich von der Anodentemperatur beeinflusst werden. „Thermisch verschieden“ sollen solche Elektroden genannt werden, bei welchen die Wärmeableitung verschieden ist. Es werden auch noch Spannungs-Bogenlängekurven in Wasserstoff gemessen. Bei diesem Gase tritt ein Spannungsabfall in zwei annähernd gleich grossen Stufen auf. Die Abfallweite D nimmt hier, im Gegensatz zu Stickstoff, ungefähr proportional mit der Minimumsspannung U_m zu.

§ 1. Einleitung.

Werden die Elektroden einer Gasentladung einander so weit genähert, dass sich die normalen Erscheinungen an der Anode oder an der Kathode nicht mehr voll ausbilden können, so nennt man dies eine behinderte Entladung. In einer kürzlich erschienenen Arbeit haben P. BÄCHTIGER und M. WEHRLI¹⁾ die behinderte Bogenentladung in Stickstoff, insbesondere die Behinderung des Anodenfalles näher untersucht. Die im Druckbereiche $p = 24$ bis 500 mm Hg und bei Stromstärken von $I = 0,002$ bis 0,75 Amp. mit halbkugeligen Wolframelektroden gemessenen Spannungs-Bogenlängekurven zeigen alle bei scharf reproduzierbaren Distanzen D einen steilen Spannungsabfall ΔU (siehe Fig. 5), der als eine Abnahme des Anodenfalles gedeutet wird. Im folgenden soll versucht werden, diese Annahme mit Hilfe von Energiegleichungen quantitativ zu beweisen. Innerhalb der Abfallweite D durchläuft die Spannung mit kleiner werdender Bogenlänge ein Minimum

¹⁾ P. BÄCHTIGER und M. WEHRLI, Helv. phys. acta 4, 31, 1931 (im folgenden mit Arbeit I zitiert).

U_m , das, wie nun M. WEHRLI und P. BÄCHTIGER¹⁾ mit Langmuir'schen Sondenmessungen gezeigt haben, angenähert mit dem Kathodenfalle U_K übereinstimmt. Die Ergebnisse der Arbeit I lassen sich wie folgt kurz zusammenfassen: Im Druckintervall $p = 150$ bis 500 mm wird bei grösseren Stromstärken die Minimumsspannung bzw. der Kathodenfall annähernd unabhängig von p . Bei konstantem Kathodenfall und unveränderlicher Stromstärke nimmt die Abfallweite D in der Bogenentladung umgekehrt proportional dem gemessenen Drucke zu, d. h.

$$p \cdot D = \text{konst.} \quad (1)$$

Macht man die plausible Annahme, dass D umgekehrt proportional der Gasdichte d wächst, so ergibt sich aus (1) eine vom Drucke unabhängige Gastemperatur $T^0 K^2$). Diese Annahme scheint berechtigt zu sein, denn wäre sie nicht erfüllt, so müsste sich die Gastemperatur stets gerade so verändern, dass das Produkt pD konstant bleibt, was unwahrscheinlich ist. In Arbeit I konnte ferner bei zunehmender Minimumsspannung qualitativ ein Anwachsen der Distanz D nachgewiesen werden, d. h. $D = f(U_m)$, wobei f im untersuchten Gebiete eine monoton ansteigende Funktion ist. Nach obigem lässt sich D darstellen durch

$$D = c_1 \frac{Tf(U_m)}{p} \text{ wobei } c_1 = \text{konst.}$$

Wenn c_1 und f bekannt sind, so ergibt (2) eine Methode zur Bestimmung der Gastemperatur, da sich die Grössen D , U_m und p experimentell sehr leicht messen lassen.

In der vorliegenden Untersuchung sollen nun die Messungen der Arbeit I mit zwei thermisch stark verschiedenen Kathoden bis zu hohen Stromstärken erweitert werden, um womöglich eine Aussage über $f(U_m)$ zu erhalten. Damit lässt sich die Frage prüfen, ob das von A. GÜNTHERSCHULZE³⁾ in der Glimmentladung festgestellte Gesetz $f(U_m) = U_m^2$ auch bei der Bogenentladung Gültigkeit besitzt. Um ferner die Frage zu entscheiden, ob nur in Stickstoff eine Behinderung des Anodenfalles eintritt, werden auch Spannungs-Bogenlängekurven in Wasserstoff gemessen.

¹⁾ M. WEHRLI und P. BÄCHTIGER, Helv. phys. acta **4**, 290, 1931.

²⁾ Die Gasdichte d und die Gastemperatur T sind dabei als Mittelwerte über das ganze Kathodenfallgebiet gedacht.

³⁾ A. GÜNTHERSCHULZE, ZS. f. Phys. **30**, 175, 1924.

§ 2. Apparatur und Messmethode.

Alle Messungen werden an der schon in Arbeit I ausführlich beschriebenen Apparatur ausgeführt. Als Entladungsgefäß dient ein mit reinem Stickstoff gefüllter Glaskolben von 20 cm Durchmesser. Die Wolframelektroden können durch eine von aussen zu betätigende Mikrometerschraube gegeneinander verschoben werden. Die Kathode befindet sich stets unten. Die Messgenauigkeit sowie eventuell vorhandene Fehlermöglichkeiten sind in Arbeit I angegeben. Damit die Kathodenform konstant bleibt, darf der Gasdruck nicht zu klein sein, da sonst eine starke Kathodenzerstäubung auftritt. Wird der Druck jedoch sehr hoch gewählt, so ergeben sich so kleine Distanzen D , dass die Unebenheiten der geschliffenen Wolframelektroden dagegen in Betracht fallen und einen merklichen unkontrollierbaren Fehler verursachen können. Aus diesen Erwägungen heraus gelangt normalerweise ein Druck von etwa 180 mm Hg zur Verwendung. Die für die Energieberechnungen notwendigen Elektrodentemperaturen werden mit einem von der phys. techn. Reichsanstalt geprüften Glühfadenpyrometer¹⁾ nach Holborn und Kurlbaum bestimmt. Die Genauigkeit der Temperaturmessungen dürfte etwa $\pm 10^{\circ}$ betragen.

§ 3. Die Abnahme ΔU des Anodenfalles.

Um zu entscheiden, wie sich der in § 1 erwähnte Spannungsabfall ΔU (siehe Fig. 1) auf den Kathoden- und Anodenfall verteilt, müssen außer der Gesamtspannung noch die Kathoden- und Anodentemperatur als Funktion der Bogenlänge bekannt sein. Damit sich die späteren Energieberechnungen möglichst einfach gestalten, werden als Elektroden Wolframkügelchen an dünnen Stielen verwendet. Für die Stromstärke 0,5 Amp. sind die Resultate in Fig. 1 wiedergegeben. Der Kaltdruck p_0 beträgt 130 mm. Die mit dem Glühfadenpyrometer erhaltene schwarze Temperatur wird um den infolge Glasabsorption und Reflexion des Entladungsgefäßes notwendigen Betrag vergrößert. Die Umrechnung der schwarzen auf die absolut wahre Temperatur geschieht mit Hilfe der Zwikker'schen²⁾ Emissionskoeffizienten. Wie aus Fig. 1 ersichtlich ist, bleibt im untersuchten Bogenlängebereich die Kathodentemperatur konstant, während die Anodentemperatur eine der Gesamtspannung parallel gehende Abnahme aufweist.

¹⁾ Der Glühfadenpyrometer wurde mir von Herrn Priv. Doz. Dr. M. WEHRLI freundlicherweise zur Verfügung gestellt, wofür ihm hiermit gedankt werde.

²⁾ C. ZWIKKER, Propriétés physiques du tungstène aux hautes températures. Diss. Amsterdam 1925.

Vollständig analoge Kurven haben sich auch für die Stromstärken 0,2 und 0,9 Amp. ergeben. Nach den Energiegleichungen von M. WEHRLI¹⁾ lässt sich der Kathodenfall folgendermassen darstellen (alle nachstehenden Energiebetrachtungen beziehen sich stets auf die Zeit von 1 Sek.):

$$U_K = \frac{W_2 + W_3}{I} - \frac{V_J}{1+a} + \varphi \quad (3)$$

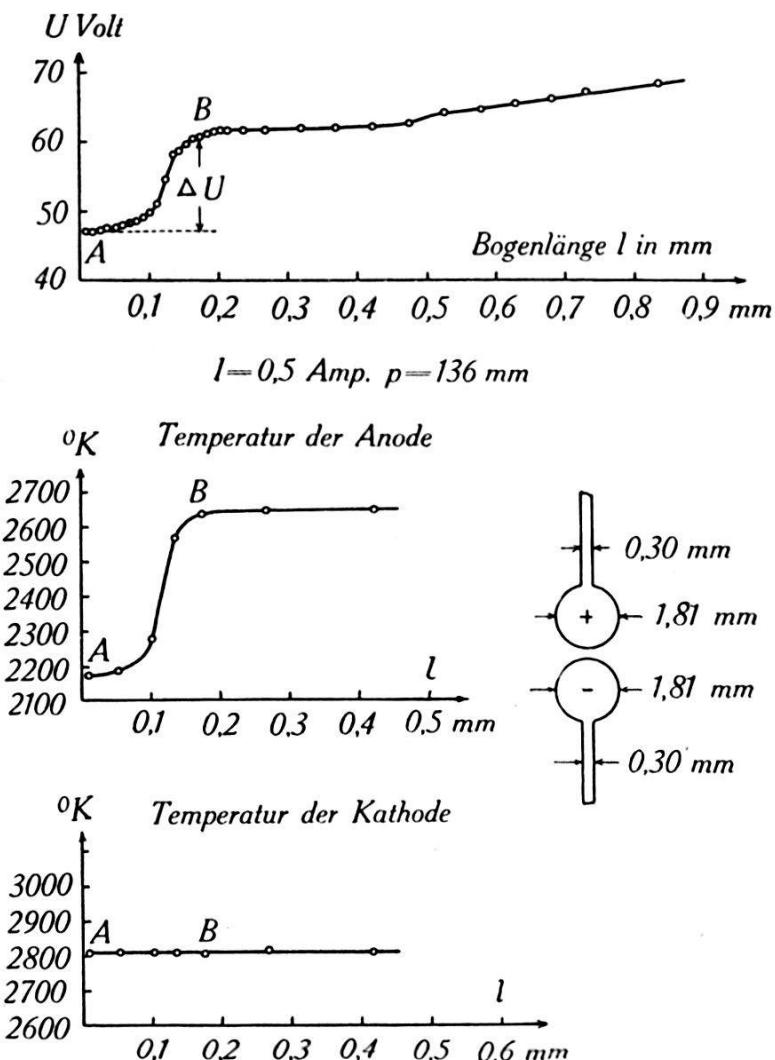


Fig. 1. Spannung, Anodentemperatur und Kathodentemperatur als Funktion der Bogenlänge.

dabei bedeuten: U_K den Kathodenfall, I die Stromstärke, W_2 die durch Strahlung und Wärmeleitung durch den Stiel von der Kathode und dem Kathodenfallgebiet weggeföhrte und W_3 die durch das Gas abgeföhrte Leistung, V_J die Ionisierungsspannung, φ die Austrittsspannung der Elektronen, a das Verhältnis der

¹⁾ M. WEHRLI, Helv. phys. acta **1**, 247, 1928; ebenda **1**, 449, 1928.

Beweglichkeiten der positiven und negativen Ladungsträger am Ende des Kathodenfallgebietes.

Bei unveränderlicher Kathodentemperatur und Stromstärke werden alle Größen der rechten Seite von (3) und damit auch der Kathodenfall U_K konstant. Die Anode ist bei den verwendeten Bogenlängen doch so weit entfernt, dass eine Störung des eigentlichen Fallraumes vor der Kathode wohl noch nicht stattfindet. Aus Fig. 1 und Gleichung (3) ergibt sich daher, dass eine Abnahme des Anodenfalles den Spannungsabfall ΔU hervorruft. (Den Potentialabfall in der sog. Gassäule kann man hier überhaupt vernachlässigen, da er klein ist.). Im weiteren soll nun quantitativ untersucht werden, wie die mit Hilfe von Energiegleichungen berechnete Abnahme des Anodenfalles mit dem experimentell gefundenen Werte ΔU übereinstimmt. Die Energiegleichung für das Anodenfallgebiet lautet (M. WEHRLI l. c.):

$$I U_a = W_2 + W_3 - I \varphi - I_d^- U_d^- + I_d^+ U_d^+ + I_d^+ V_J. \quad (4)$$

Es bedeuten dabei: U_a den Anodenfall, W_2 und W_3 die der Gleichung (3) entsprechenden Größen, bezogen aber auf das Anodenfallgebiet, U_d^- die mittlere translatorische Geschwindigkeit der Elektronen, wenn sie das Gebiet des Anodenfalles erreichen, d. h. im Abstande d von der Anode, I_d^- den von Elektronen getragenen Strom bei d , I_d^+ den positiven Strom und U_d^+ die mittlere translatorische Geschwindigkeit der positiven Ionen an der Stelle d .

Die beiden letzten Glieder von (4) braucht man infolge ihrer Kleinheit nicht zu berücksichtigen. Im Punkte B der Fig. 1 sei der Anodenfall U_a und im Punkte A $U_a - \Delta U$. Wendet man (4) auf die Punkte A und B der Fig. 1 an und subtrahiert die erhaltenen Gleichungen voneinander, so ergibt sich

$$I \cdot \Delta U = (W_2^B - W_2^A) + (W_3^B - W_3^A) - [(I_d^- U_d^-)^B - (I_d^- U_d^-)^A]. \quad (5)$$

Der zweite und dritte Klammerausdruck der rechten Seite von (5) dürfen nicht gross sein und werden daher vernachlässigt, so dass man für ΔU folgenden Ausdruck erhält:

$$\Delta U = \frac{W_2^B - W_2^A}{I}. \quad (6)$$

Die Grösse W_2 ist angenähert gleich der Summe aus der durch Strahlung von der Anodenkugel abgeföhrten Energie W_K plus der durch den Stiel weggeleiteten W_{St} . In Tabelle 1 sind die experimentellen Daten sowie die mit Hilfe von (6) berechneten Werte ΔU für die Stromstärken 0,2; 0,5 und 0,9 Amp. zusammengestellt.

Tabelle 1.Stickstoff $p_0 = 130$ mm

I	Pkt.	U	l	T_K	T_A	W_K	W_{st}	ΔU beob.	ΔU berechn.
0,2	B	97,6	0,232	2650°	2082°	2,98	2,07	13,3	11,1
	A	84,3	0,087	2643°	1745°	1,22	1,62		
0,5	B	60,5	0,175	2806°	2633°	9,08	3,13	13,4	12,8
	A	47,1	0,010	2806°	2170°	3,63	2,20		
0,9	B	47,9	0,185	2920°	3057°	18,00	4,50	12,6	12,7
	A	35,3	0,010	2914°	2570°	8,06	2,97		

Es bedeuten dabei: I die Stromstärke in Amp., U die Elektrodenspannung in Volt, l die Bogenlänge in mm, T_K und T_A die Temperatur von Kathode und Anode in °K, W_K die durch Strahlung von der Anode fortgeführte und W_{st} die durch den Stiel weggeleitete Leistung in Watt, ΔU die Abnahme des Anodenfalles in Volt. Die Werte von W_{st} sind der Arbeit von E. SIEBOTH¹⁾ entnommen.

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich ist, stimmt die berechnete Abnahme des Anodenfalles recht befriedigend mit dem beobachteten Werte ΔU überein. Damit ist mit Sicherheit bewiesen, dass der Spannungsabfall ΔU einer Abnahme des Anodenfalles entspricht.

Der Anodenfall in den Punkten B beträgt also etwa 13 Volt, da nach § 1 die Minimumsspannung angenähert mit dem Kathodenfall übereinstimmt.

§ 4. Die Abfallweite D bei Stab- und Halbkugelkathode.

Bei einem Kaltdrucke $p_0 = 175$ mm ($t = 18^{\circ}$ C) werden Spannungs-Bogenlängekurven gemessen sowohl mit einer Stab- als auch Halbkugelkathode. Die Anode ist in beiden Fällen ungefähr gleich gross. Es ergeben sich im Bogengebiet für kleine wie für grosse Stromstärken bei beiden Kathoden ganz ähnliche Kurvenformen, wie die in Arbeit I wiedergegebenen Resultate. Die ermittelten Minimumsspannungen U_m und die Abfallweiten D als Funktion der Stromstärke zeigt Fig. 2. Da der Druck im Entladungsgefäß mit wachsender Stromstärke ansteigt, so sind alle D , um sie miteinander vergleichen zu können, auf den Druck $p = 180$ mm reduziert nach der Gleichung $p \cdot D = \text{konst}$. Die Minimumsspannung U_m wird durch die Druckerhöhung kaum

¹⁾ E. SIEBOTH, Helv. phys. acta **4**, 153, 1931.

beeinflusst, da nach § 1 U_m nur wenig mit dem Drucke variiert. Wie aus Fig. 2 ersichtlich ist, nimmt D in der Bogenentladung mit wachsender Stromstärke I ab und scheint einem konstanten Grenzwert zuzustreben. Diese Abnahme röhrt von der Ver-

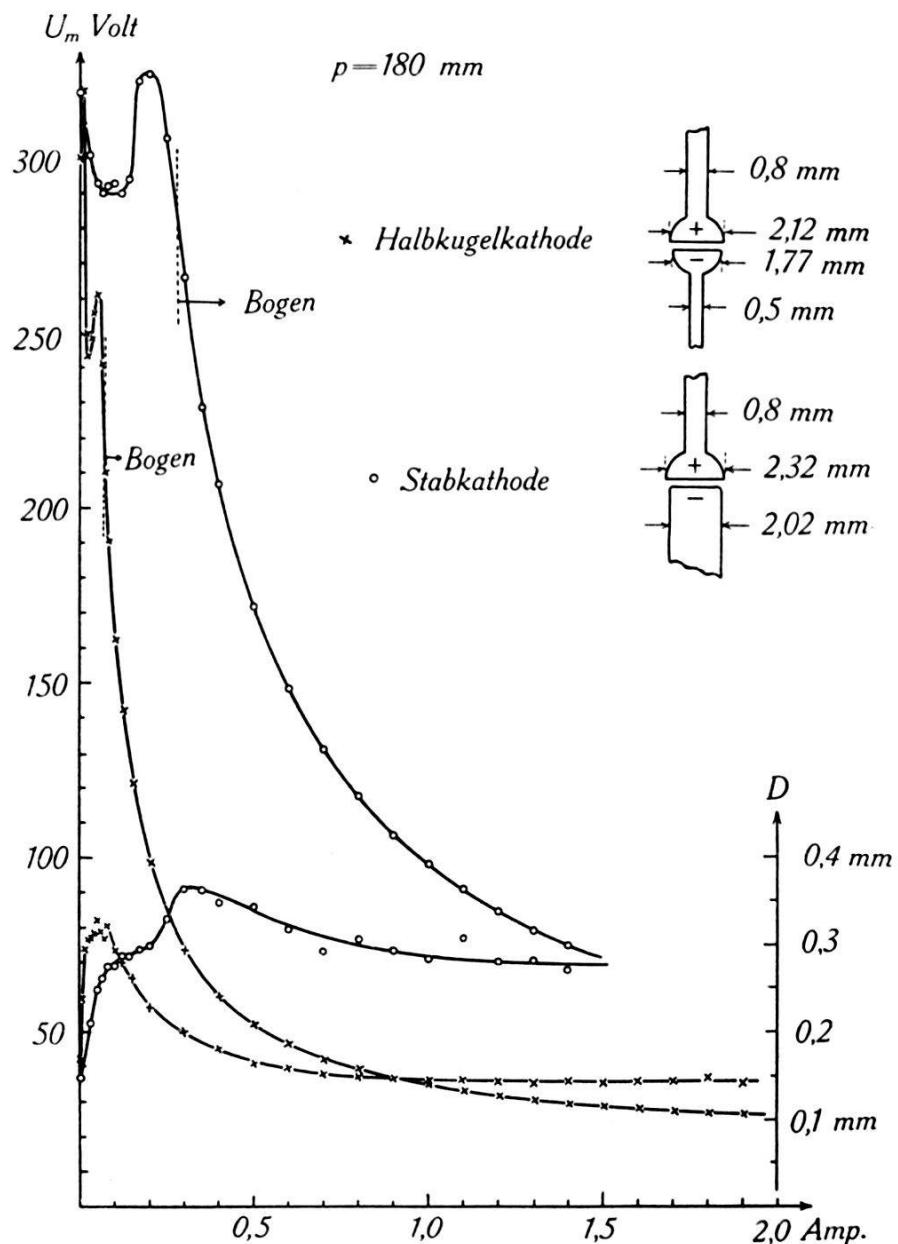


Fig. 2. Minimumspannung U_m und Abfallweite D als Funktion der Stromstärke bei thermisch verschiedenen Kathoden.

kleinerung des Kathodenfalles her, da die Gastemperatur mit zunehmender Stromstärke sehr wahrscheinlich nicht abnimmt. Es mag noch erwähnt werden, dass bei der Stabkathode die Anode schon bei 1,7 Amp. schmilzt (Bogenlänge $l \geq B$), während bei der Halbkugelkathode trotz der etwas kleineren Anode ein Schmelzen erst bei 2,2 Amp. eintritt ($l \leq B$). Der Anodenfall,

d. h. ΔU , besitzt für beide Kathodenformen angenähert die gleiche Grösse. Bei der Stabkathode muss also nach Gleichung (4) entweder die Leistung $I_d^- U_d^-$ grösser sein oder aber W_3 viel kleiner als bei der Halbkugelkathode. Es wäre wohl möglich, dass W_3 sogar negativ wird. Das würde folgendes bedeuten: Die der Anode und dem Anodenfallgebiet (welches klein ist) aus dem Entladungsraum

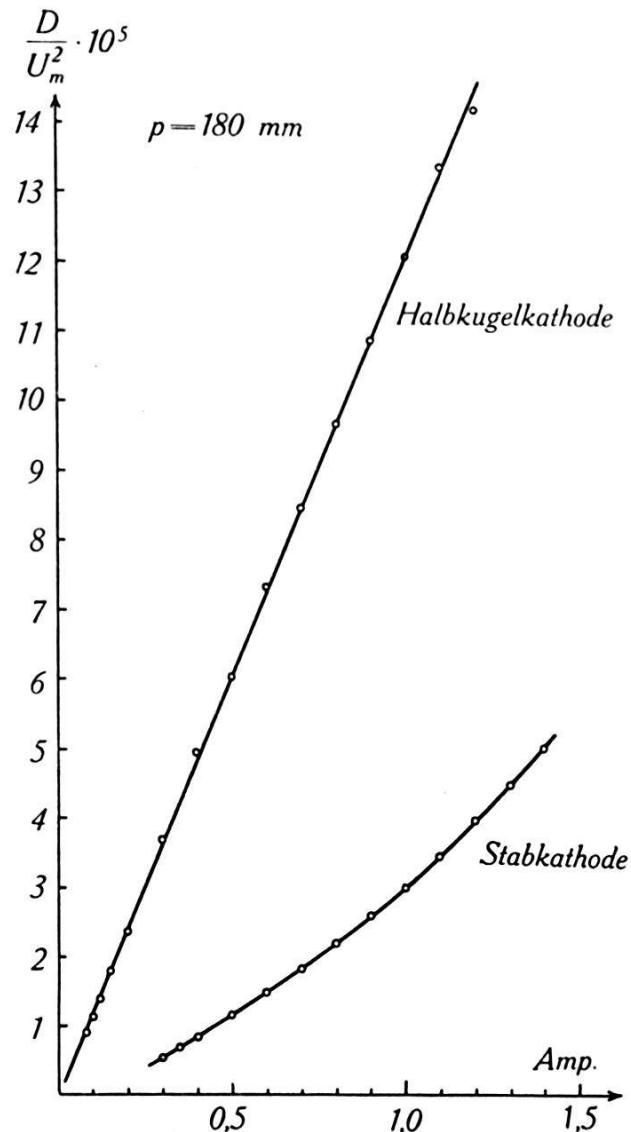


Fig. 3. $\frac{D}{U_m^2}$ als Funktion der Stromstärke I bei Stab- und Halbkugelkathode.

durch das Gas zugeführte Leistung ist grösser als die durch Wärmeleitung des Gases von der Anode fortgeföhrte.

Die in Arbeit I bei einer Halbkugelkathode und kleinen Stromstärken festgestellte Beziehung

$$\frac{D}{U_m^2} = \text{konst.} \cdot I \quad \text{wobei } p = \text{konst.} \quad (7)$$

bestätigt sich auch hier für diese Kathodenform (siehe Fig. 3). Wie Fig. 3 weiter zeigt, ist die Gesetzmässigkeit (7) bei der Stab-

kathode jedoch gar nicht erfüllt. Es wird daher vermutet, dass (7) zwei Gesetzmässigkeiten enthält, eine von der Kathodenform unabhängige und eine nur bei der Halbkugelkathode zufällig geltende Beziehung. Durch Probieren findet man für die Halbkugelkathode

$$I \cdot U_m^{\frac{1}{2}} = \text{konst.} \quad (8)$$

Setzt man (8) in (7) ein, so ergibt sich mit Annäherung die Beziehung

$$\frac{D}{\sqrt{U_m}} = \text{konst.} \quad (9)$$

Bildet man auch für die Stabkathode die Grössen $D/\sqrt{U_m}$, so ergeben sich Werte von der gleichen Grössenordnung. Die Resultate sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Da bei der Stabkathode die Abfallweiten D etwas streuen, so werden hier zur Berechnung von $D/\sqrt{U_m}$ die Zahlen der glatten Kurve verwendet. Die angeherte Konstanz von $D/\sqrt{U_m}$ bei der Bogenentladung und zwar bei beiden Kathodenformen ist also eine empirisch festgestellte Gesetzmässigkeit, dabei weist die Gastemperatur als Funktion der Stromstärke einen noch ganz unbekannten Verlauf auf.

Tabelle 2.
Stickstoff $p = 180$ mm.

I Amp.	Halbkugelkathode			Stabkathode		
	U_m Volt	D_{180} mm	$\frac{D}{\sqrt{U_m}}$	U_m Volt	D_{180} mm	$\frac{D}{\sqrt{U_m}}$
0,08	190,6	0,319	0,0231			
0,1	162,4	0,293	230			
0,12	142,2	0,280	235			
0,15	121,2	0,261	237			
0,2	98,5	0,228	230			
0,3	73,7	0,200	232	265,2	0,363	0,0223
0,35				228,6	0,362	239
0,4	60,5	0,181	233	206,7	0,356	248
0,5	52,2	0,164	227	171,4	0,339	259
0,6	46,6	0,159	233	148,0	0,323	265
0,7	42,4	0,152	234	130,8	0,310	271
0,8	39,3	0,149	238	117,2	0,300	277
0,9	36,8	0,147	242	106,1	0,292	283
1,0	34,8	0,146	247	97,9	0,286	289
1,1	33,0	0,145	252	90,5	0,282	297
1,2	31,8	0,143	254	84,2	0,279	304
1,3	30,4	0,141	256	78,9	0,278	313
1,4	29,5	0,144	265	74,4	0,276	320
1,5	28,8	0,141	263			
1,6	28,1	0,143	270			
1,7	27,4	0,144	276			
1,8	27,0	0,148	285			
1,9	26,6	0,142	275			

§ 5. Einfluss der Anodentemperatur auf die Abfallweite D .

Der Einfluss der Anodentemperatur auf die Abfallweite D lässt sich leicht untersuchen, indem thermisch verschiedene Anoden zur Verwendung gelangen. Als Anode wird deshalb einerseits eine Halbkugel an einem dünnen Stiel, andererseits ein am

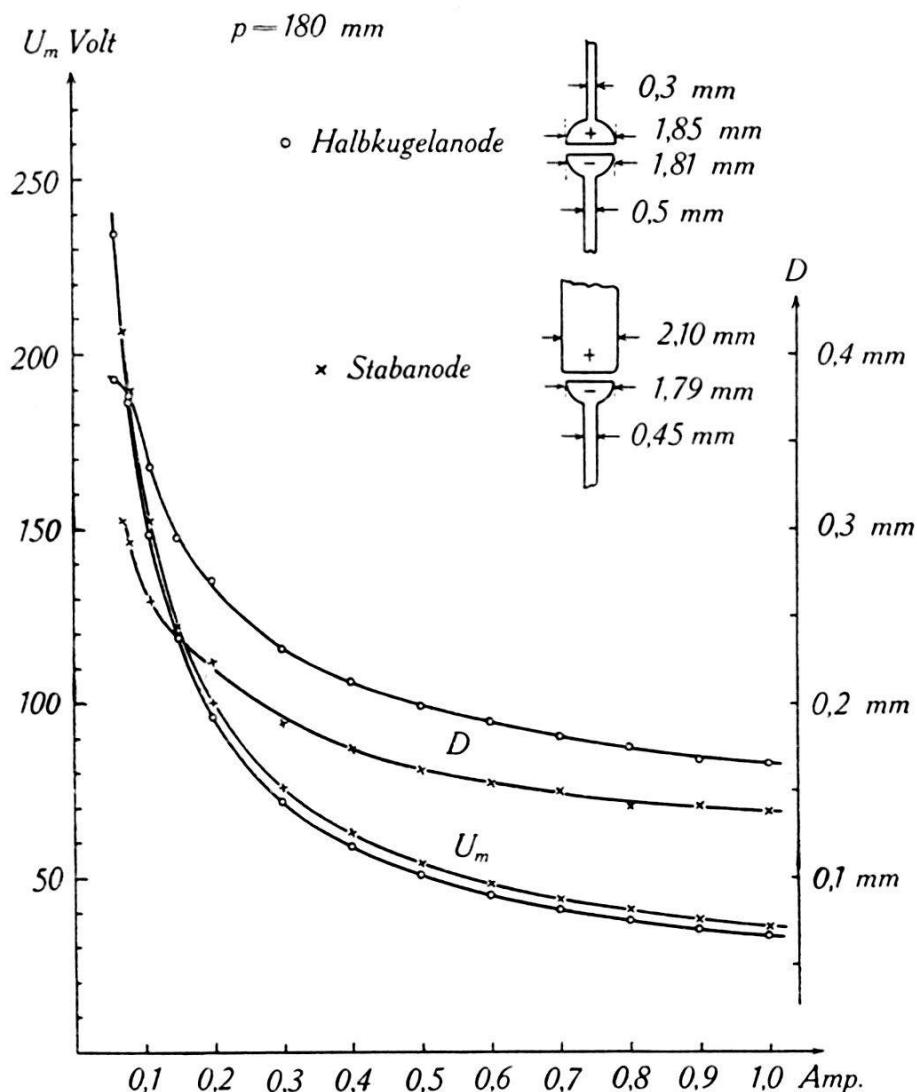


Fig. 4. Minimumspannung U_m und Abfallweite D als Funktion der Stromstärke bei thermisch verschiedenen Anoden.

Ende eben geschliffener Stab benutzt. Die Kathode besitzt in beiden Fällen die gleiche Form. Aus den im Strombereiche 0,08 bis 1,0 Amp. gemessenen Spannungs-Bogenlängekurven werden die Minimumspannung U_m sowie die Abfallweite D ermittelt. Die Resultate sind in Fig. 4 als Funktion der Stromstärke aufgetragen. Wie ersichtlich, ist bei der Halbkugelanode die Distanz D um etwa 20% grösser als bei der Stabanode, trotzdem U_m um einige Volt tiefer liegt. Dieser Unterschied der Minimumspannungen

röhrt davon her, dass die Stabanode dem Kathodenfallgebiet mehr Energie entzieht, was ein Ansteigen von U_m bewirkt. Bei konstanter Stromstärke weist die Halbkugelanode eben eine viel höhere Temperatur auf. Schon M. WEHRLI und P. BÄCHTIGER (l. c.) haben mit Sondenmessungen festgestellt, dass eine Stabanode mit kleiner werdender Bogenlänge den Kathodenfall erhöht infolge zunehmender Energieabfuhr aus dem Kathodenfallgebiet.

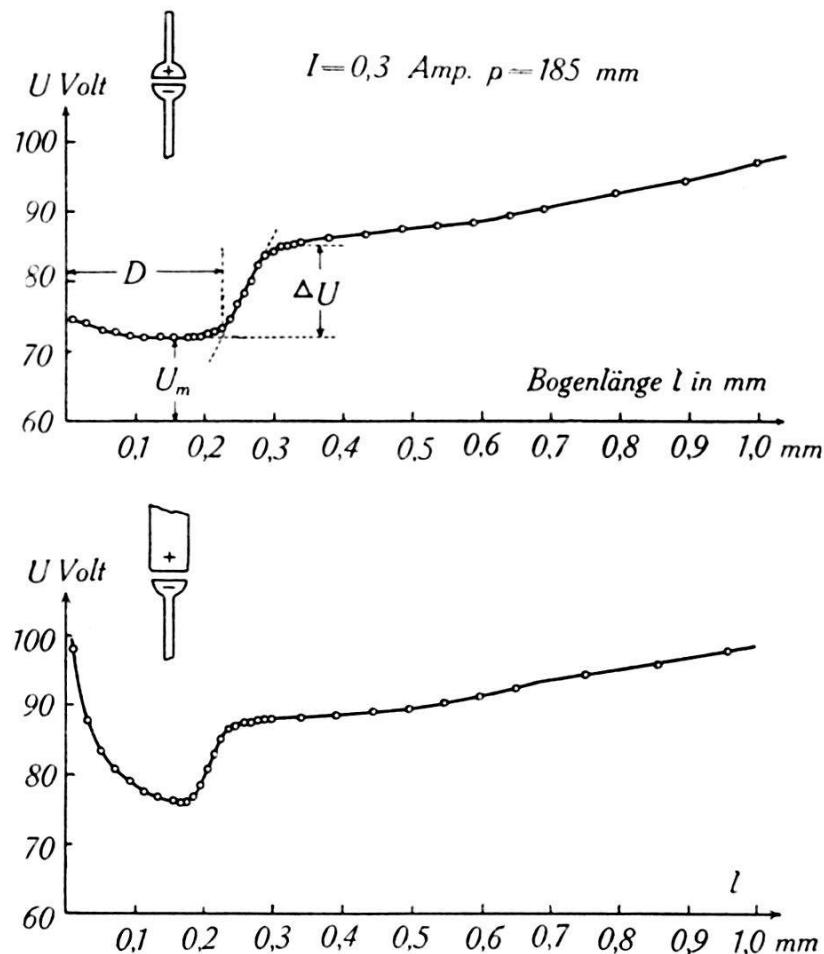


Fig. 5. $U-l$ -Kurven bei thermisch verschiedenen Anoden.

Entsprechend den grösseren Abfallweiten D ist also die mittlere Gastemperatur bei der Halbkugelanode gemäss Gleichung (2) mindestens 20% höher als bei der Stabanode. Wäre sie gleich, so müsste ja infolge den Werten von U_m die Abfallweite bei der Stabanode grösser sein.

Vergleicht man die $U - l$ -Kurven für die beiden Anodenformen miteinander, so ergibt sich, wie aus Fig. 5 ersichtlich ist, ein wesentlicher Unterschied nur innerhalb D . Während bei der Halbkugelanode der Wiederanstieg der Spannung nur 3 Volt beträgt, zeigt sich bei der Stabanode eine Zunahme von über 20 Volt. Es folgt daher, dass diese starke Zunahme nicht durch eine Behin-

derung des Kathodenfalles hervorgerufen wird, sondern lediglich eine Erhöhung des Kathodenfalles durch anodischen Energieentzug darstellt. Der Kathodenfall U_K bleibt bei Verwendung einer Stab-anode also nicht mehr wie in § 3 konstant, sondern steigt mit kleiner werdender Bogenlänge an. Um zu untersuchen, ob auch bei der Halbkugelanode eine Erhöhung von U_K eintritt, wird bei der Stromstärke 0,4 Amp. die Elektroden temperatur als Funk-

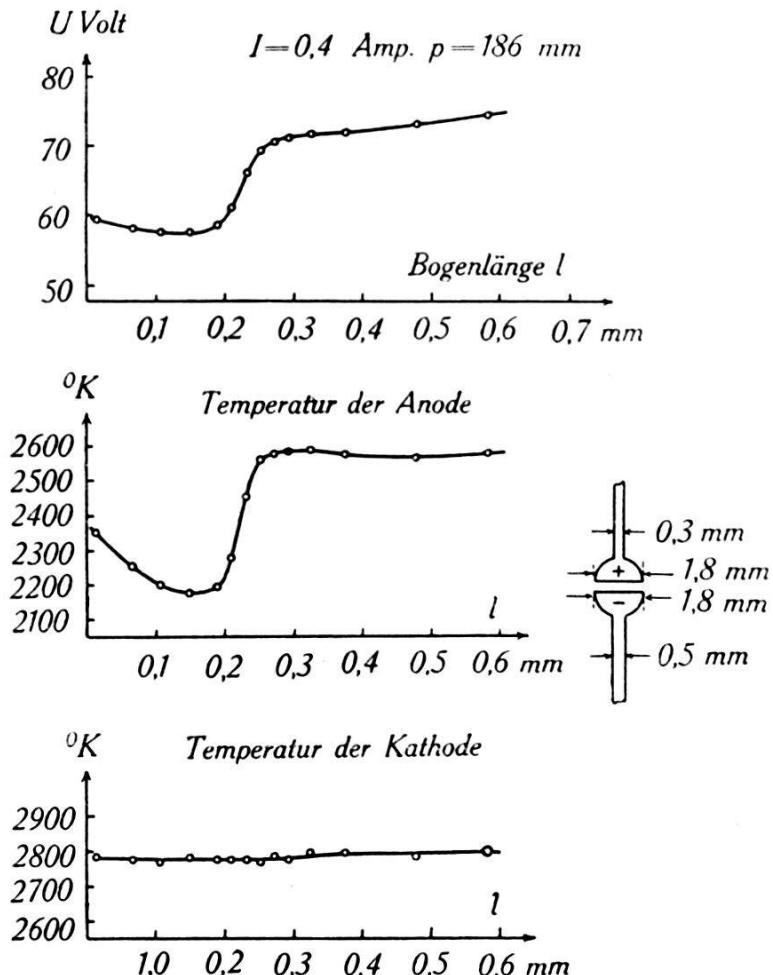


Fig. 6. Spannung, Anodentemperatur und Kathodentemperatur als Funktion der Bogenlänge.

tion der Bogenlänge gemessen. Die Resultate sind in Fig. 6 wiedergegeben. Wie Fig. 6 zeigt, weist die Kurve der Kathodentemperatur nur einen schwachen Abfall von etwa 15° auf. Der Kathodenfall dürfte sich daher nicht allzustark ändern; konstant wie in § 3 bleibt er jedoch nicht. Zusammenfassend ergibt sich also, dass die gegenseitige thermische Beeinflussung bei ebenen Elektroden viel grösser ist als bei Kugelelektroden.

Um einen Vergleich mit den obigen Messungen (§ 4) zu ermöglichen, sind die $D/\sqrt{U_m}$ -Werte für die beiden Anodenformen in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3.
Stickstoff $p = 180$ mm.

I Amp.	Halbkugelanode			Stabanode		
	U_m Volt	D_{180} mm	$\frac{D}{\sqrt{U_m}}$	U_m Volt	D_{180} mm	$\frac{D}{\sqrt{U_m}}$
0,08	186,2	0,375	0,0275	189,0	0,292	0,0212
0,11	148,2	0,335	275	152,0	0,258	209
0,15	118,4	0,295	271	122,0	0,235	213
0,2	95,9	0,270	276	100,1	0,214	214
0,3	71,9	0,231	272	76,0	0,189	217
0,4	59,0	0,212	276	62,6	0,174	220
0,5	50,8	0,198	271	54,1	0,161	218
0,6	45,0	0,189	282	48,2	0,154	222
0,7	40,9	0,180	281	43,9	0,150	226
0,8	37,7	0,174	284	40,4	0,141	222
0,9	35,1	0,167	282	38,0	0,140	227
1,0	33,2	0,165	286	35,9	0,138	231

Es wäre möglich, dass der grosse Unterschied in den D -Werten für die beiden Anodenformen vielleicht durch unkontrollierbare Zufälligkeiten bedingt ist, z. B. nicht genau die gleiche Reinheit des Gases usw. Mit neu hergestellten Halbkugelektroden von nachfolgenden Dimensionen werden daher einige Spannungs-Bogenlängekurven nochmals gemessen. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 4 wiedergegeben.

Tabelle 4.
Stickstoff $p = 180$ mm.

Anode: Halbkugeldurchmesser 1,85 mm; Stieldurchmesser 0,3 mm.
Kathode: Halbkugeldurchmesser 1,79 mm; Stieldurchmesser 0,5 mm.

I Amp.	U_m Volt	D_{180} mm	$\frac{D}{\sqrt{U_m}}$
0,15	113,6	0,281	0,0264
0,3	68,8	0,230	278
0,6	43,1	0,184	280
0,9	34,0	0,170	292

Wie ein Vergleich mit Tabelle 3 (Halbkugelanode) zeigt, ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede, d. h. die Reproduzierbarkeit ist befriedigend. Der maximale Unterschied zwischen den entsprechenden D -Werten der Tabellen 4 und 3 beträgt 5%, während die Werte für die beiden Anodenformen um mindestens 20% verschieden sind.

§ 6. Messungen in Wasserstoff.

Um zu entscheiden, ob sich nur in N_2 ein Spannungsabfall ΔU ergibt, werden auch in Wasserstoff mit Halbkugelektroden Spannungs-Bogenlängekurven gemessen und zwar im Strombereiche 0,3 bis 0,9 Amp. Zwei von den ermittelten Kurven sind in Fig. 7 dargestellt. Die Kurvenform ist wesentlich anders als bei Stickstoff, indem nicht nur bei D , sondern auch noch bei einer grösseren Bogenlänge D^* ein Spannungsabfall ΔU auftritt.

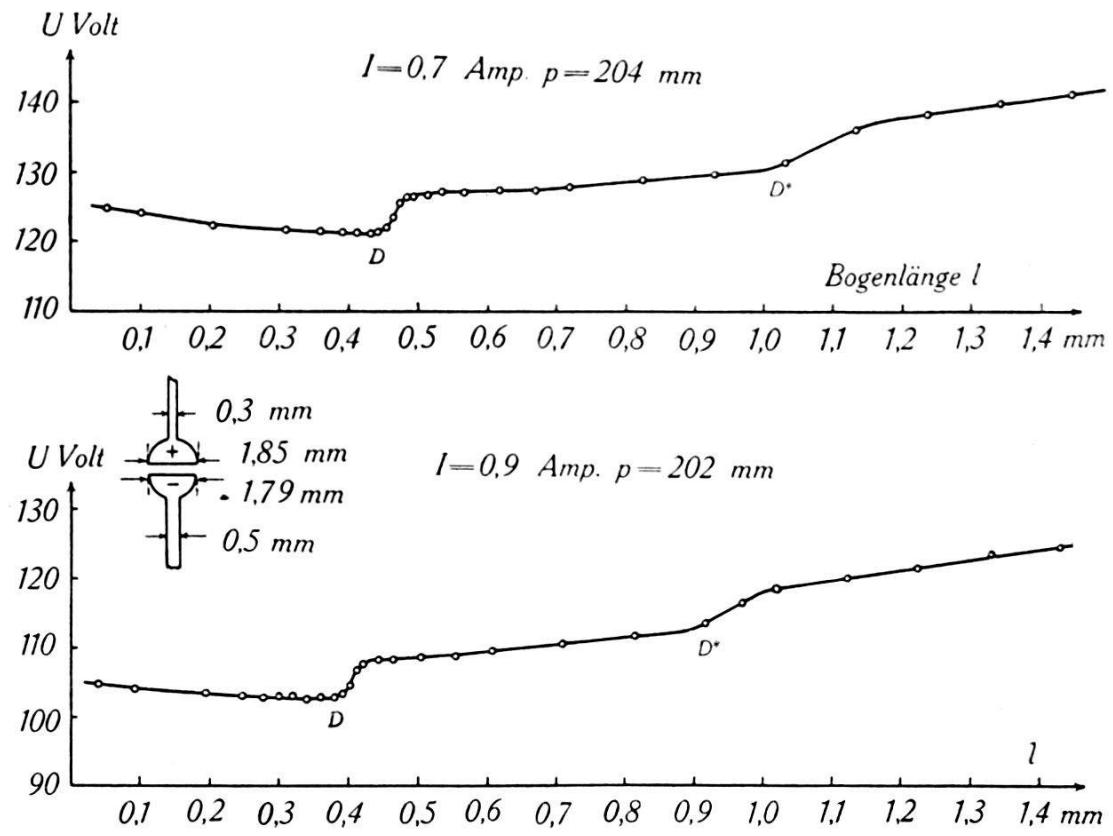


Fig. 7. Spannung-Bogenlängekurven in Wasserstoff.

Diese beiden Spannungsabnahmen sind angenähert gleich gross (5 Volt). Grössenordnungsweise gilt $D^* = 2\frac{1}{2}D$. Da schon visuell in der Projektion eine Verkleinerung der Anodentemperatur bei D und D^* wahrgenommen werden kann, so scheint es, dass der Abbau des Anodenfalles in zwei Stufen vor sich geht. Gemäss dem Mechanismus der Behinderung des Anodenfalles (siehe Arbeit I sowie M. WEHRLI und P. BÄCHTIGER l. c.) könnte diese Erscheinung folgendermassen erklärt werden: Der Anodenfall besteht aus zwei Stufen von verschiedener negativer Raumladungsdichte.

Bei Wasserstoff ist nicht mehr wie in N_2 $\frac{p \cdot D}{\sqrt{U_m}}$ annähernd konstant, sondern, wie Tabelle 5 ergibt $\frac{p \cdot D}{U_m} = \text{konst.}$ Die $\frac{p \cdot D}{U_m}$ Werte enthalten also die Gastemperatur implizit.

Tabelle 5.
Wasserstoff $p_0 = 180$ mm.

I Amp.	U_m Volt	p mm	D mm	$\frac{p \cdot D}{U_m}$
0,3	206,4	205	0,734	0,729
0,4	175,8	199	0,646	0,732
0,5	151,4	200,5	0,555	0,735
0,6	134,4	203	0,510	0,770
0,7	121,2	204	0,452	0,760
0,8	110,8	204,5	0,416	0,769
0,9	102,6	202	0,392	0,772

Ein Vergleich mit Tabelle 3 (Halbkugelanode) zeigt ferner, dass bei unveränderlicher Stromstärke und Kathodenform die

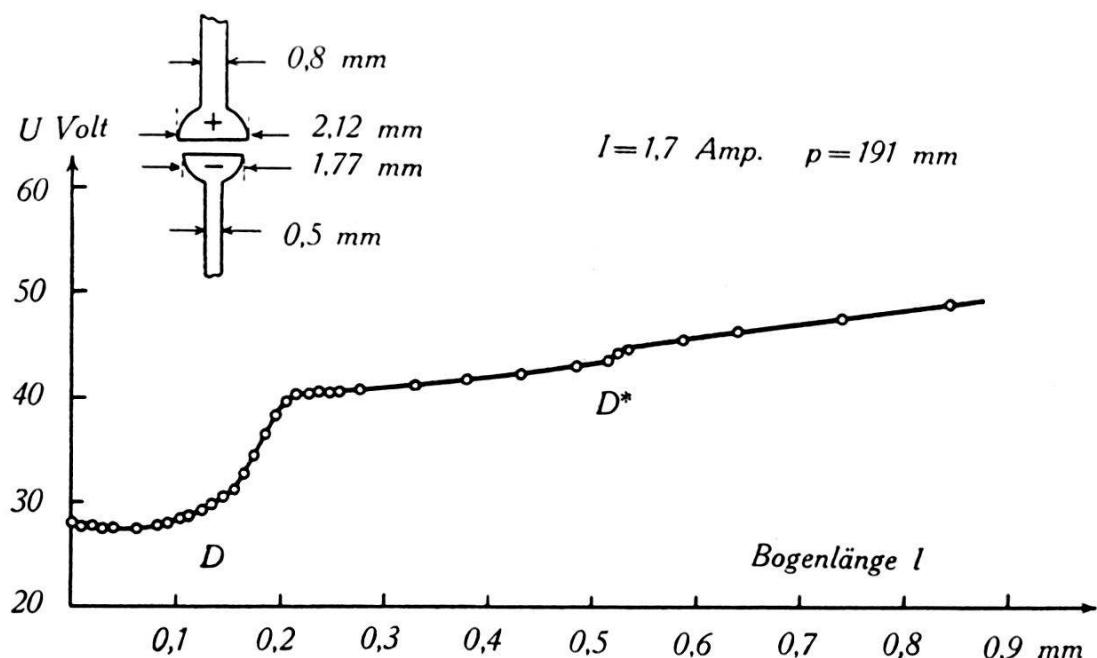


Fig. 8. Spannung-Bogenlängekurve in Stickstoff.

Minimumsspannung U_m in Wasserstoff viel grösser ist als in Stickstoff. Dieser Unterschied mag vor allem durch eine bei Wasserstoff bessere Wärmeableitung von der Kathode hervorgerufen werden. Während bei Stickstoff eine Bogenentladung mit den obigen Elektroden schon mit 0,06 Amp. brennt, setzt sie hier erst bei etwa 0,25 Amp. ein. Das Entladungsgefäß muss von 0,4 Amp. an mit einem starken Luftstrom gekühlt werden, um eine zu hohe Gas-temperatur zu vermeiden.

Infolge der bei Wasserstoff auftretenden zweifachen Spannungsabnahme wird man sich fragen, ob nicht auch die Kurven bei Stickstoff noch eine weitere bisher übersehene Spannungsstufe aufweisen. Dies ist auch in der Tat der Fall, wie Fig. 8 zeigt; die Grösse dieses Spannungsabfalles beträgt jedoch nur etwa 1 Volt. Diese Erscheinung wird durch eine grosse Anzahl von Kurven sichergestellt. Bei grossen Stromstärken scheint sie ausgeprägter als bei kleinem I . Liegen die Messpunkte weit auseinander, so weist die Kurve lediglich eine Art Wendepunkt auf. Die Untersuchung der Gesetzmässigkeiten von D^* sowie die Messung von Elektrodentemperaturen in Wasserstoff werden in einer späteren Arbeit geschehen.

§ 7. Diskussion.

Aus Formel (2) folgt für die Gastemperatur

$$T = \text{konst.} \frac{p \cdot D}{f(U_m)}. \quad (10)$$

In Arbeit I ist versucht worden, T bei der Bogenentladung für eine Halbkugelkathode abzuschätzen unter Zugrundelegung der von GÜNTHERSCHULZE bei der anomalen Glimmentladung gemessenen Funktion $f(U_m) = U_m^2$. Nimmt man ferner an, in der Glimmentladung betrage die Gastemperatur $330^\circ K$, so ergibt sich für die Konstante der Wert $1,35 \cdot 10^6$. Die so errechneten Gastemperaturen steigen bis in die Größenordnung von $20000^\circ K$ an. Es ist in Arbeit I jedoch ausdrücklich bemerkt worden, dass die erhaltenen Temperaturen nur sinnvoll sind, wenn auch in der Bogenentladung $f(U_m) = U_m^2$ ist. Mit den Werten von Tabelle 2 kann nun auch die Gastemperatur für eine Stabkathode nach obiger Weise berechnet werden. So ergibt sich z. B. für $I = 0,3 \text{ Amp.}$ $U_m = 265,2 \text{ Volt}$ eine Gastemperatur von $1250^\circ K$, d. h. viel kleiner als die Elektrodentemperaturen, was höchst unwahrscheinlich ist. Bei der Bogenentladung in Stickstoff kann daher $f(U_m)$ nicht mit U_m^2 identisch sein.

Ganz unabhängig von $f(U_m)$ ist es aber möglich, für zwei verschiedene Kathoden bei gleichem U_m das Verhältnis der Gastemperaturen anzugeben, denn nach (10) verhalten sich die T bei konstanter Minimumsspannung wie die entsprechenden Abfallweiten D . Einige der Fig. 2 entnommene Beispiele mögen dies illustrieren; sie sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Die Funktion $f(U_m)$ wird für beide Kathodenformen als gleich angenommen.

Tabelle 6.
Stickstoff $p = 180$ mm.

U_m Volt	Halbkugelkathode		Stabkathode		$\frac{T_H}{T_{St}} = \frac{D_H}{D_{St}}$
	I Amp.	D_H mm	I Amp.	D_{St} mm	
190,6	0,08	0,319	0,440	0,350	0,91
162,4	0,1	0,293	0,535	0,332	0,88
142,2	0,12	0,280	0,630	0,319	0,88
121,2	0,15	0,261	0,763	0,303	0,86
98,5	0,2	0,228	0,995	0,286	0,80
73,8	0,3	0,200	1,415	0,276	0,73

Der Index H bedeutet dabei Halbkugelkathode und St Stabkathode.

Aus Zeile 1 der Tabelle 6 ist ersichtlich, dass die Gastemperaturen trotz der bei der Stabkathode rund fünfmal grösseren Stromdichte nicht wesentlich verschieden sind.

Es wird nun versucht, ein Maximum der Gastemperatur bei Halbkugelektroden abzuschätzen. Die in Fig. 6 wiedergegebenen Kurven werden auch für die Stromstärke 0,9 Amp. gemessen. Bei einer Bogenlänge $l = D = 0,015$ cm beträgt die Kathodentemperatur $2945^{\circ} K$ und die Anodentemperatur $2658^{\circ} K$. Die Anode weist einen Durchmesser von 1,85 mm auf (Stieldurchmesser 0,3 mm). Die Bogenlänge ist also mindestens zehnmal kleiner als der Entladungsdurchmesser. Wir betrachten die Entladung als lineares Problem und legen die x -Achse in die Bogenachse. Macht man die Annahme, dass die gesamte im Gase erzeugte Wärme von den Elektroden abgeführt wird (was in Anbetracht der kurzen Bogenlänge berechtigt erscheint), so kann gemäss der Wärmeleitungstheorie und dem Satze über die Erhaltung der Energie die Gastemperatur in der x -Richtung keinen Wendepunkt aufweisen und $\frac{dT}{dx}$ besitzt an den Elektroden ein Maximum. Gelingt es uns, einen maximalen Wert für $\frac{dT}{dx}$ an der Anode anzugeben, so ergibt sich offenbar ein maximaler Wert der Gastemperatur, indem zur Anodentemperatur die Grösse $\frac{dT}{dx} \cdot D$ addiert wird.

Die Energiegleichung (bezogen auf 1 Sek.) für die Anode lautet

$$W_4 + W_5 = I\varphi + U_A \cdot I + St + Q \frac{dT}{dx} \cdot \lambda + I U^- \quad (11)$$

dabei bedeuten: W_4 die durch Strahlung und Wärmeleitung durch

den Stiel von der Anode fortgeführte Leistung, W_5 die durch das Gas abgeföhrte Leistung, φ die Austrittsspannung der Elektronen, U_A den Anodenfall, St die durch Strahlung von der Kathode der Anode zugeführte Leistung, Q die Querschnittsfläche der Anode, λ die Wärmeleitfähigkeit von N_2 bei $2658^{\circ} K$, U^- die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen beim Erreichen des Anodenfallgebietes.

Nach den Messungen von E. SIEBOTH (l. c.) beträgt W_5 höchstens 10% von W_4 , die linke Seite von (11) ist daher berechenbar, man erhält 11,6 Watt. Vernachlässigen wir das 2., 3. und 5. Glied der rechten Seite, so wird offenbar $\frac{dT}{dx}$ nur vergrößert, da diese Glieder nicht negativ sein können. Es ergibt sich also

$$11,6 - 0,9 \cdot 4,5 \geq Q \cdot \frac{dT}{dx} \cdot \lambda$$

$Q = 0,027 \text{ cm}^2$. Für λ wollen wir einen sicher zu kleinen Wert einsetzen, $\lambda = 8,5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Watt}}{\text{cm Grad}}$, wodurch der maximale Wert von $\frac{dT}{dx}$ nur erhöht wird. Als Maximum für die Gastemperatur erhält man daher

$$T_A + \frac{dT}{dx} \cdot D = 2650^{\circ} + 3,3 \cdot 10^5 \cdot 0,015 = 7500^{\circ} K$$

Damit ist wieder gezeigt, dass in der Bogenentladung bei Stickstoff $f(U_m)$ nicht mit U_m^2 identisch ist.

Unter der Voraussetzung, dass $f(U_m)$ eine einfache Potenz von U_m sein soll, ergeben sich einigermassen vernünftige Resultate (d. h. die Gastemperaturen für die beiden Kathodenformen sollen nicht um eine Zehnerpotenz verschieden sein usw.) nur bei der Potenz $\frac{1}{2}$. Bei konstantem Stickstoffdruck wäre demnach $\frac{D}{\sqrt{U_m}}$ ein quantitatives Mass für die mittlere Gastemperatur. Wendet man dies auf die Resultate von Tabelle 2 an, so steigt T mit zunehmender Stromstärke bei der Halbkugelkathode viel langsamer an als bei der Stabkathode. Die bei der Halbkugelkathode und einer Stromstärke von 1,9 Amp. herrschende Gastemperatur würde bei der Stabkathode schon bei 0,8 Amp. erreicht. Dies steht in guter Übereinstimmung mit der in § 4 wiedergegebenen Beobachtung, dass bei der Stabkathode die Anode bei einer kleineren Stromstärke schmilzt.

Irgendwelche Betrachtungen über die Grösse der Gastempera-

turen sollen erst angestellt werden, wenn $f(U_m)$ und die Konstante in (10) experimentell bestimmt worden sind¹⁾.

Betrachten wir noch kurz die Verhältnisse in Wasserstoff. A. GÜNTHERSCHULZE (l. c.) findet bei der Glimmentladung, dass sich die Abfallweite proportional mit U_m vergrössert. Vorausgesetzt, diese Gesetzmässigkeit gelte auch bei der Bogenentladung, so ist $\frac{p \cdot D}{U_m}$ ein quantitatives Mass für die Gastemperatur. Nach Tabelle 5 steigt T mit wachsendem I gleich langsam an wie in Stickstoff.

Zum Schlusse möchte ich meinen besten Dank aussprechen Herrn Prof. Dr. A. HAGENBACH für die gütige Überlassung der Institutsmittel und Herrn Priv.-Doz. Dr. M. WEHRLI für anregende Diskussionen.

Basel, Physikalisches Institut der Universität.

¹⁾ Diese Bestimmung scheint folgendermassen möglich: Bei einer Glimmentladung wird durch eine Glühkathode der Kathodenfall sukzessive erniedrigt. Gleichzeitig misst man die Abfallweite D und die Gastemperatur, z. B. mit einem Thermoelement, woraus dann die Konstante und $f(U_m)$ berechnet werden können.